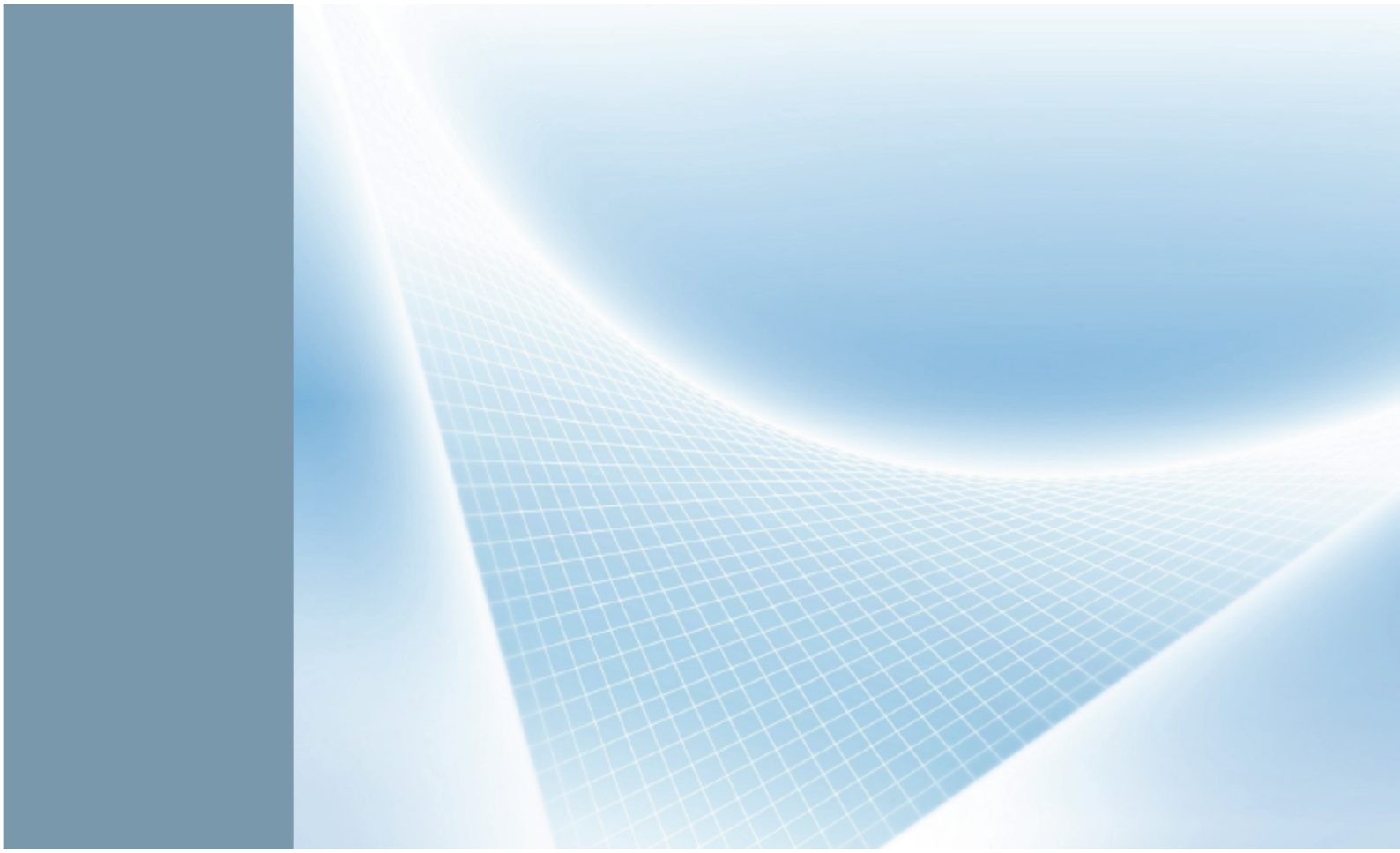
Leo Brecht, Birgit Stelzer



# „3D-Druck“

## Eine Technologievorausschau anhand IT-gestützter bibliometrischer Analyse und Szenariotechnik

**Philipp Staiger, Carsten Cap, Birgit Stelzer, Edgar Schiebel**

ITOP-Schriftenreihe Nr. 5
ISSN (Print) 2199-4919
ISSN (Online) 2511-1698

## Projektmitarbeiter

*Wissenschaftlicher Direktor*
Prof. Dr. Leo Brecht, Universität Ulm

*Wissenschaftliche Projektleiterin*
Birgit Stelzer, Dipl.-Kffr.

*Studentische Mitarbeiter*
Philipp Staiger, B.Sc.
Carsten Cap, B.Sc.

*Kooperationspartner:*
Dr. Edgar Schiebel, Austrian Institute of Technology, Wien

## Impressum

***Herausgeber***

Prof. Dr. Leo Brecht, Institutsdirektor und Dipl.-Kffr. Birgit Stelzer, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Institut für Technologie- und Prozessmanagement

Universität Ulm
Helmholtzstraße 22
D-89081 Ulm

Fon +49 (0) 7 31 50-3 23 00
Fax +49 (0) 7 31 50-3 23 09

E-Mail: leo.brecht@uni-ulm.de
Internet: www.uni-ulm.de/mawi/itop.html

***Druck***

Copyright © by Prof. Dr. Leo Brecht, Universität Ulm.
Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt.

Ulm, Dezember 2015. Printed in Germany.

# Inhaltsverzeichnis

Impressum ..... I

**Inhaltsverzeichnis ..... II**

**Abbildungsverzeichnis ..... IV**

**Tabellenverzeichnis ..... VI**

**Abkürzungsverzeichnis ..... VII**

**1 Executive Summary ..... 1**

**2 3D Printing ..... 4**

**3 Methodische Grundlagen ..... 5**

3.1 Bibliometrie ..... 6

3.2 Szenariotechnik ..... 9

**4 Bibliometrische Analyse zum 3D Printing ..... 11**

4.1 Einbettung des Technologiefeldes in die Dimensionen der Wissenschaft ..... 11

4.2 Netzwerkanalysen ..... 14

4.2.1 Netzwerk der Forschungsdisziplinen ..... 14

4.2.2 Netzwerk der Autoren ..... 15

4.2.3 Netzwerk der Organisationen ..... 19

4.3 Wissensbasen ..... 28

4.3.1 Entwicklung der Wissensbasen ..... 28

4.3.2 Inhalte der Wissensbasen ..... 29

4.4 Forschungsfronten ..... 31

4.4.1 Forschungsfronten im 3D Printing ..... 31

4.5 Forschungsportfolio ..... 33

4.6 Zusammenfassung ..... 36

**5 Szenarien für 3D Printing ..... 37**

5.1 Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes ..... 37

5.1.1 Gegenwärtige Situation und erste Prognose ..... 37

5.1.2 Einbettung des 3D-Drucks in das Umfeld der produzierenden Industrie ..... 38
5.2 Einflussbereiche und Einflussfaktoren/Treiber ..... 41
5.2.1 Trendanalyse ..... 41
5.2.2 Ermittlung der Einflussbereiche ..... 42
5.2.3 Ermittlung der Einflussfaktoren ..... 42
5.3 Deskriptoren und Projektionen ..... 48
5.3.1 Energiekosten ..... 49
5.3.2 Forschungsstand der Materialien ..... 54
5.3.3 Druckqualität und Drucktechnik ..... 56
5.3.4 Absatzmarktentwicklung ..... 57
5.3.5 Individualisierung ..... 59
5.3.6 Produktionsform ..... 60
5.4 Alternativenbündelung ..... 61
5.4.1 Projektionsbündel 1 ..... 62
5.4.2 Projektionsbündel 2 ..... 63
5.4.3 Projektionsbündel 3 ..... 64
5.5 Beschreibung der Szenarien ..... 65
5.5.1 Szenario 1: A Convenient Truth ..... 65
5.5.2 Szenario 2: Do-It-Yourself ..... 66
5.5.3 Szenario 3: The Rebound Effect ..... 67
5.6 Störereignisanalyse ..... 68
5.6.1 Störereignis 1: 3. Weltkrieg ..... 68
5.6.2 Störereignis 2: Ausfall des Internets ..... 70
5.6.3 Störereignis 3: Ölkrise ..... 71

**6 Ableitung relevanter Technologien ..... 72**
6.1 Robuste Technologien ..... 72
6.1.1 A Convenient Truth ..... 73
6.1.2 Do-It-Yourself ..... 73
6.1.3 The Rebound-Effect ..... 74
6.2 Ableitung von Maßnahmen ..... 74

**7 Zusammenfassung ..... 75**

**Literaturverzeichnis ..... 77**

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehensmodell ..... 6
Abbildung 2: Einordnung der Bibliometrie ..... 7
Abbildung 3: Quellenanalyse ..... 12
Abbildung 4: Artikel je Publikationsjahr ..... 12
Abbildung 5: Anzahl der Artikel nach Ländern ..... 13
Abbildung 6: Cluster nach Web of Science Categories (WC) ..... 15
Abbildung 7: Autoren mit den meisten Publikationen ..... 16
Abbildung 8: Netzwerk der Autoren auf Basis der Häufigkeiten von Koautorenschaften ..... 17
Abbildung 9: Autorenkomponente um U. Gbureck, J. E. Barralet, E. Vorndran ..... 18
Abbildung 10: Autorenkomponente um H. Seitz ..... 18
Abbildung 11: Autorenkomponente um R. Müller ..... 19
Abbildung 12: Netzwerk der Organisationen ..... 20
Abbildung 13: Organisationstypen im Netzwerk ..... 20
Abbildung 14: Organisationen mit den meisten Publikationen ..... 21
Abbildung 15: Die sieben größten Co-Autoren ..... 23
Abbildung 16: Komponente MIT Department of Mechanical Engineering und MIT Department of Mathematical Sciences ..... 24
Abbildung 17: Komponente McGill University ..... 25
Abbildung 18: Komponente Michigan University ..... 25
Abbildung 19: Komponente Disney Research Zürich und University of Nottingham ..... 26
Abbildung 20:Komponente Bond University ..... 27
Abbildung 21: Wissensbasen – 2D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von ko-zitierten Referenzen ..... 29
Abbildung 22: Forschungsfronten – 2D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von bibliographisch gekoppelten Publikationen ..... 32
Abbildung 23: Forschungsfronten – 3D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von bibliographisch gekoppelten Publikationen ..... 33
Abbildung 24: Zeitliche Einordnung der Publikationen je Forschungsfront ..... 34
Abbildung 25: Portfolio der Forschungsaktivitäten in den Forschungsfronten ..... 35
Abbildung 26: Semantisches Netz zur Darstellung des Betrachtungsgegenstandes 3D-Druck ..... 38
Abbildung 27: Identifizierte Trends ..... 42
Abbildung 28: Identifikation der Einflussfaktoren ..... 43
Abbildung 29: Darstellung der Einflussmatrix ..... 46
Abbildung 30: Darstellung der Relevanzmatrix ..... 47
Abbildung 31: Darstellung des Systemgrids ..... 48
Abbildung 32: Einflussfaktoren, Deskriptoren und Projektionen ..... 49

Abbildung 33: Anteil der Energiekosten nach Branche im Jahr 2006 ..... 50
Abbildung 34: Energiekosten für die Herstellung von Metallerzeugnissen in Deutschland in den Jahren 1997 bis 2011 (in Millionen Euro) ..... 50
Abbildung 35: Gesamtenergieverbrauch und Energie-Einsparung bei Kunststoffen und alternativen Materialien ..... 51
Abbildung 36: Entwicklung des weltweiten CO2-Ausstoßes von 1990 bis 2012 (in Mrd. Tonnen) ..... 52
Abbildung 37: Projektion des weltweiten CO2-Ausstoßes ..... 52
Abbildung 38: Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde) ..... 53
Abbildung 39: Industriestrompreise* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde) ..... 54
Abbildung 40: Europäische Patentanmeldungen 2001–2010, Wachstumsraten der Periode 2006–2010 gegenüber 2001–2005 ..... 55
Abbildung 41: Die 10 Unternehmen mit den meisten Patentanträgen 2013 ..... 56
Abbildung 42: Entwicklung des weltweiten Handelsvolumens im Warenhandel von 1950 bis 2012 (in Milliarden US-Dollar) ..... 58
Abbildung 43: Projektion des Welthandels ..... 59
Abbildung 44: Auswirkung von Megatrends auf Unternehmen ..... 60
Abbildung 45: Morphologische Analyse: Projektionsbündel 1 ..... 62
Abbildung 46: Morphologische Analyse: Projektionsbündel 2 ..... 63
Abbildung 47: Morphologische Analyse: Projektionsbündel 3 ..... 64
Abbildung 48: Auswirkung des ersten Störereignisses auf die Projektionen ..... 69
Abbildung 49: Auswirkung des zweiten Störereignisses auf die Projektionen ..... 70
Abbildung 50: Auswirkung des dritten Störereignisses auf die Projektionen ..... 71
Abbildung 51: Übersicht über die Ableitung der Technologien ..... 73

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wissensbasen ..... 28
Tabelle 2: Forschungsfronten ..... 31

# Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| Abb. | Abbildung |
| ASEAN | Association of Southeast Asian Nations |
| BCG | Boston Consulting Group |
| bzw. | beziehungsweise |
| ebd. | ebenda |
| F&E | Forschung und Entwicklung |
| IT | Informationstechnik |
| Mrd. | Milliarden |
| Nr. | Nummer |
| o. J. | ohne Jahr |
| S. | Seite |
| s. u. | siehe unten |
| TIM | Technologie- und Innovationsmanagement |
| u. a. | unter anderem |
| usw. | und so weiter |
| Vgl. | vergleiche |
| WC | Web of Science Category |
| z. B. | zum Beispiel |

# 1 Executive Summary

*„Mein lieber Fabrikplaner, mach eine Fabrik, die heute Uhren und morgen Autos bauen kann, die jeden Tag andere Stückzahlen produziert, die aufblasbar und transportabel ist.“*[1]

Im Oktober 2012 veröffentlichte die Bundesregierung einen vorläufigen Abschlussbericht der Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion. Es geht um Umsetzungsempfehlungen für ein Zukunftsprojekt mit dem Titel „Industrie 4.0“.[2] In Anlehnung an die gebräuchliche Nummerierung von Softwareversionen bezeichnet dieser Titel die „vierte Stufe der Industrialisierung“ bzw. „die vierte industrielle Revolution“.[3] Sie richtet sich an den „technologischen Wandel des Zusammenwachsens moderner Technologien der Informationstechnik mit klassischen industriellen Prozessen“[4]. Konkret gemeint sind die Vernetzung von Produkten mit dem Internet und resultierende Optimierungspotentiale.[5] Durch die Digitalisierung der Industrie, verspricht man sich unter anderem eine kostengünstige Produktion von Kleinserien, mehr Flexibilität, weniger Ressourcenverbrauch, neue Arbeitsprozesse sowie erhöhter Einsatz von Robotern.[6] Mittlerweile existiert also ein konkretes Bild von einer Fabrik, die diesen Anforderungen gerecht wird. Die flexibel und effizient produziert – die Fabrik der Zukunft.

Die größte Rolle spielen dabei vor allem zwei Technologien: das Internet der Dinge (im Zusammenhang mit Big Data) und der 3D-Druck. In dieser Arbeit wird der 3D-Druck als Technologie der Zukunft näher betrachtet und die zukünftige Entwicklung dieses Technologiefeldes mittels einer Technologievorausschau analysiert. Diese wird anhand einer bibliometrischen Analyse von wissenschaftlichen Publikationen und der Szenariotechnik durchgeführt.

Die **Hauptergebnisse** der Technologievorausschau sind:

**Hot Spots der Wissenschaft**

Der Großteil der Publikationen zum 3D-Druck wurde in Journalen als Artikel veröffentlicht. Hauptsächlich stammen die Autoren aus Europa und Nordamerika. Die Publikationen zum 3D-Druck haben in den letzten Jahren stark zugenommen, das Forschungsfeld also an Bedeutung gewonnen. Bei der Analyse des Forschungsnetzwerks lassen sich zwei große Forschungsdisziplinen zusammenfassen: Material Science und Engineering. Biomaterialien und die Medizintechnik stellen in diesen Forschungsdisziplinen das größte konkrete Anwendungsgebiet dar. Die Autoren mit den größten Netzwerken sind neben Prof. Dr. Uwe Gbureck vom Universitätsklinikum Würzburg, die Autoren Wojciech Matusik, Associate Professor am CSAIL (MIT) und Prof. Dr. Hermann Seitz von der Universität Rostock. Die Veröffentlichungen an denen Gbureck beteiligt ist, befassen sich vorwiegend mit biokeramischen Zellträgern und Zellgerüsten, die durch ein 3D-Druckverfahren mit geringer Temperatur hergestellt werden. Die Publikationen von Wojciech Matusik liegen vor allem im Bereich der Übersetzung von Daten, um aus diesen

[1] Professor Helmut Schulte, Aufsichtsratsmitglied der Siepe AG, in einem Vortrag über die Fabrikplanung der Zukunft
[2] Vgl. Kagermann et al. (2014), S. 8
[3] Ebd., S. 10
[4] Kagemann et al. (2014), S. 10
[5] Vgl. ebd.
[6] Vgl. The Economist (2012)

anhand eines 3D-Druckers Modelle und Prototypen zu erstellen. Die Forschungsarbeit von Seitz bezieht sich mehrheitlich auf die Herstellung von Knochenimplantaten und Zellträgern aus biokeramischen Materialien mittels 3D-Druck.

Den größten Teil der Knoten im Netzwerk der Organisationen bilden Universitäten (mehr als 70 Prozent). Der Anteil der nicht-universitären Organisationen ist damit mit knapp 30% ungewöhnlich hoch. Die Organisationen mit den größten Netzwerken sind das MIT Department of Mechanical Engineering (USA), Disney Research Zürich (Schweiz), McGill University (Kanada), Universität Würzburg (Deutschland) und Disney Research Boston (USA).

**Forschungsfronten**

Der 3D-Druck wird in unterschiedlichen Forschungsdisziplinen behandelt. Auffallend ist jedoch der hohe Anteil an Publikationen aus der medizinischen Forschung, die dieses Thema besonders in den letzten Jahren für sich entdeckt hat. Die zum Teil schon sehr ausgereiften Lösungen gerade im medizinischen Kontext (z. B. künstliches Knochengewebe) sprechen für eine hohe Leistungsfähigkeit der 3D-Drucktechnologie, die sich in der heutigen Verbreitung der industriellen Anwendung noch nicht widerspiegelt.

Zu den emergenten Forschungsthemen zählt unter anderem die Konstruktion von künstlichem Knochengewebe. Bei den weiteren Forschungsfronten stehen die Optimierung der Technologie und des Druckprozesses im Vordergrund ohne sich auf konkrete Anwendungsmöglichkeiten zu beziehen.

Das Forschungsthema Bone Tissue Engineering sowie die Verbesserung der Drucktechnologie und des Druckprozesses verzeichnen auch die größten Wachstumsraten bei der Publikationsanzahl. Insgesamt stellen Publikationen aus medizinischen Anwendungsbereichen den Großteil der aktuellen Publikationen und befinden sich kurz vor dem Transfer in die Praxis.

**Drei Szenarien**

Im Szenario „A Convenient Truth“ konzentriert sich die Produktion auf kundennahe Standorte. Staatliche Eingriffe und die Erforschung umweltfreundlicher Materialien begrenzen den CO2-Ausstoß. Umweltfreundliche Herstellungsprozesse und individualisierte Produkte gehören zu den wichtigsten Kundenanforderungen.

Das Szenario „Do-It-Yourself“ ist charakterisiert durch die Möglichkeit eines kostengünstigen und qualitativ hochwertigen 3D-Drucks. Dieser ermöglicht die Anwendung im Haushalt und zwingt die Unternehmen, hochtechnologische Produkte kostengünstig herzustellen, um der fallenden Nachfrage nach individualisierten Produkten entgegenzuwirken.

Im Szenario „The Rebound Effect“ führen technologische Fortschritte bei der Energiegewinnung zu mehr Effizienz und niedrigen Energiekosten. Das resultierende Wirtschaftswachstum und die gesteigerte Produktion verhindern jedoch eine globale Senkung des CO2-Ausstoßes.

**Robuste Technologien**

Die 3D-Drucktechnologie ist bereits für unterschiedliche Anwendungsgebiete geeignet. Für eine umfangreiche Substitution konventioneller Produktionsmethoden oder Erschaffung vollständig neuer An-

wendungsgebiete sind eine stetig wachsende Druckqualität und kostengünstigere sowie energieeffizientere Drucktechniken eine wichtige Voraussetzung. Der Entwurf von für den 3D-Druck geeigneten Produktkonstruktionen und die Integration in die Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung der gesamten Unternehmensumwelt sind wichtige Faktoren für einen wirtschaftlichen Einsatz der Technologie.

# 2 3D Printing

1983 erfand Chuck Hull eine Methode, bei der Photopolymere durch punktuelle UV-Bestrahlung ihren Zustand von flüssig zu fest änderte. Damit wurde es erstmals möglich aus am Computer entworfenen Modellen feste Plastiken herzustellen. Die Methode wird Stereolithografie genannt und stellte die Grundlage für darauffolgende 3D-Drucktechniken dar. Der damalige Mitarbeiter einer kleinen Firma für Tischbeschichtungen ist heute Vizepräsident und Technikvorstand von 3D Systems, einem führenden Unternehmen im Bereich des 3D-Drucks.[7]

Seit der ersten Anwendung eines 3D-Druckverfahrens hat sich einiges getan: neue Materialien, bessere Druckqualität, stabilere Ergebnisse. 3D-Druck ist heute eine Milliardenindustrie, die auch zukünftig weiteres Wachstum verspricht.[8]

Die Anwendung in der Automobilindustrie verhalf dem 3D Druck zum Durchbruch. Prototypen und Modelle wurden schnell und kostengünstig angefertigt. Die Anwendung des Verfahrens für Prototypen wurde populär und weitete sich auch auf andere Industrien aus. Auch heute noch wird der 3D-Druck deshalb vor allem im englischen Sprachraum als *Rapid Prototyping* bezeichnet. Konsequenterweise nennt man den Einsatz zur Massenfertigung *Rapid Manufacturing*, die Herstellungsform blieb jedoch die Gleiche. Heutzutage ist es nicht nur möglich Kunststoffmaterialien zu drucken. Die verwendeten Materialien reichen von Beton und Papier zu Kunststoff sowie Metall und organischem Gewebe.[9]

Ausgangspunkt für das Verfahren ist ein dreidimensionales CAD-Modell, das am Computer erstellt wurde. Grundprinzip ist das Zerlegen eines Herstellungsprozesses für dreidimensionale Objekte in ein zweidimensionales Verfahren. Dafür wird das 3D-Modell mittels Software in Scheiben unterteilt. Das dreidimensionale Objekt entsteht durch den Druck von aufeinandergelegten Schichten. Der Druck einer einzelnen Schicht ist vergleichbar mit konventionellen Druckverfahren.[10]

Grundsätzlich gibt es fünf gängige Herstellungsverfahren: Stereolithografie (SLA), Selektive Laser Sintering (SLS), Fused Deposition Modeling (FDM), Laminated Object Manufacturing (LOM) und 3-Dimensional Printing (3DP). Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich in der angewandten Drucktechnik oder den eingesetzten Materialien und bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile. So ist beispielsweise der eingesetzte Baustoff beim *Selektiven Laser Sintering* nicht flüssig, sondern pulverförmig. Das Verfahren erleichtert die Erstellung von Überhängen, ist jedoch in besonderen Fällen auf Nachbearbeitung oder Hilfskonstruktionen angewiesen.[11] Das geeignete Druckverfahren muss durch die Anforderungen des Objekts, wie Material, Stabilität oder Oberflächenbeschaffenheit, gewählt werden.

Die Verwendung des 3D-Drucks bietet viele Vorteile gegenüber herkömmlichen Herstellungsverfahren. In vielen Anwendungsbereichen ersetzt er eine aufwändige Konstruktion einer Gießform, oder zahlreiche manuelle Bearbeitungsschritte. Außerdem wird nur das benötigte Baumaterial eingesetzt und der Materialverschleiß reduziert. 3D-Drucker ermöglichen Designs und Anwendungsgebiete, die mit anderen Verfahren nicht durchführbar wären, wie beispielsweise runde, organische Formen. Bei konventionellen Herstellungsmethoden verursachen diese einen erheblichen Mehraufwand. Auch

[7] Vgl. Ponsford und Glass (2014)
[8] Vgl. ebd.
[9] Vgl. Unger (o. J.), S. 1
[10] Vgl. ebd.
[11] Vgl. ebd.

können mittlerweile mehrere unterschiedliche Materialien gleichzeitig verarbeitet werden. Die Kosten beim Druckverfahren sind unabhängig von der Anzahl der gedruckten Objekte und unterliegen damit keinen Skaleneffekten. Erstellte Entwürfe sind reproduzierbar, unterschiedliche Objekte können ohne Umrüstvorgänge in beliebiger Reihenfolge gedruckt werden.[12]

Die Einsatzgebiete des 3D-Drucks steigen kontinuierlich mit der verbesserten Druckqualität und geringeren Anschaffungskosten für 3D-Drucker. Auch im privaten Gebrauch ist der 3D-Druck mittlerweile angekommen. Preiswerte Modelle können von jedem Interessierten käuflich erworben werden.

# 3 Methodische Grundlagen

Ziel der Arbeit ist es, unter Anwendung einer bibliometrischen Analyse und der Szenariotechnik das Thema *Fabrik der Zukunft* mit dem Subthema *3D-Druck* strukturiert zu evaluieren und im Rahmen einer Zukunftsvorausschau mögliche zukünftige Entwicklungen der Fabrik der Zukunft zu erstellen. Die Ergebnisse der genannten Methoden dienen der Entscheidungsfindung innerhalb des strategischen Managements, um auf die zukünftige Entwicklung des Themenbereichs zu reagieren. Die Ableitung von relevanten Technologien auf Basis der Bibliometrie und Szenarioentwicklung stellt dabei ein Kernergebnis für strategische Entscheidungen in Unternehmen dar.

Dazu werden in Kapitel 4 mittels einer bibliometrischen Analyse wichtige Themenbereiche und Hotspots identifiziert sowie die Entwicklung des Themas anhand deskriptiver Statistiken dargestellt. Netzwerkanalysen dienen der Identifikation relevanter Autoren, Organisationen und Forschungsdisziplinen. Für die Analyse der wissenschaftlichen Literatur werden zentrale und emergente Themen identifiziert und als Wissensbasen und Forschungsfronten dargestellt. Der zeitliche Verlauf der Forschungsfronten und ihre gegenwärtige Bedeutung für die Praxis werden mithilfe eines Forschungsportfolios aufgezeigt.

In Kapitel 5 werden im Rahmen der Szenariotechnik Einflussbereiche und Treiber bzw. Einflussfaktoren identifiziert. Von den wichtigsten Einflussfaktoren werden Deskriptoren und deren Projektionen gebildet. Mittels Alternativenbündelung werden Szenarien entwickelt. Diese werden anschließend beschrieben und der Einfluss von möglichen Störereignissen wird analysiert.

Im sechsten Kapitel werden die Technologien abgeleitet, die sich in den Szenarien als robust erweisen. Im siebten Kapitel werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Das verwendete Vorgehensmodell kann in die folgenden drei Schritte unterteilt werden, die Kernergebnisse sind dunkel hinterlegt (Abbildung 1):

[12] Vgl. 3D Printing Blog (2012)

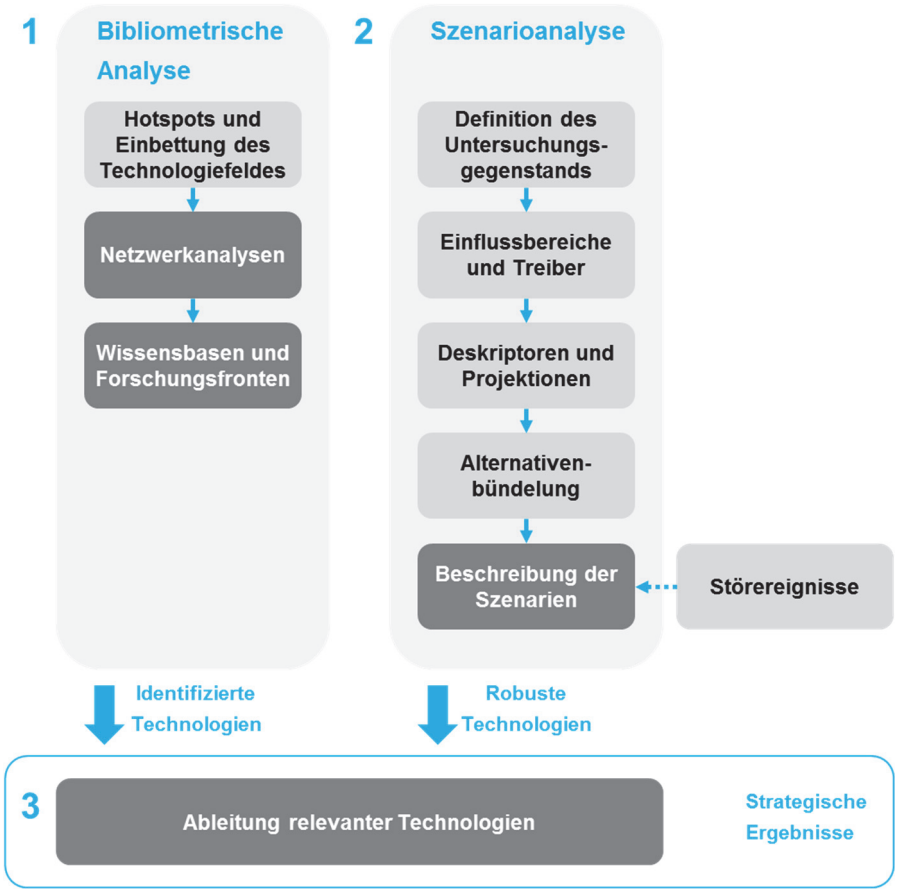



**Abbildung 1:** Vorgehensmodell

## 3.1 Bibliometrie

Unter dem Begriff Bibliometrie oder auch statistische Bibliografie versteht man die quantitative Untersuchung von Publikationen, Institutionen, Autoren, Co-Autoren, Zitierungen, Wissenslandkarten und Autorennetzwerken mittels statistischer Verfahren.[13] Bibiliometrische Analysen dienen dazu Forschungsschwerpunkte aufzudecken, Publikationsentwicklungen aufzuzeigen oder die Zitationshäufigkeit und damit auch die Wichtigkeit der zitierten Publikation zu ermitteln. Die Bibliometrie wird in der Literatur drei unterschiedlichen Wissenschaften zugeordnet (Abbildung 2). Einerseits wird sie als Teilgebiet der Scientometrie, der quantitativen Untersuchung der Wissenschaft und wissenschaftlicher Vorgänge verstanden. Andererseits wird sie aber auch der Informetrie zugeordnet, die sich mit der quantitativen Untersuchung von Informationen befasst. Die dritte Wissenschaft, der sie zugeordnet werden kann, ist die Bibliothekswissenschaft, die sich mit der Untersuchung von publizierten Informationseinheiten beschäftigt.[14]

[13] Vgl. Glänzel (o. J.)
[14] Vgl. Marx (2011)

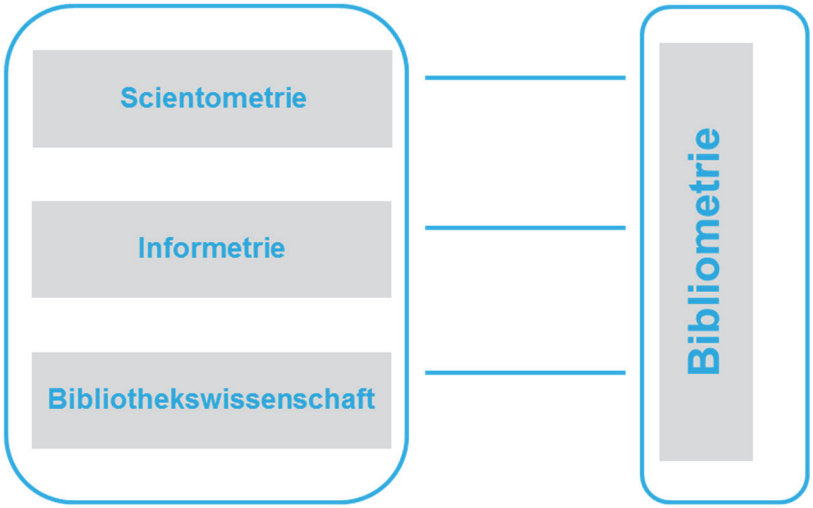



**Abbildung 2:** Einordnung der Bibliometrie

Die für diese Zwecke ersten relevanten bibliometrischen Daten und Analysemethoden wurden in den 1970er Jahren entwickelt. Zu dieser Zeit waren es hauptsächlich Mathematiker und Informationswissenschaftler, welche sich mit der Bibliometrie beschäftigten.[15]

Zu Beginn der 1990er Jahre erkannten Forscher, dass aufgrund der enormen Datenbasis bibliometrische Analysen eingesetzt werden können, um aus Datenbanken Indikatoren für die Verfügbarkeit, die Zitationshäufigkeit sowie die Verbreitung von Publikationen für die wissenschaftliche Forschung zu gewinnen. Im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte hat sich die Bibliometrie zu einem statistischen Bewertungsinstrument von Publikationssammlungen entwickelt. Autoren, Institutionen und Forschungseinrichtungen, Forschungsschwerpunkte (Wissensbasen) und emergente Forschungsthemen (Forschungsfronten) lassen sich mittels bibliometrischer Analysen quantitativ evaluieren. Für die vorliegende Forschung wurde die Zitationsdatenbank, Web of Science verwendet, um Zitationsanalysen durchzuführen.[16] Die genannte Zitationsdatenbank enthält eine Vielzahl von Publikationen und deren Zitationsraten. Des Weiteren bietet Web of Science mehrere wichtige Werkzeuge, um Daten auszuwerten. Die drei wichtigsten sind[17]:

- „Analyze Results“ (Zitationsanalysen von Autoren bzw. Publikationen)
- „Citation Report“ (Zitierungsbericht, H-Index)
- „Citation Map“ (generiert eine graphische Darstellung von Zitationsbeziehungen zwischen zitierten und zitierenden Publikationen).

Bei der Analyse der Daten wird unterstellt, dass die Zitationshäufigkeit einen Rückschluss auf die wissenschaftliche Relevanz und damit auf die Wichtigkeit einer Publikation in einem spezifischen Forschungsbereich zulässt. Die meistzitierten Arbeiten informieren über Beiträge von herausragender Beachtung, während der Anteil nicht zitierter Arbeiten die „Effizienz“ beim Publizieren und die Zitierungsrate die mittlere Wirkung der Arbeiten bemessen.[18] Des Weiteren kann aus der Anzahl der Zitierhäu-

[15] Vgl. Ball und Tunger (2005), S. 11
[16] Vgl. Web Of Science (2014)
[17] Vgl. Thomson Reuters (2011)
[18] Vgl. Marx (2011)

figkeit darauf geschlossen werden, wie bedeutend die Veröffentlichungen für den behandelten Forschungsbereich sind. Je öfter die Publikation von anderen Autoren zitiert wird, desto bedeutsamer ist diese für den Forschungsbereich.

Je nach Anzahl der betrachteten Publikationen kann sich eine bibliometrische Analyse sehr umfangreich gestalten und ist ohne entsprechende Softwareunterstützung nahezu unmöglich durchzuführen. Die bibliometrische Analyse in dieser Arbeit wurde mithilfe der Software BibtechMon vom Austrian Institute of Technology (AIT) durchgeführt, welche die Berechnung und insbesondere die Visualisierung der Ergebnisse ermöglicht. Die Visualisierung resultiert dabei in Netzwerken, bestehend aus Knoten und Kanten, welche die paarweise Verbindung der Knoten repräsentieren. Knoten können beispielsweise Autoren, Organisationen, Referenzen oder Artikel sein, je nachdem, was das Ziel der Untersuchung darstellt. Für die Interpretation der Netzwerke gilt im Falle der Autoren, dass die Verbindungen zwischen den Knoten die Ko-Autorenschaften widerspiegeln.[19] Wenn die Knoten Artikel darstellen, repräsentieren die Kanten entweder die bibliographische Kopplung nach Kessler (1962)[20] oder die Ko-Zitation nach Marshakova (1973)[21] und Small (1973)[22].[23] Die bibliographische Kopplung und die Ko-Zitation beruhen dabei auf der Annahme, dass Zitationen einen Hinweis darauf liefern, dass Artikel in einem thematisch inhaltlichem Zusammenhang stehen. Zwei Artikel sind bibliographisch gekoppelt, wenn beide Artikel einen dritten Artikel referenzieren. Je mehr Artikel gemeinsam zitiert werden, desto stärker ist die Kopplung. Im Gegenzug dazu sind zwei Artikel ko-zitiert, wenn diese beiden Artikel beide in einem dritten Artikel referenziert werden. Anhäufungen von Artikeln, welche ko-zitiert sind, werden Wissensbasen genannt. Eine Anhäufung bibliographisch gekoppelter Artikel bildet eine Forschungsfront.[24] Die Visualisierung der Netzwerkgrafiken in BibTechMon basiert auf dem Federmodell nach Eades (1984)[25] mit Ergänzung einer Dichtegrafik[26] für eine verbesserte Clusteridentifikation.

Folgende wesentlichen Ergebnisse aus der bibliometrischen Analyse werden in der vorliegenden Arbeit dargestellt.[27]

- *Deskriptive Statistiken*

Deskriptive Statistiken dienen dazu, einen (quantitativen) Überblick über das Forschungsgebiet zu bekommen. Hierzu gehören u. a. Informationen zu zentralen Autoren und Organisationen. Zentrale Autoren bzw. Organisationen sind solche, die häufig zitiert werden oder die selbst viel publiziert haben.

[19] Vgl. Havemann (2009), S. 36
[20] Vgl. Kessler (1962)
[21] Vgl. Marshakova-Shaikevich (1973)
[22] Vgl. Small (1973)
[23] Vgl. Schiebel (2012), S. 558, Boyack und Klavans (2010), S. 2390
[24] Vgl. Persson (1994), S. 31
[25] Vgl. Eades (1984)
[26] Eine vertiefte Beschreibung der Dichtegrafik findet sich in Schiebel (2012).
[27] Vgl. hierzu auch Stelzer et al. (2015), S. 143

- *Netzwerk der Autoren und Organisationen*

Auf Basis der Ko-Autorenschaft visualisieren diese Netzwerke die Ähnlichkeit von Autoren und im gleichen Sinne auch von Organisationen. Der Mehrwert der Netzwerkdarstellung im Vergleich zur deskriptiven Statistik liegt in der Darstellung von Beziehungen (Kanten, hier als Ko-Autorenschaften zu interpretieren) zwischen den Knoten (Autoren oder Organisationen). Auf diese Weise kann analysiert werden, wie stark isoliert oder vernetzt geforscht wird. Für die folgenden Ergebnisse gilt die Annahme, dass Zitationen einen Hinweis darauf liefern, dass Artikel in einem thematisch inhaltlichem Zusammenhang stehen.

- *Wissensbasen*

Sind die Knoten im Netzwerk keine Autoren, sondern Referenzen, können grundlegende Forschungsthemen entdeckt werden, welche die intellektuellen Wurzeln repräsentieren. Eine Anhäufung von Artikeln, welche ko-zitiert sind nennt man demzufolge Wissensbasen. Zwei Artikel sind ko-zitiert, wenn diese Artikel beide in einem dritten Artikel referenziert werden.[28]

- *Forschungsfronten*

Sind die Knoten im Netzwerk Artikel, so können Forschungsfronten aufgedeckt werden, welche emergente Forschungsthemen repräsentieren. Zwei Artikel sind bibliographisch gekoppelt, wenn beide Artikel einen dritten referenzieren. Je mehr Artikel gemeinsam zitiert werden, desto stärker ist die Kopplung. Eine Anhäufung bibliografischer Artikel bilden eine Forschungsfront und enthalten die neuesten Publikationen zu einem Forschungsthema.[29]

- *Forschungsportfolio*

Die Forschungsfronten werden auf eine Zeitachse gelegt und in Anlehnung an die BCG-Matrix angeordnet.[30] Der Mehrwert des Forschungsportfolios liegt in der Darstellung der Forschungsthemen über die Zeit. Es kann abgeleitet werden, welche Themen in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen haben, welche Themen erst gerade aufgekommen sind und welche Themen schon viel beforscht sind und womöglich bald in die Unternehmenspraxis abwandern.

## 3.2 Szenariotechnik

Die Szenariotechnik ermöglicht grundsätzlich das Visionieren unterschiedlicher Zukünfte für einen Betrachtungsgegenstand. Dieser Betrachtungsgegenstand wird als System definiert. Ziel ist es, die Einflüsse auf dieses System zu bestimmen. Diese werden detailliert beschrieben (Deskriptoren) und in die Zukunft projiziert (Projektionen). Die Projektion erfolgt dabei nicht (nur) trendspezifisch im Sinne eines möglichen Trendverlaufs, sondern in Form von Alternativen. Das heißt, es resultieren mehrere zukünftige Zustände (Szenarien), welche intern möglichst homogen und stabil sind und sich möglichst stark voneinander unterscheiden.

[28] Vgl. hierzu den Aufsatz von Small (1973)
[29] Vgl. hierzu den Aufsatz von Kessler (1963)
[30] Die x-Achse spiegelt den relativen Anteil der Artikel der Forschungsfront zu allen Artikeln des betrachteten Themas. Die y-Achse entspricht dem relativen Wachstum (Anzahl der Publikationen in Periode 2 – Anzahl der Pubilkationen in Periode 1)/Publikationen in Periode 1). Die Kreisgröße ist die Anzahl der Publikationen im Gesamtzeitraum.

Für die Ableitung der Szenarien gibt es eine Vielzahl an Vorgehensweisen. Für den Zweck der Technologievorausschau verwenden wir in diesem Bericht die Vorgehensweise nach Stelzer et al. (2015). Dort erfolgt die Technologievorausschau anhand der folgenden acht Schritte.[31] Charakteristisch für diese Vorgehensweise ist, dass sich an die Szenariobildung die Identifizierung emergenter Technologien anschließt. Außerdem werden die Erkenntnisse aus der Technologievorausschau für das strategische Management aufbereitet.

1. Systemische Beschreibung des Analyseobjekts
2. Identifizierung und Strukturierung von Einflussbereichen, Einflussfaktoren und Deskriptoren und deren Vernetzung
3. Ableiten von Projektionen und Bestimmung der Anzahl an Szenarien
4. Ableiten von Rohszenarien durch die Bildung konsistenter Projektionsbündel
5. Beschreibung der Szenarien
6. Identifizierung disruptiver Ereignisse und Bestimmung deren Einflusses auf die Szenarien
7. Identifizierung emergenter Technologien und Bestimmung robuster Technologien, die über alle Szenarien Bestand haben
8. Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Technologiestrategie und Ableitung eines Maßnahmenplans.

In den nachfolgenden Kapiteln werden zunächst die Ergebnisse der bibliometrischen Analyse vorgestellt. Anschließend werden auf Basis der oben dargestellten Vorgehensweise drei Szenarien für den Betrachtungsgegenstand “3D-Printing ” entwickelt, emergente bzw. robuste Technologien bestimmt und Handlungsempfehlungen für das produzierende Gewerbe abgeleitet.

[31] Vgl. für die Methodenkombination aus Bibliometrie und Szenariotechnik Stelzer et al. (2015)

# 4 Bibliometrische Analyse zum 3D Printing

Die Datenbasis für die bibliometrische Analyse mit dem Betrachtungsgegenstand des 3D-Drucks wurde mit Hilfe der multidisziplinären Zitationsdatenbank *Web of Science* ermittelt. Gesucht wurde im Themenbereich der Core Collection mit dem Suchbegriff „3D print". Diese Suchstrategie ergab 662 Ergebnisse[32], welche für die vorliegende Arbeit als Datengrundlage genutzt werden.

Ziel der bibliometrischen Analyse ist es, den IST-Zustand der Forschung im Kontext des 3D-Drucks zu analysieren: Welche Autoren forschen an dem Thema, welche Organisationen sind beteiligt? Wie ist der Forschungsstand und welche sind die wichtigen Forschungsthemen? Die Erkenntnisse aus der Bibliometrie können dann in die Bildung der Szenarien einfließen.

Für einen Überblick über den Forschungsstand wird das Technologiefeld in die Dimensionen der Wissenschaft (Publikationskanäle, Anzahl Artikel pro Jahr, beteiligte Länder, wichtige Autoren und Organisationen) eingeordnet. Zur näheren Betrachtung der Forschungszusammenarbeit werden Autorennetzwerke und Organisationsnetzwerke analysiert. Emergente Forschungsthemen werden anhand von Forschungsfronten identifiziert.

## 4.1 Einbettung des Technologiefeldes in die Dimensionen der Wissenschaft

**Zusammenfassung**

Der Großteil der Publikationen zum 3D-Druck wurde in Journalen als Artikel veröffentlicht. Hauptsächlich stammen die Autoren aus Europa und Nordamerika. Die Publikationen zum 3D-Druck haben in den letzten Jahren stark zugenommen, das Forschungsfeld also an Bedeutung gewonnen.

Die Ergebnisse der bibliometrischen Analyse verteilen sich auf die Bereiche Article (392), Proceedings Paper (167), Meeting Abstracts (24), News Item (18), Reviews (15), Editorial Material (13), Book Chapter (8), und Mischformen (25). Die Mischformen beinhalten Articles, Proceedings Papers, Reviews und Book Chapter, wobei diese nicht klar zugeordnet werden konnten. Die wichtigsten Publikationskanäle im Bereich des 3D-Drucks sind demnach vor allem Artikel in Journalen sowie Proceedings, die mehr als 84% aller Publikationen beinhalten. In der nachfolgenden Grafik ist die absolute Verteilung der Veröffentlichungen auf die jeweiligen Publikationskanäle dargestellt (Abbildung 3).

[32] Stand: Juni 2014

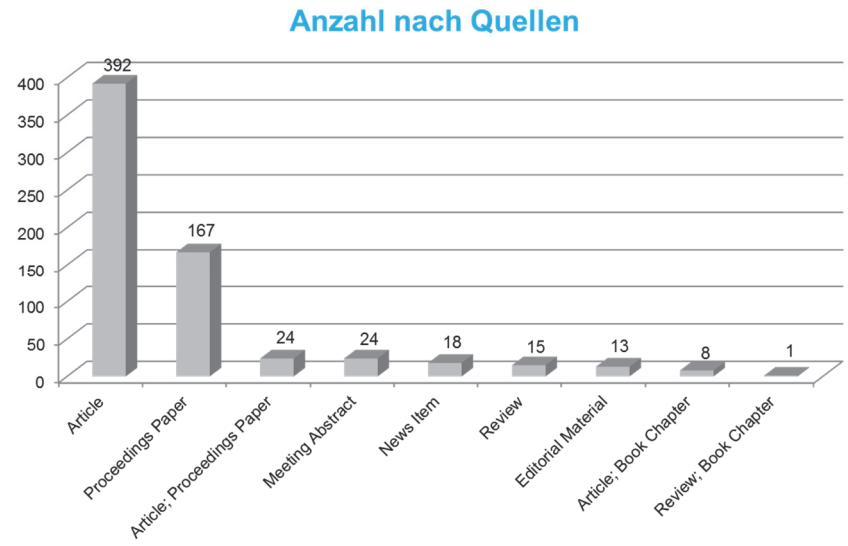



**Abbildung 3:** Quellenanalyse[33]

Um die Forschungsrelevanz des Themenbereichs *3D-Druck* identifizieren zu können, werden die erfassten Publikationen hinsichtlich ihres Veröffentlichungsjahres ausgewertet (Abbildung 4). Die Publikationen zum 3D-Druck haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Folglich gewann das Forschungsgebiet zunehmend an Bedeutung. Vor allem im Bereich der Materialforschung wird eine große Menge an Publikationen veröffentlicht (siehe Kapitel 4.2).

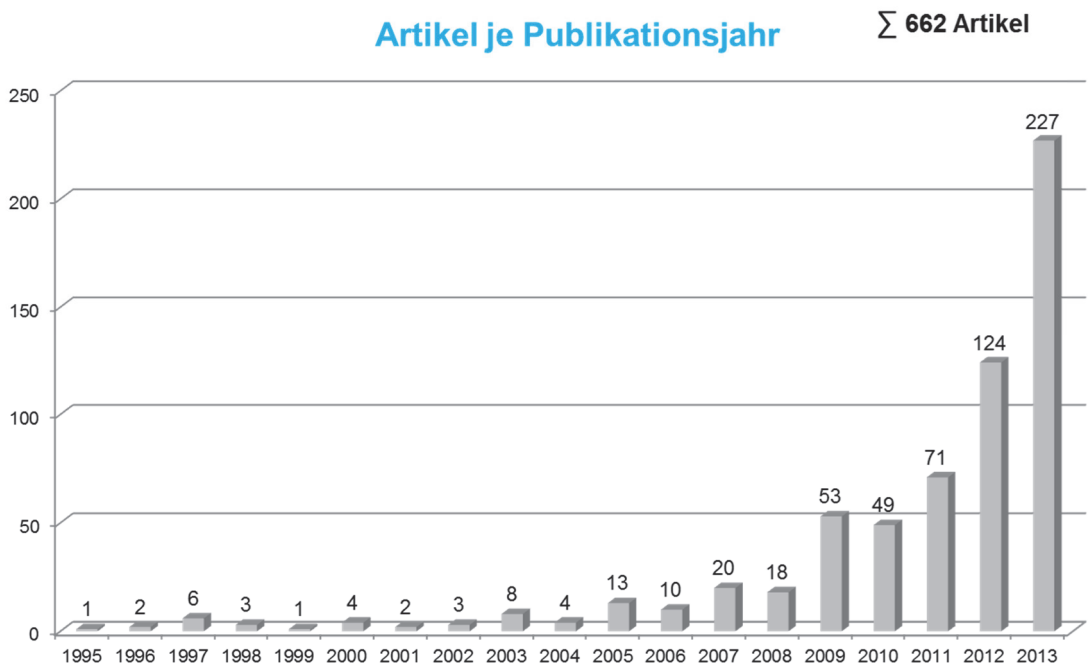



**Abbildung 4:** Artikel je Publikationsjahr

[33] Für Abbildungen dieses Kapitels gilt: vgl. Thomson Reuters Corporation (Web of Science) (2014)

Weiterhin kann ermittelt werden in welchen Ländern besonders viele Publikationen zum Themenbereich *3D-Druck* veröffentlicht werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht es, die Länder zu ermitteln, die im Bereich des 3D-Drucks besonders intensive Forschung betreiben.

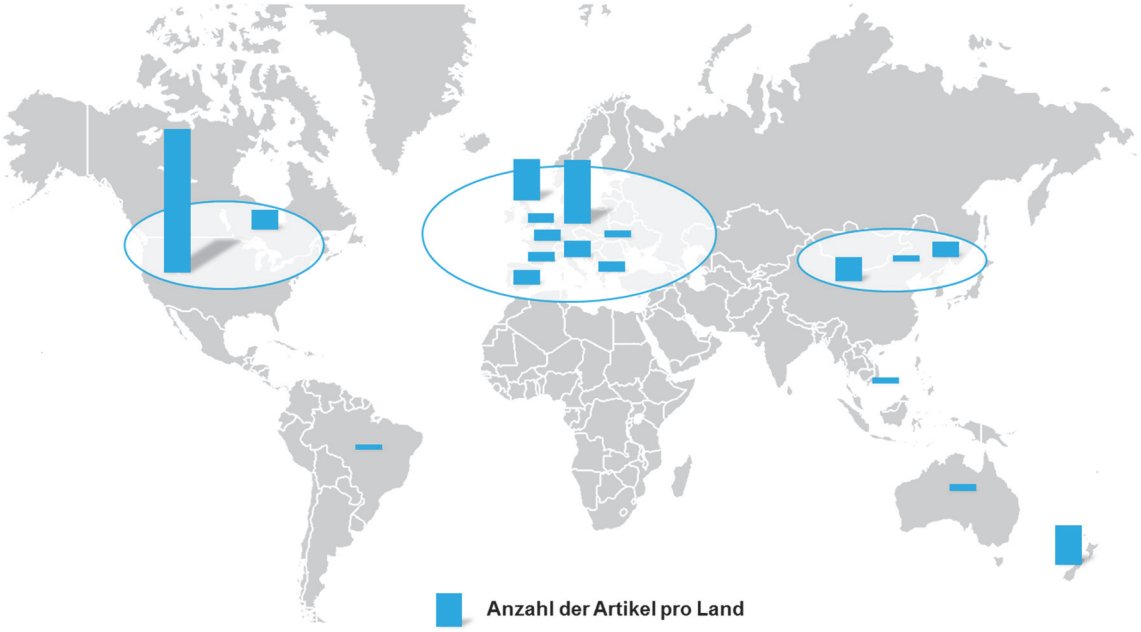



**Abbildung 5:** Anzahl der Artikel nach Ländern

In Abbildung 5 ist deutlich zu erkennen, dass vor allem Nordamerika (USA, Kanada), Europa (Deutschland, Großbritanien, Schweiz, Spanien, Niederlande, Frankreich, Italien) und Asien (China, Japan) federführend im Forschungsbereich *3D-Druck* sind. Die Vertreter der Südhalbkugel, die am meisten in diesem Bereich publizieren, kommen aus Neuseeland (Rang 13 mit 15 Publikationen) und Australien (Rang 14 mit 13 Publikationen). Das aktivste Land in Südamerika im Forschungsbereich des 3D-Drucks ist Brasilien mit ebenfalls 13 Veröffentlichungen, wohingegen Südafrika als Vertreter des afrikanischen Kontinents mit gerademal sechs Publikationen auf Rang 30 platziert ist.

Die aktivsten Autoren und Organisationen werden in Kapitel 4.2.2 und 4.2.3 behandelt.

## 4.2 Netzwerkanalysen

**Zusammenfassung**

Bei der Analyse des Netzwerks nach Forschungsdisziplinen lassen sich zwei große Forschungsdisziplinen zusammenfassen: Material Science und Engineering. Biomaterialien und Medizintechnik stellen in diesen Forschungsdisziplinen das größte konkrete Anwendungsgebiet dar.

Die Autoren mit den größten Netzwerken sind neben Prof. Dr. Uwe Gbureck vom Universitätsklinikum Würzburg, die Autoren Wojciech Matusik, Associate Professor am CSAIL (MIT), und Prof. Dr. Hermann Seitz von der Universität Rostock. Die Veröffentlichungen an denen Gbureck beteiligt ist, befassen sich vorwiegend mit biokeramischen Zellträgern und -gerüsten, die durch ein 3D-Druckverfahren mit geringer Temperatur hergestellt werden. Die Publikationen von Wojciech Matusik liegen vor allem im Bereich der Übersetzung von Daten, um aus diesen anhand eines 3D-Druckers Modelle und Prototypen zu erstellen. Die Forschungsarbeit von Seitz bezieht sich mehrheitlich auf die Herstellung von Knochenimplantaten und Zellträgern aus biokeramischen Materialien mittels 3D-Druck.

Den größten Teil der Knoten im Netzwerk der Organisationen bilden Universitäten (mehr als 70 Prozent). Der Anteil der nicht-universitären Organisationen ist damit mit knapp 30% ungewöhnlich hoch. Die Organisationen mit den größten Netzwerken sind das MIT Department of Mechanical Engineering (USA), Disney Research Zürich (Schweiz), McGill University (Kanada), Universität Würzburg (Deutschland) und Disney Research Boston (USA).

Netzwerkanalysen dienen der Ermittlung von relevanten Aspekten innerhalb eines Netzwerks, beispielsweise Autoren, Organisationen und Forschungsdisziplinen. Der Vorteil der Netzwerkanalyse ist es, dass es nicht nur um eine Auflistung der Betrachtungspunkte handelt, sondern auch direkte und indirekte Beziehungen der Netzwerkknoten grafisch dargestellt werden können und die Untersuchung der relationalen Beziehungen möglich ist. In den folgenden Unterkapiteln werden das Netzwerk der Forschungsdisziplinen, das Autorennetzwerk und das Netzwerk der Organisationen vorgestellt. Die Netzwerkanalyse der Autoren und Organisationen dient dazu, die Institutionen und Gruppen zu finden, die im betrachteten Forschungsbereich besonders intensive Forschung betreiben bzw. die meisten Publikationen zum Thema 3D-Druck veröffentlicht haben. Des Weiteren kann aus der Analyse geschlossen werden, wie stark die Autoren und Organisationen untereinander vernetzt sind und welche Verbindungen untereinander existieren. Dieser Sachverhalt wird durch die Knoten, die mit ihren Nachbarknoten durch Kanten verbunden sind dargestellt. Die Knoten repräsentieren die einzelnen Akteure des Netzwerkes: im Fall des Autorennetzwerks die Autoren und im Fall des Organisationsnetzwerks die Institutionen. Die Kanten, die die Akteure miteinander verbinden, stellen dabei deren Beziehungen dar. Die Anzahl der Veröffentlichungen lässt darauf schließen, wie hoch die Forschungsaktivität dieser Autoren und Organisationen im Forschungsfeld ist, wohingegen sich aus der Vernetzung die Zentralität ableiten lässt.

### 4.2.1 Netzwerk der Forschungsdisziplinen

Bei der Analyse des Netzwerks nach Forschungsdisziplinen lassen sich zwei große Disziplinen zusammenfassen:

- Material Science
- Engineering.

In der Kategorie *Material Science* wurden insgesamt 188 Publikationen erfasst, davon 122 im Bereich *Multidisciplinary* (1), also ohne spezifische Anwendungsgebiete und 66 Publikationen, die auf *Biomaterials* (3) eingeschränkt werden (Abbildung 6). Die Kategorie *Engineering* beinhaltet 257 Publikationen. Die Unterkategorien sind *Biomedical* mit 79 Publikationen (2), *Manufacturing* mit 63 Publikationen (4), *Mechanical* mit 62 Publikationen (5) und *Electrical & Electronic* mit 53 Publikationen (6).

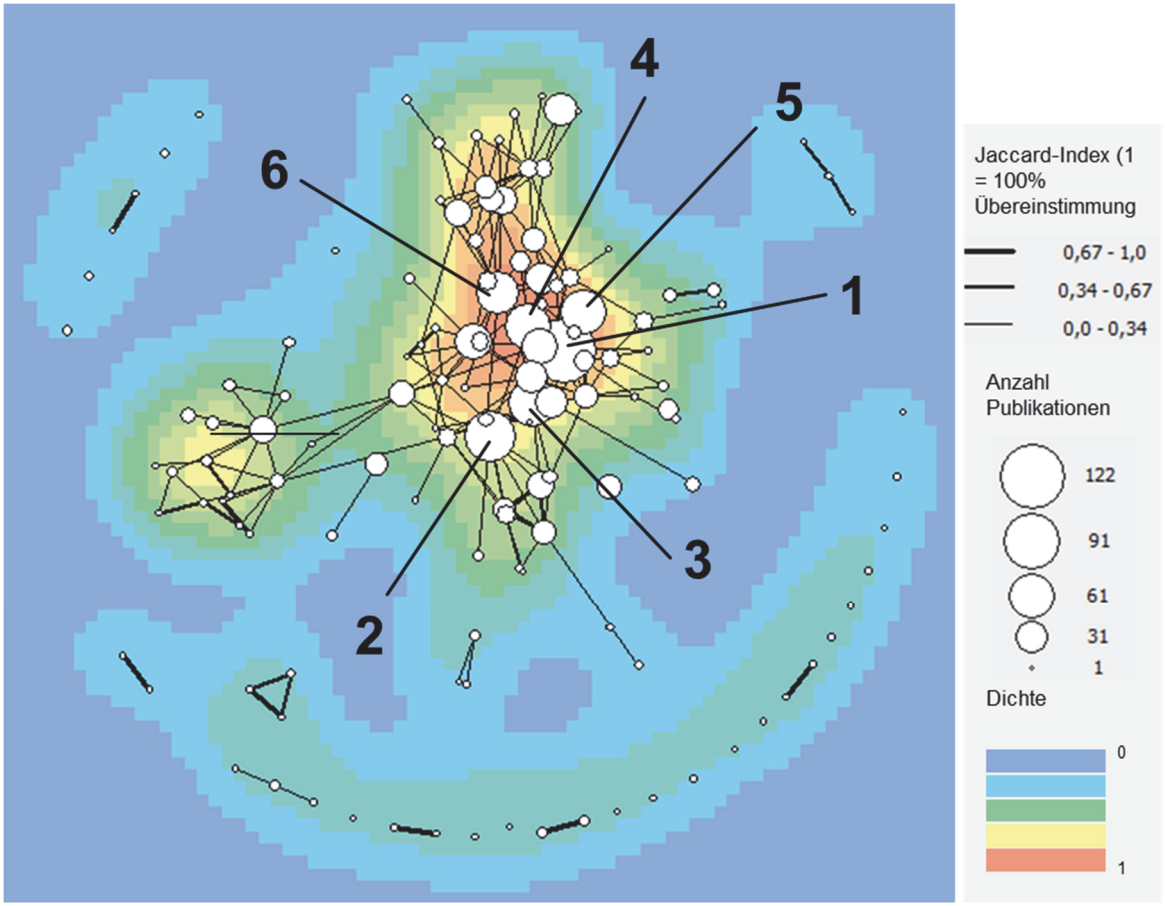



**Abbildung 6:** Cluster nach Web of Science Categories (WC)

Weitere Forschungsdisziplinen sind *Optics*, *Computer Science, Software*, *Nanoscience* und *Chemistry*. Biomaterialien und Medizintechnik stellen in den beiden größten Forschungsdisziplinen das größte konkrete Anwendungsgebiet dar. Die starke medizinische Forschungsaktivität im Bereich des 3D-Drucks zeichnet sich auch in den folgenden Kapiteln, dem Netzwerk der Autoren und Organisationen weiter ab.

### 4.2.2 Netzwerk der Autoren

Wertet man die Datenbasis nach Autoren und der Anzahl ihrer Veröffentlichungen aus, so stechen drei Autoren in besonderem Maße aus der Menge heraus (Abbildung 7). Herr Prof. Dr. Uwe Gbureck vom Universitätsklinikum Würzburg, der Plattformleiter für „Bioaktive Anorganische Scaffolds“, des FMZ, dem Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe der Medizin und Zahnheilkunde, ist. Dieser publizierte im Betrachtungszeitraum (1995-2014) neun Artikel. Die Veröffentlichungen an denen Gbureck beteiligt ist

befassen sich vorwiegend mit biokeramischen Zellträgern und -gerüsten, die durch ein 3D-Druckverfahren mit geringer Temperatur hergestellt werden. Ein weiterer sehr aktiver Forscher im Bereich des 3D-Drucks ist Herr Wojciech Matusik. Er ist Associate Profressor am CSAIL (The Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory), dem größten Forschungslabor am MIT und einem der wichtigsten Zentren für Informationstechnologie. Die Forschungsschwerpunkte seiner neun Veröffentlichungen liegen vor allem im Bereich der Übersetzung von Daten, um aus diesen anhand eines 3D-Druckers Modelle und Prototypen zu erstellen. Der Forscher mit den drittmeisten Publikationen im Bereich des 3D-Drucks ist Herr Prof. Dr. Hermann Seitz, Lehrstuhlinhaber der Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik, der Universität Rostock. Er hat im Betrachtungszeitraum sieben Artikel, sowie ein Proceeding Paper veröffentlicht. Seine Forschungsarbeit bezieht sich vor allem auf die Herstellung von Knochenimplantaten und Zellträgern aus biokeramischen Materialien mittels 3D-Druck. Besonders interessant ist das Proceeding Paper, in dem beschrieben wird, wie mittels eines 3D-Druckverfahrens Knochen und deren Porosität möglichst wirklichkeitsgetreu gedruckt werden können, um eine möglichst hohe Zellakzeptanz zu erreichen.

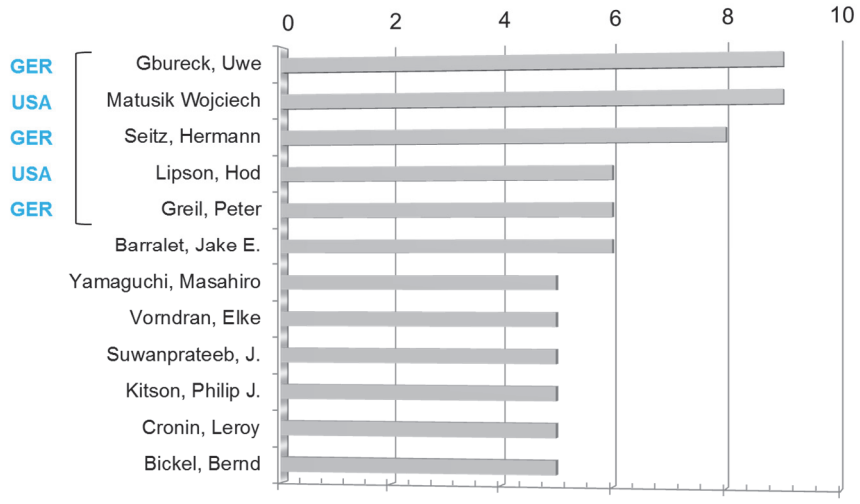



**Abbildung 7:** Autoren mit den meisten Publikationen

Das Netzwerk der Autoren besteht aus 256 Knoten, also Autoren, die zum Thema 3D-Druck publiziert haben. Die Autoren sind untereinander mit 391 Verbindungen (Kanten) vernetzt, was auf eine themenbezogene Zusammenarbeit schließen lässt. Bei der Auswertung des Netzwerkes fällt außerdem auf, dass sich einzelne Autorengruppen bilden. Die Vermutung liegt nahe, dass diese Autoren den gleichen Forschungsbereich des Themas untersuchen, beispielsweise Material Science oder Engineering.

Ausschlaggebend für die Netzwerkgröße sind die Anzahl der Co-Autorenschaften. Die fünf Autoren mit den meisten Co-Autoren/Kooperationen sind in diesem Fall Herr Prof. Dr. Uwe Gbureck mit 14 Co-Autoren, Herr Prof. Dr. Hermann Seitz, Prof. Dr. Herr Jake E. Barralet, Frau Dr. Elke Vorndran und Herr Ralph Müller, mit jeweils zehn Co-Autoren (Abbildung 8).

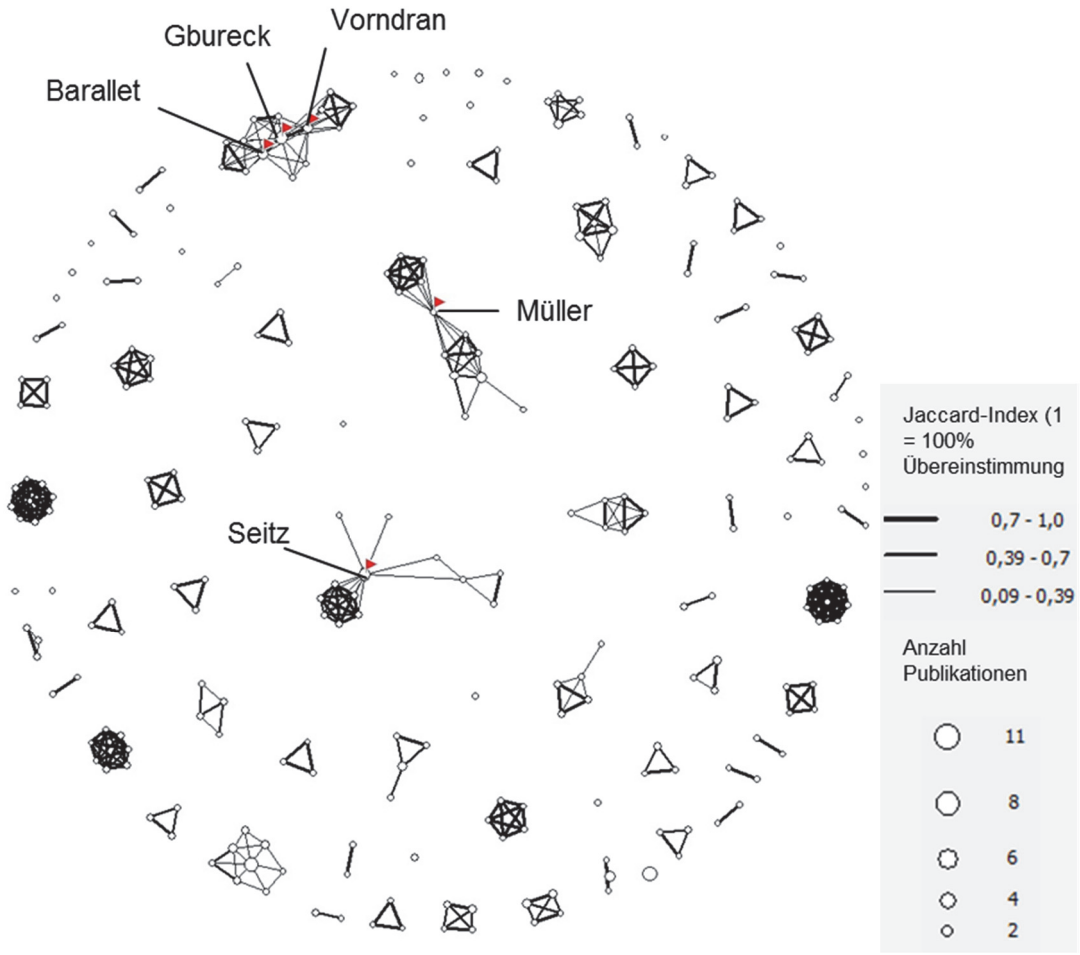



**Abbildung 8:** Netzwerk der Autoren auf Basis der Häufigkeiten von Koautorenschaften

Herr Prof. Dr. Jake E. Barralet ist lehrender Professor an der McGill University, Montreal. Er ist an der Fakultät für Zahnmedizin angestellt und seine sechs publizierten Artikel befassen sich vorwiegend mit biokeramischen Implantaten, die mittels 3D-Druck hergestellt werden und der Herstellung von Knochensubstituten mit Hilfe des 3D powder printing.

Frau Dr. Elke Vorndran ist Physikerin und Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe der Medizin und Zahnheilkunde der Universität Würzburg.[34] Da Frau Dr. Vorndran am selben Lehrstuhl wie Herr Prof. Dr. Gbureck arbeitet, verwundert es nicht, dass ihre Publikationen diesen ebenfalls als Autor tragen.

Herr Prof. Dr. Ralph Müller ist ordentlicher Professor für Biomechanik am Institut für Biomechanik und stellvertretender Vorsteher des Departements Gesundheitswissenschaften und Technologie der ETH Zürich.[35] Die Forschung, die er zurzeit verfolgt beinhaltet State-of-the-Art biomechanische Testung und Simulationstechniken sowie neuartige Verfahren der biomedizinischen Bildgebung und Visualisierung von muskuloskelettalen Geweben.[36] Prof. Dr. Müller hat zwei Artikel zum Thema 3D-Druck veröffentlicht, welche ihren Schwerpunkt auf das Thema Glas- und Keramik- (Knochen-)Gerüste legen.

[34] Vgl. Universitätsklinikum Würzburg (2014)
[35] Vgl. ETH Zürich (2014)
[36] Vgl. ebd.

Die folgenden Abbildungen zeigen einen Ausschnitt aus dem Autorennetzwerk und dienen dazu, die jeweiligen Autorengruppen zu illustrieren. Des Weiteren verdeutlichen die Grafiken den Grad der Vernetzung der Autoren innerhalb der Autorengruppe. In Abbildung 9 zeigt sich besonders die Zentralität der drei oben vorgestellten Autoren Barralet, Gbureck und Vorndran. Das Subnetzwerk besteht aus 15 Knoten und 48 Kanten. Aus der deutlich höheren Anzahl der Kanten (3,2 Mal so viele Kanten wie Knoten) kann man schließen, dass die Vernetzung der Autoren innerhalb dieses Subnetzwerkes sehr groß ist.

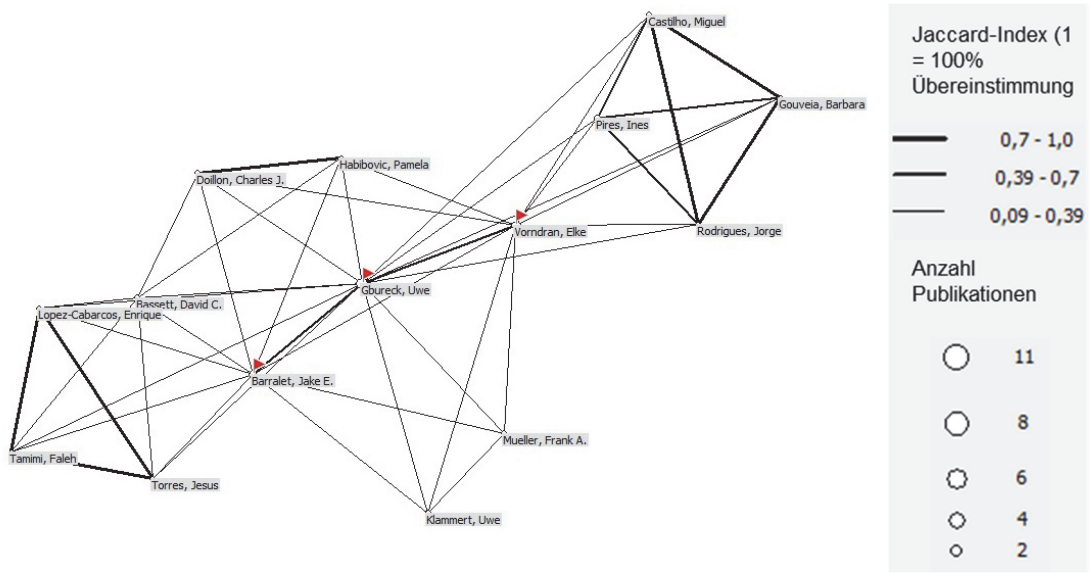



**Abbildung 9:** Autorenkomponente um U. Gbureck, J. E. Barralet, E. Vorndran

In der nachfolgenden Abbildung 10 ist die Autorengruppe um den Autor Seitz dargestellt. Dieses Subnetzwerk besteht aus 13 Knoten und 27 Kanten. In diesem Fall ist der Autor einerseits integriert in die unten links zu sehende Gruppe, andererseits ist er auch als Bindeglied zu Autoren außerhalb der Gruppe (beispielsweise Spath, Sebastian oder Deisinger, Ulrike) zu sehen.

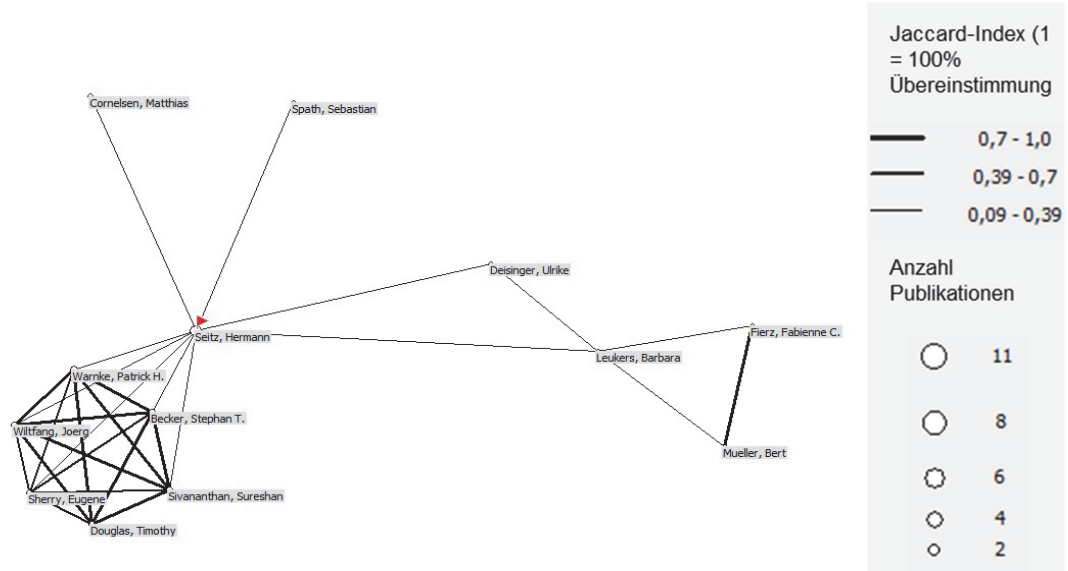



**Abbildung 10:** Autorenkomponente um H. Seitz

Ein ähnliches Subnetzwerk ist in Abbildung 11 dargestellt. Der Unterschied besteht jedoch darin, dass sich das Subnetzwerk aus zwei Autorengruppen zusammensetzt, die durch den Autor Ralph Müller verbunden sind. Dieses Netzwerk besteht aus insgesamt aus 13 Knoten und 33 Kanten.

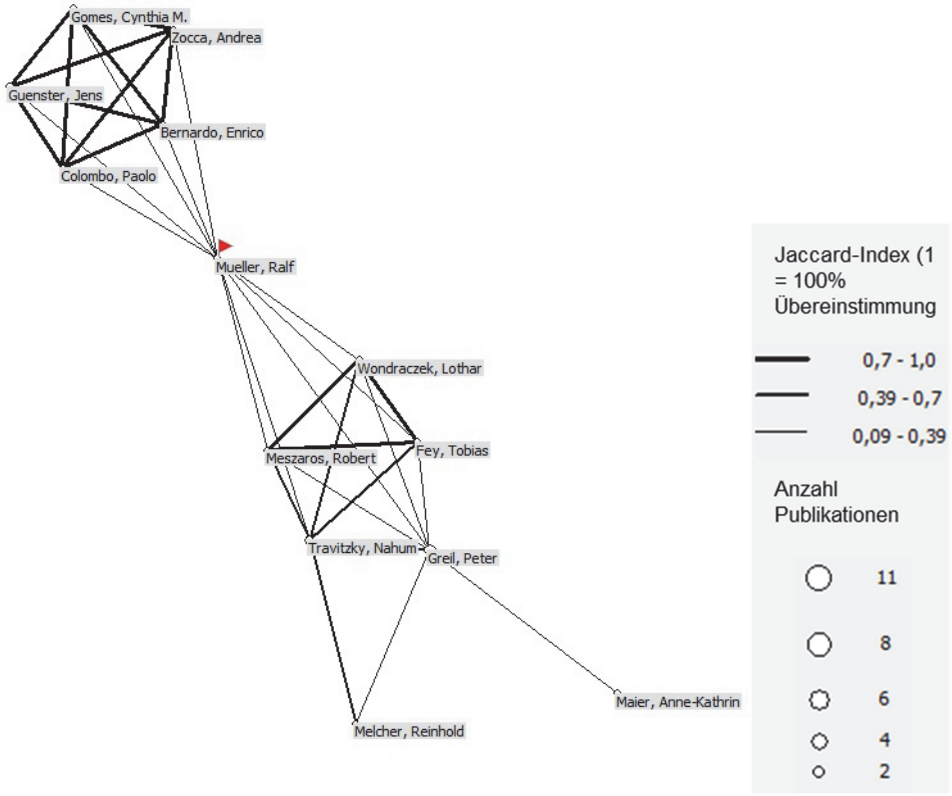



**Abbildung 11:** Autorenkomponente um R. Müller

Die Analyse der Autorennetzwerke zeigt, dass zum Teil eine starke Vernetzung zwischen den Autoren besteht, die ohnehin die größte Anzahl an Publikationen aufweisen (vgl. Abbildung 9). Interessant ist auch, dass die hohe Vernetzung einzelner Autoren weniger durch eine stark vernetzte Komponente entsteht, sondern dass diese Autoren als Bindeglied kleinerer Subkomponenten fungieren. Sie bewegen sich also nicht nur in geschlossenen Autorengruppen, sondern haben breite Netzwerke aufgebaut.

### 4.2.3 Netzwerk der Organisationen

Die Netzwerkanalyse der Organisationen dient dazu die Institutionen zu finden, die im betrachteten Forschungsbereich besonders intensive Forschung betreiben. Im Rahmen der Analyse des Netzwerks wird nach den Einrichtungen gesucht, die die meisten Publikationen zum Thema 3D-Druck veröffentlicht haben. Des Weiteren kann aus der Analyse geschlossen werden, wie stark die Organisationen untereinander vernetzt sind. Die Verbindungen der einzelnen Institutionen untereinander stellen ihre Zusammenhänge dar und drücken deren Vernetzung aus. Ein weiterer Punkt, der sich aus dem Organisationsnetzwerk ableiten lässt, ist die Evaluation des Netzwerks nach Gruppierungen von Organisationen. Durch die Verbindungen der Einrichtungen lassen sich im Netzwerk der Organisationen Gruppierungen erkennen. In Abbildung 12 wird dieser Sachverhalt durch die Knoten, die mit ihren Nachbarknoten durch Kanten verbunden sind, dargestellt. Die Anzahl der Veröffentlichungen lässt darauf schließen, wie hoch die Forschungsaktivität dieser Organisationen in diesem Bereich ist. Wohingegen sich aus der Vernetzung die Zentralität einer Institution ableiten lässt.

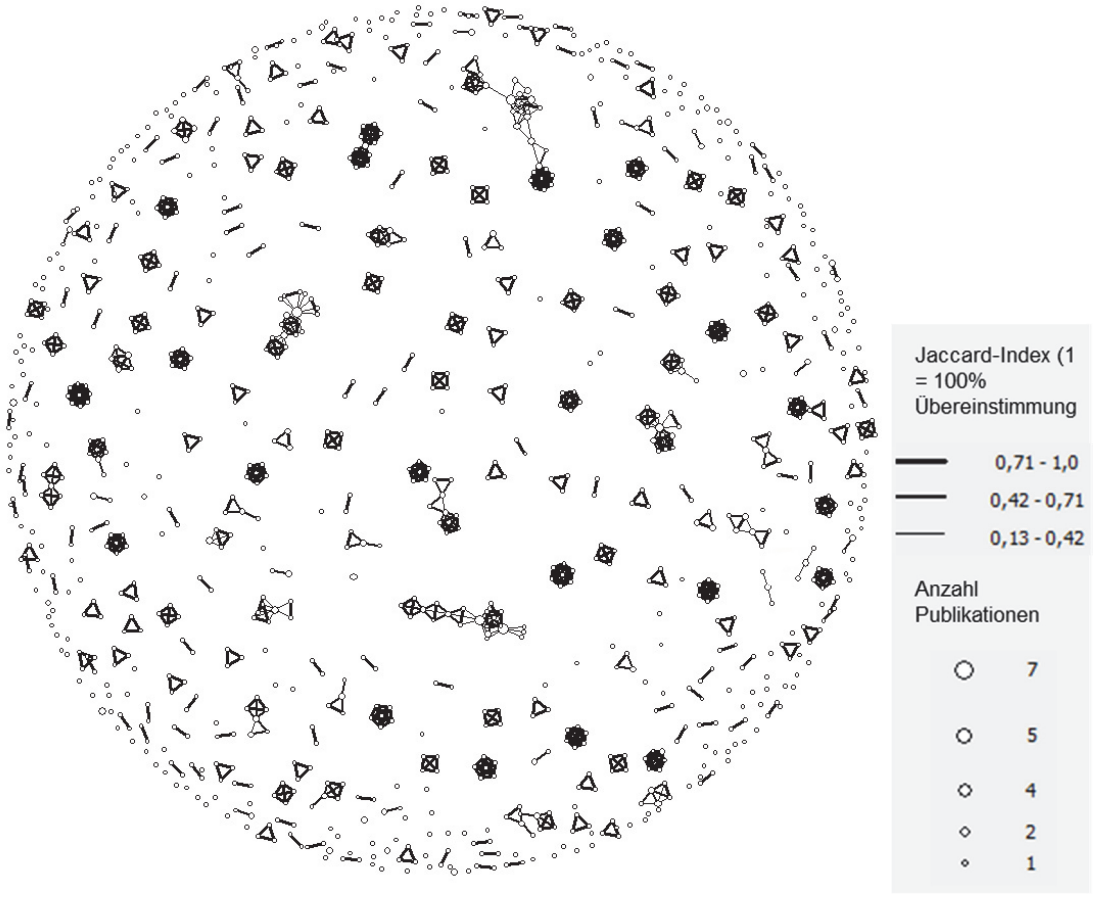



**Abbildung 12:** Netzwerk der Organisationen

Das Netzwerk der Organisationen setzt sich aus 1079 Knoten zusammen. Setzt man die Anzahl der an der Forschung im Bereich 3D Printing aktiven Organisationen mit der Zahl der Autoren in Relation, so erkennt man, dass viermal mehr Organisationen als einzelne Autoren in diesem aktiv sind. Diese enorme Anzahl lässt auf eine hohe Relevanz der 3D-Drucktechnik im Bereich Fabrik der Zukunft schließen. Die Knoten des Netzwerks verteilen sich folgendermaßen auf die verschiedenen Organisationsformen (Abbildung 13):

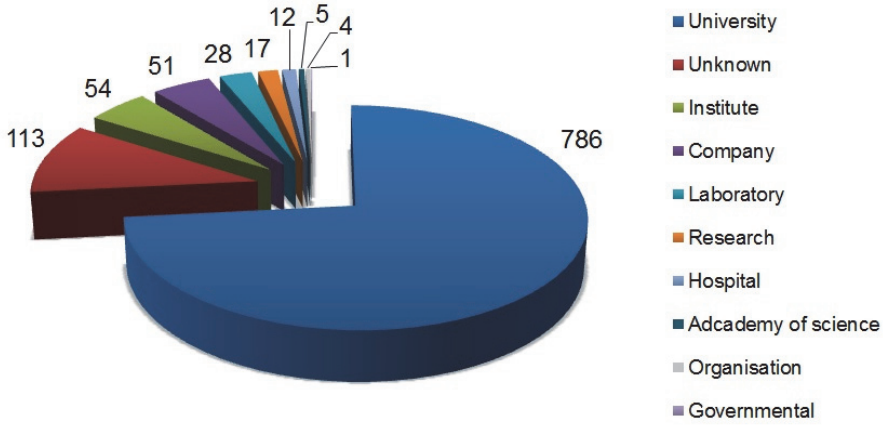



**Abbildung 13:** Organisationstypen im Netzwerk

Den größten Teil der Knoten im Netzwerk bilden Universitäten (mehr als 70 Prozent). Vor allem im Bereich der Werkstoff- und Verbundtechnik sind diese sehr aktiv. Die restlichen, knapp 30 Prozent, verteilen sich wie in Abbildung 16 dargestellt. Dies ist ein hoher Anteil an nicht-universitären Organisationen und lässt darauf schließen, dass das Thema 3D-Druck bereits in der Anwendung ist. Die Knoten des Netzwerks sind mit 1056 Kanten untereinander verbunden. Die Anzahl der Verbindungen innerhalb des Netzwerks ist geringer als die Knotenanzahl. Daraus kann geschlossen werden, dass ein Großteil der Organisationen im Netzwerk die Forschungsarbeiten autonom betreibt. Der Kontrast zum Netzwerk der Autoren, in dem die Kantenanzahl (391) deutlich über der Knotenanzahl (256) liegt, ergibt sich evtl. daraus, dass die im Netzwerk dargestellten Organisationen und deren Forscher innerhalb der Institution in Forschungs- oder Projektabteilungen kooperieren. Eine mögliche Interpretation wäre deshalb, dass Forschungsergebnisse selten an andere Organisationen weitergegeben werden, da diese einerseits häufig der strikten Geheimhaltung unterstehen und andererseits aus wirtschaftlicher Sicht eine Verschwendung von F&E-Aufwendungen bedeuten würden, da andere (konkurrierende) Unternehmen die Forschungsergebnisse ohne Aufwand erlangen würden. Bei wäre vor allem ein Joint Venture im Forschungsbereich denkbar, um die enormen Kosten für Forschung und Entwicklung zu senken und auf mehrere Organisationen zu verteilen. Betrachtet man das abgebildete Netzwerk in Abbildung 12**,** erkennt man, dass vor allem im Randbereich sehr viele verbindungslose Knoten angesiedelt sind. Im inneren Bereich sind aber auch einige komplexe Gruppierungen zu erkennen.

Die Organisationen mit den meisten Publikationen sind in Abbildung 14 dargestellt.

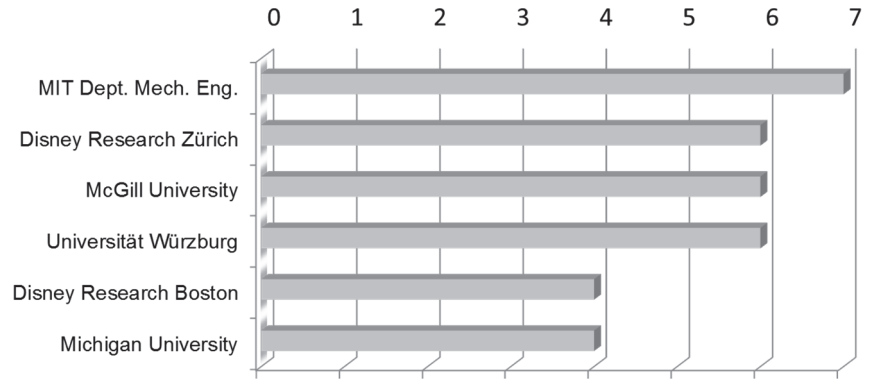



**Abbildung 14:** Organisationen mit den meisten Publikationen

### MIT Department of Mechanical Engineering

Die Organisation, die in den letzten Jahren die meisten Publikationen im Bereich des 3D-Drucks veröffentlicht hat, ist das Department of Mechanical Engineering des Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, USA (1000 Mitarbeiter). Die sieben publizierten Artikel setzten das Augenmerk im Bereich des 3D-Drucks besonders auf die Verwendung verschiedener Materialien und den damit verbundenen Resultaten bei der Modellierung. Herr Professor Dr. Emanuel Sachs ist an fünf der sieben Publikationen beteiligt. Er ist „Professor of Mechanical Engineering“ am MIT und forscht vorwiegend im Bereich der Solartechnik und im Bereich des Korrosionsverhaltens von metallischen Werkstoffen.[37]

[37] Vgl. MIT MechE (o. J.)

**Disney Research Zürich**

Die Organisation mit den zweitmeisten Publikationen im Bereich des 3D-Drucks ist die *Disney Research Zürich*, die in Zusammenarbeit mit The Walt Disney Company und der ETH Zürich auf den Gebieten Aufnahmetechnologien und Post-Produktion für die Filmindustrie über Animationstechniken für Filme und Computerspiele bis hin zu Sensortechnik und Wireless Networking forscht (ca. 100 Mitarbeiter). Die sechs publizierten Artikel befassen sich vorwiegend mit Themen der Modellierung und Designumsetzung mit Hilfe der 3D-Drucktechnologie sowie der virtuellen Modellierung und Zerlegung von Modellen, um diese im 3D-Druckverfahren zu realisieren.

**McGill University**

Die McGill University, Montreal, Kanada, ist ebenfalls mit sechs veröffentlichten Artikeln im Bereich des 3D-Drucks vertreten. Sie wurde 1821 gegründet und zählt sie zu den größeren Universitäten Kanadas (5500 Mitarbeiter). Die Forschungsschwerpunkte der sechs publizierten Artikel im Bereich des 3D-Drucks liegen, ähnlich wie bei Herr Prof. Dr. Gbureck, auf biokeramischen Zellträgern, die durch ein 3D-Druckverfahren mit geringer Temperatur hergestellt werden und die biologischen Veränderungen, welche während des 3D Powder Printing, einer speziellen Drucktechnik des 3D-Drucks, vorkommen können. Die ähnliche Schwerpunktsetzung ist begründet durch die Zusammenarbeit der McGill University mit der Universität Würzburg, an der Prof. Gbureck lehrt und forscht.

**Universität Würzburg**

Der Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe der Medizin und Zahnheilkunde (FMZ) der Universität Würzburg (4000 Mitarbeiter), die im Jahr 1582 gegründet wurde, ist an drei der sechs Veröffentlichungen der McGill University beteiligt. Die sechs publizierten Artikel befassen sich mit biokeramischen Zellträgern und -gerüsten, die durch ein 3D-Druckverfahren mit geringer Temperatur hergestellt werden. Der Forschungsschwerpunkt entspricht dem von Herrn Prof. Dr. Gbureck, der auch die Artikel der Universität Würzburg zu diesen Themen publiziert hat.

**Disney Research Boston**

Im Betrachtungszeitraum wurden vier Artikel von Disney Research Boston, USA, einem kleinen Forschungsbüro mit 13 Mitarbeitern, das im Jahr 2011 gegründet wurde, veröffentlicht.[38] Die Forschungsschwerpunkte des Instituts sind[39]: Materials Science, Data Mining und Artificial Intelligence. Die veröffentlichten Artikel befassen sich mit den gleichen Themen, wie die der Disney Research Zürich, nämlich der Modellierung und Designumsetzung mit Hilfe der 3D-Drucktechnologie und der virtuellen Modellierung und Zerlegung von Modellen, um diese im 3D-Druckverfahren zu realisieren.

**Michigan University**

Die Universität Michigan (7000 Mitarbeiter) forscht vor allem im Bereich der Auswirkungen und Einflüsse, welche Materialen und Produkte, die mittels 3D-Druck erstellt wurden und in den Körper eingesetzt wurden, auf diesen und dessen Regeneration haben. Die Forschungsergebnisse wurden in vier Publikationen, drei Artikeln und einem Proceeding Paper veröffentlicht.

[38] Vgl. Disney Research - Science at Play (2012)
[39] Vgl. Disney Research - Science at Play (2012a)

Wertet man das Netzwerk nach Co-Autoren, im Fall der Organisationen auch als kooperative Forschung bzw. Publikation bezeichnet, aus, so kristallisieren sich sieben Organisationen heraus (Abbildung 15). Mit 13 Co-Autorenschaften haben das Department of Mechanical Engineering des MIT und die McGill University die meisten im Bereich des 3D-Drucks. Gefolgt werden diese von der Michigan University mit 12 Co-Autorenschaften, Disney Research Zürich, dem Department of Material Science and Engineering des MIT und der Bond University (Robina, Australien). Letztere wurde 1987 gegründet und bildet rund 5.500 eingeschriebene Studenten aus. Darauf folgt die University of Nottingham, die 1881 gegründet wurde und etwa 34.000 Studenten ausbildet und 9.000 Mitarbeiter beschäftigt, mit jeweils zehn Co-Autorenschaften.

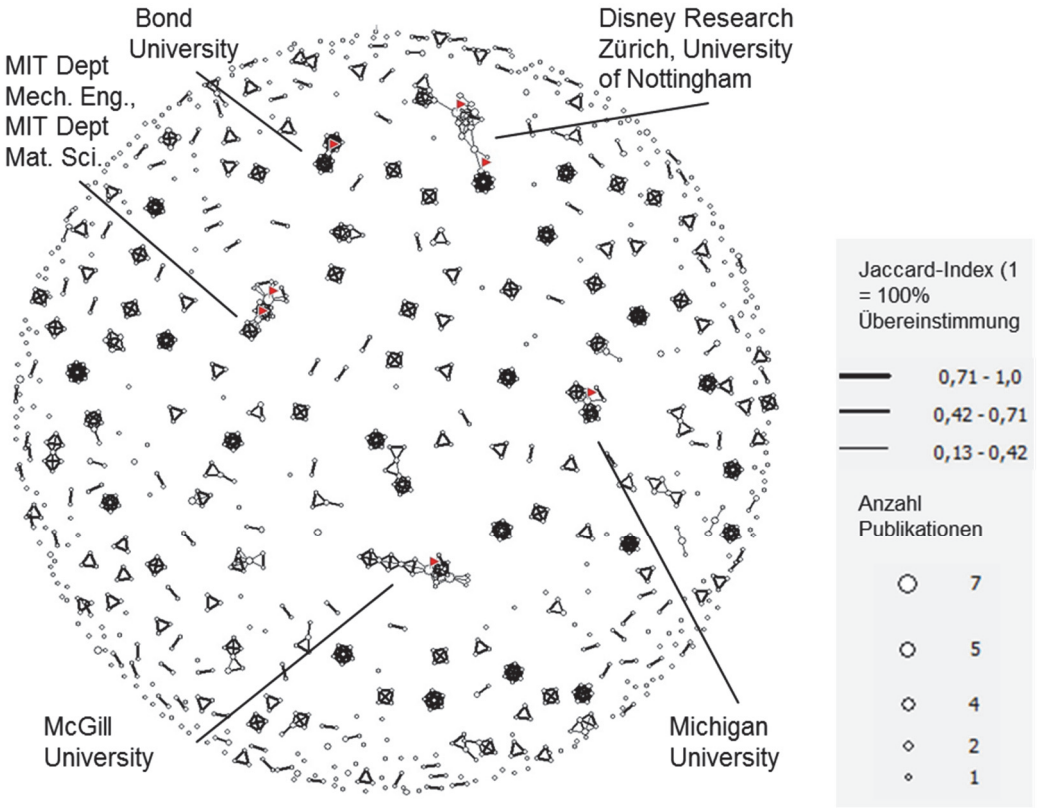



**Abbildung 15:** Die sieben größten Co-Autoren

Die folgenden Abbildungen zeigen einen Ausschnitt aus dem Organisationsnetzwerk. Es sind die Subnetzwerke der Organisationen mit der höchsten Zentralität dargestellt. Ziel ist es, die jeweiligen Organisationsgruppierungen detailliert betrachten zu können.

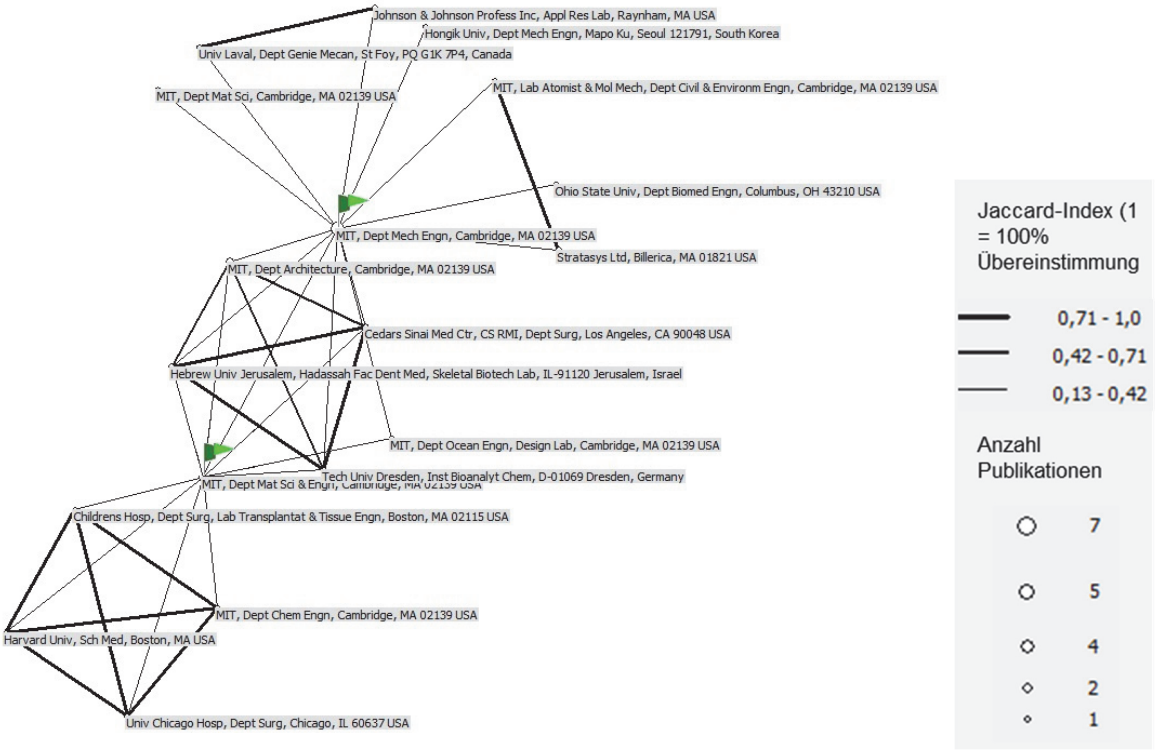



**Abbildung 16:** Komponente MIT Department of Mechanical Engineering und MIT Department of Mathematical Sciences

In Abbildung 16 ist die Komponente der beiden MIT Departments Mechanical Engineering und Material Science & Engineering dargestellt. Sie besteht aus 18 Knoten und 34 Kanten. In der Grafik zeigt sich, dass beide Departments als Bindeglieder zwischen verschiedenen Gruppierungen dienen. Das Department of Mechanical Engineering verbindet die Ausläufer des Subnetzwerks (University of Laval, Hongkong University,…) mit der Gruppierung um die Hebrew University, Jerusalem, die Technische Universität Dresden, das Cedars Sinai Medical Center, Los Angeles und die MIT Departments of Architecture, Ocean Engineering and Design Lab. Diese Gruppierung wird durch das Department of Material Science and Engineering mit einer weiteren Gruppierung verbunden, die das Childrens Hospital (Dept. Surgery, Laboratory of Transplantat and Tissue Engineering), die Harvard University, die University of Chicago (Dept. Surgery) und das Department of Chemical Engineering des MIT enthält.

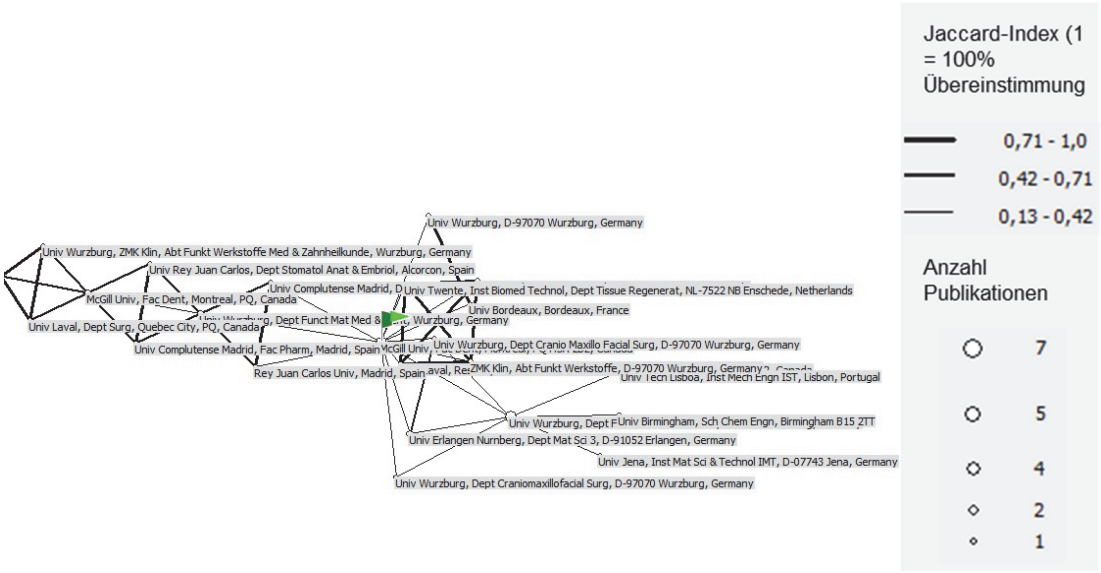



**Abbildung 17:** Komponente McGill University

Das Subnetzwerk der McGill University (Abbildung 17) beinhaltet 23 Organisationen, die durch 42 Kanten miteinander verbunden sind. Es lässt sich erkennen, dass die McGill University ebenfalls eine Bindegliedfunktion erfüllt. Allerdings in diesem Fall zwischen einer Organisationsgruppierung um die Universität Würzburg, die Universität Twente, Niederlande, die Universität Erlangen, die Universität Bordeaux und die Universität Laval und einer Verkettung von drei viergliedrigen Gruppierungen.

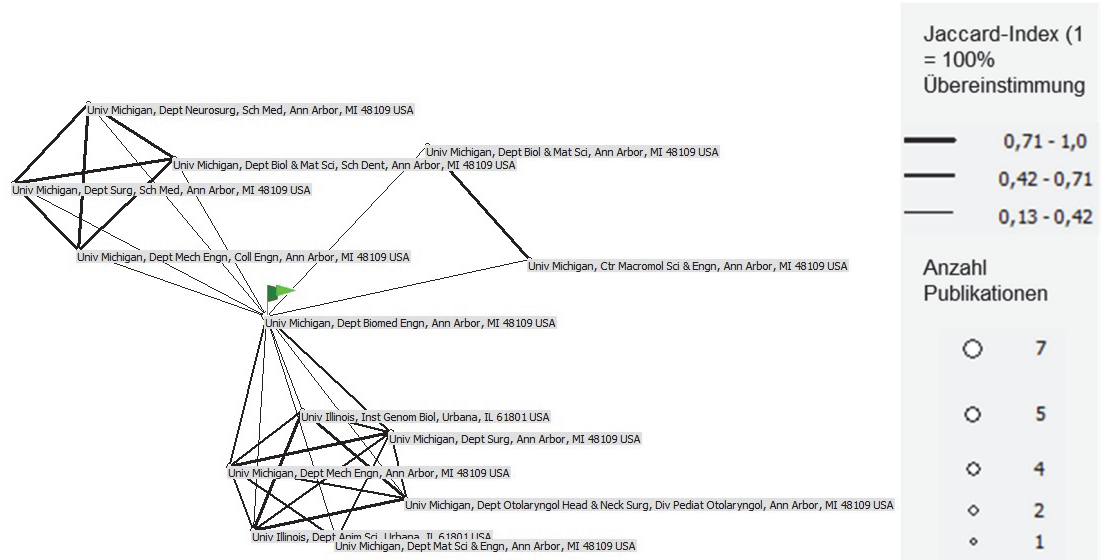



**Abbildung 18:** Komponente Michigan University

Das in der oben dargestellten Abbildung 18 illustrierte Subnetzwerk der Michigan University (Department Biomedical Engineering) besteht aus 13 Knoten und 29 Kanten und zeigt die Bindegliedfunktion der Universität. Sie verbindet zwei Gruppierungen miteinander. Die oben links dargestellte Gruppierung besteht ausschließlich aus verschiedenen Departments der Michigan University (Neurosurgery, Surgery, Biological and Material Science, Mechanical Engineering und Macromol Science and Engineering), während die im unteren Teil der Abbildung dargestellte Gruppe aus den Departments Genomic Biologic und Animal Science der University of Illinois und vier Departments der Michigan University

(Surgery, Mechanical Engineering, Otolaryngol Head and Neck Surgery und Material Science and Engineering) besteht.

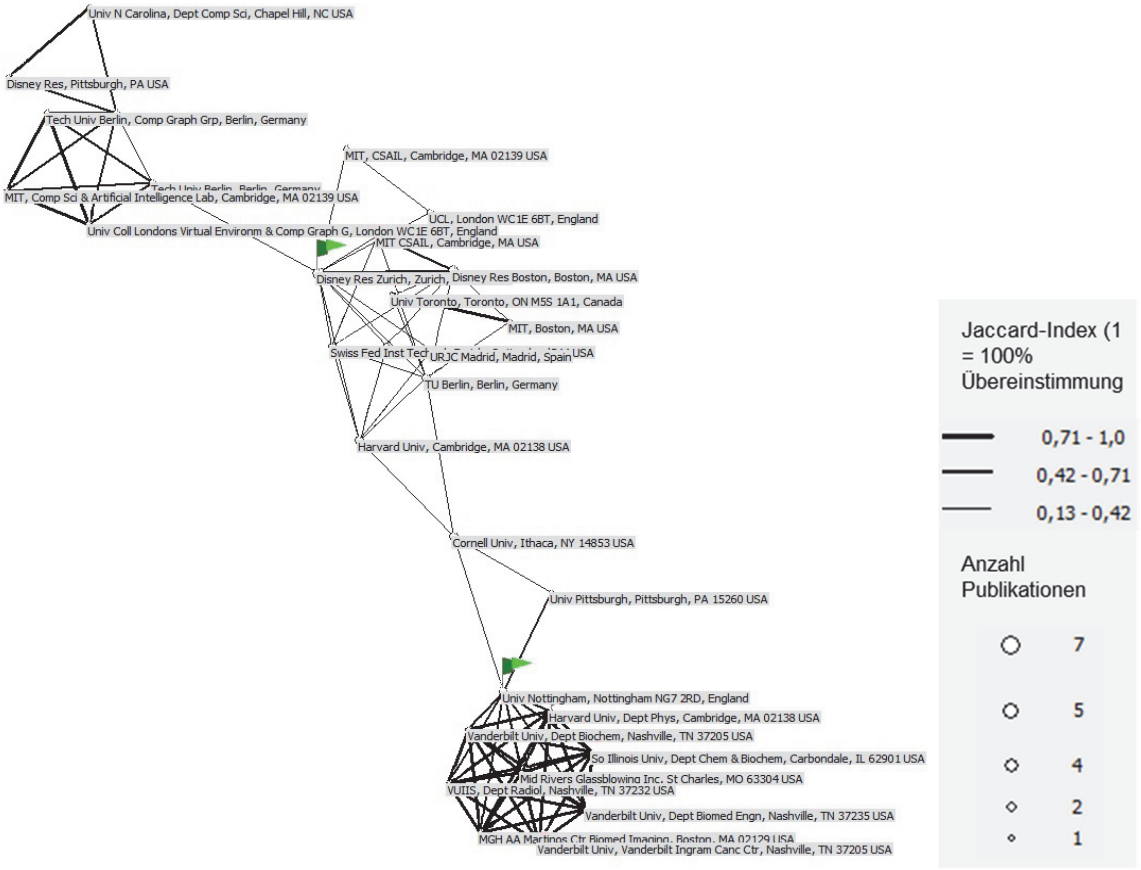



**Abbildung 19:** Komponente Disney Research Zürich und University of Nottingham

Die Komponente der Disney Research Zürich und der University of Nottingham (Abbildung 19) besteht aus 27 Knoten und 81 Kanten. Vor allem die Gruppierung ganz unten im Bild, die durch die University of Nottingham mit der University of Pittsburgh und der Cornell University verbunden wird, weist eine Vielzahl von Kanten (34) auf. Die Knoten dieser Gruppierung sind die University of Illinois, die Harvard University, vier Departments der Vanderbilt University, Nashville, die Mid River Glassblowing Inc. und die MGH Martinos Center, Boston. Disney Research Zürich verbindet zwei Gruppierungen miteinander. Einerseits die Gruppierung, bestehend aus der Technischen Universität Berlin, dem University College London, dem Department of Computer Science und Artificial Intelligence des MIT, Disney Research Pittsburgh und der University of North Carolina. Die zweite Gruppierung besteht aus den Knoten Harvard University, Technische Universität Berlin, MIT Boston, Disney Research Boston, MIT CSAIL, UCL (University College London), Swiss Federal Institute of Technology und URJC (Universidad Rey Juan Carlos) Madrid.

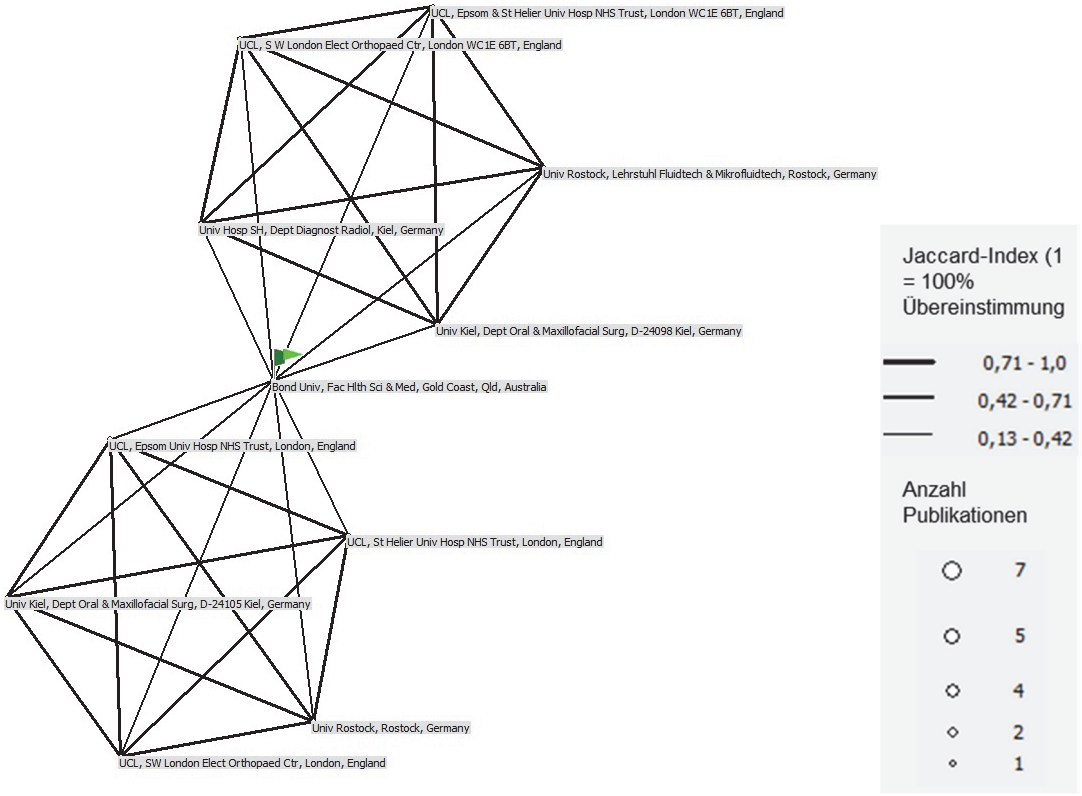



**Abbildung 20:**Komponente Bond University

Die in Abbildung 20 dargestellte Komponente besteht aus zwei Gruppierungen, die durch den Knoten der Bond University miteinander verbunden sind. Die obere Gruppierung hat sechs Knoten (inklusive Bond University) und 15 Kanten. Organisationen der oberen Gruppierung sind beispielsweise die Universität Rostock, das UCL und die Universitätsklink Kiel. Verbunden ist diese Gruppierung durch die Bond University mit der im unteren Bildbereich dargestellten Gruppe, die sich aus den identischen Organisationen zusammensetzt.

Die Analyse der Netzwerkkomponenten zeigt, dass eine rege Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Forschungsorganisationen existiert. Außerdem agieren einzelne Organisationen, meist große Universitäten, als Bindeglied zwischen verschiedenen Subkomponenten. Über solche Forschungseinrichtungen kann ein globales Netzwerk von Organisationen unterschiedlicher Länder entstehen. Die oben beschriebenen Organisationen tragen durch ihre starke Vernetzung dazu bei, die wissenschaftliche Forschung ihrer Themengebiete über die Organisationsgrenzen hinweg voranzutreiben.

## 4.3 Wissensbasen

**Zusammenfassung**

Wissensbasen der Forschung sind medizinische Anwendungsbereiche wie der Druck von Knochenimplantaten (Bone Tissue Engineering) und dazu geeignete Materialien sowie die Verbesserung der Druckauflösung für qualitativ bessere Druckergebnisse.

Ziel der Ermittlung von Wissensbasen ist es, herauszufinden welche Themen und Publikationen Grundlage des heutigen Forschungsstandes sind. Durch zusammenhängende Zitationen (Co-Zitation), die in mehreren Artikeln vorkommen, kann eine thematische Verbindung der zitierten Artikel festgestellt werden. Die Vernetzung der zitierten Artikel wird dann Wissensbasis genannt. Die Anzahl der Referenzen wird *Dimension der Wissensbasis* genannt. Zur Ermittlung der Wissensbasen werden die Referenzen der Artikel des Themengebiets untersucht.

### 4.3.1 Entwicklung der Wissensbasen

Im Folgenden werden die sechs Wissensbasen mit den meisten Referenzen vorgestellt. Die Namen der Wissensbasen stellen das Thema dar, welches die zugehörigen Artikel verbindet, und wurden aus den Inhaltsangaben der wichtigsten Artikel entnommen (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt den Graph der Co-Zitationen. Den abgegrenzten Wissensbasen wurden Nummern entsprechend ihrem Rang der Anzahl der Referenzen zugeteilt. Die Anzahl der Co-Zitationen pro Fläche ist farblich durch die „Wärmekarte“ dargestellt.

| Name der Wissensbasis | Anzahl der Referenzen | Nr. |
|---|---|---|
| Bioprinting and Tissue Engineering | 106 | 1 |
| Bone Tissue Engineering | 42 | 2 |
| Porous Ceramic Scaffolds | 41 | 3 |
| Improvement of print quality | 25 | 4 |
| Materials for bone tissue engineering | 21 | 5 |
| High technology and barriers to innovation | 19 | 6 |

**Tabelle 1:** Wissensbasen

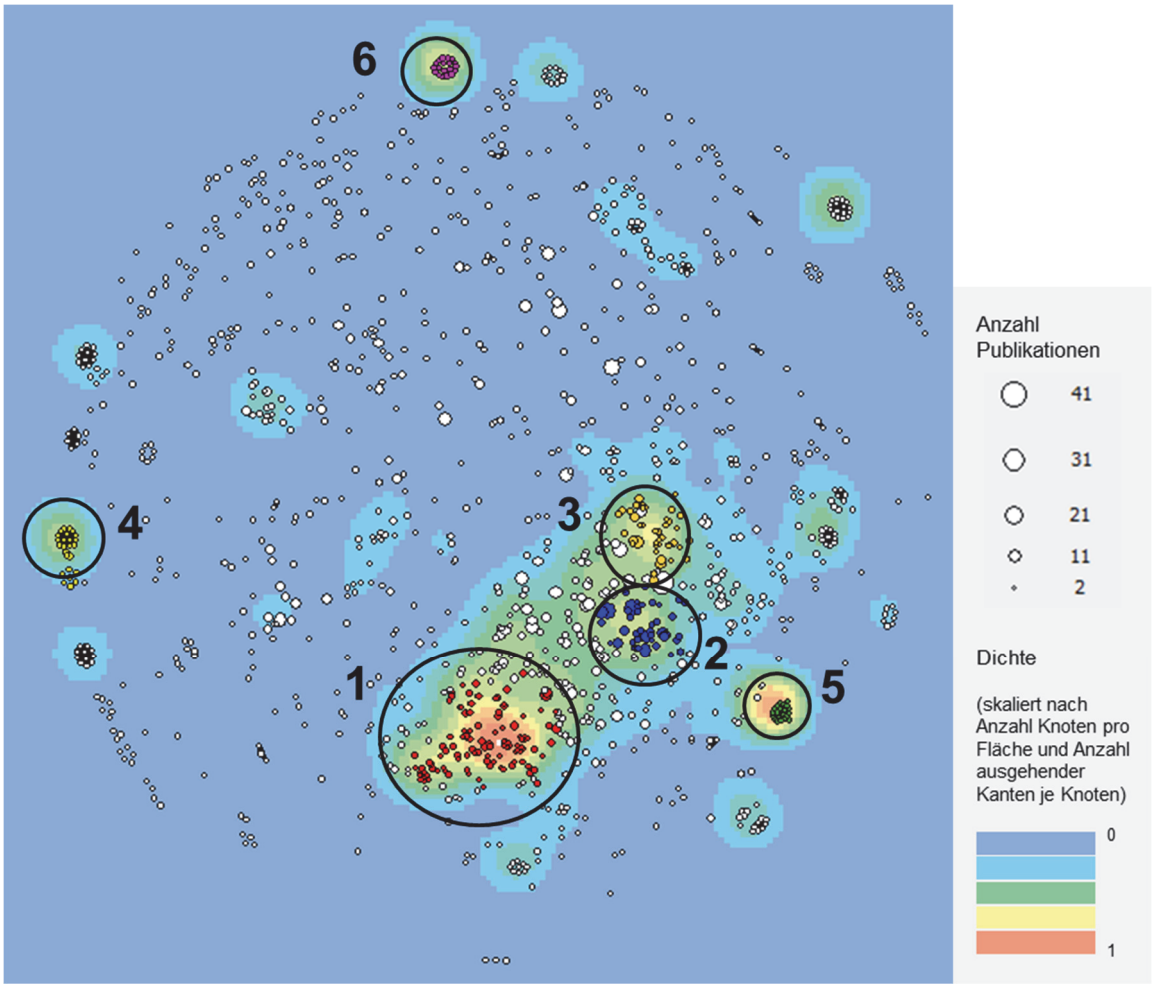



**Abbildung 21:** Wissensbasen – 2D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von ko-zitierten Referenzen

### 4.3.2 Inhalte der Wissensbasen

Im Folgenden wird eine inhaltliche Übersicht über die verschiedenen Themen der Wissensbasen gegeben.

#### 4.3.2.1 Bioprinting and Tissue Engineering

Neben dem Druck von Kunststoffen oder ähnlichen Materialien ist es möglich auch organische Materialien dreidimensional herzustellen. Dazu werden einem Patienten zuerst Zellen entnommen und anschließend vermehrt. Die Zellen werden hierfür gesammelt und auf einer Schicht Hydrogel verteilt. Durch neue Hydrogel-Schichten können die Zellen gestapelt werden, die sich anschließend zu einer dreidimensionalen Form verbinden. So können organische Materialien mittels Gerüstbau hergestellt werden.[40]

#### 4.3.2.2 Bone Tissue Engineering / Porous Ceramic Scaffolds

Durch die Herstellung von Knochengewebe aus Biomaterialien können Knochenimplantate eingesetzt werden, die ‚verglichen mit beispielsweise künstlichen Keramikgelenken, nicht nur die mechanische Eigenschaft des Knochens wiederherstellen sollen, sondern zur Wiederherstellung von natürlichem

[40] Vgl. Genetic Engineering & Biotechnology News (2014)

Knochengewebe beitragen. Dazu werden poröse Materialien verwendet, die Zellaktivität und Proteinproduktion erlauben und als Gerüst für neu generiertes Knochengewebe dienen. Somit können Beschädigungen am Knochen repariert werden, die zu groß für eine natürliche Heilung sind.[41]

#### 4.3.2.3 Improvement of print quality

Die Qualität des gedruckten dreidimensionalen Objektes hängt neben den verwendeten Materialien und den physikalischen Eigenschaften auch von der Auflösung des Drucks ab. Betrachtungsgegenstand ist unter Anderem der Diffusor des Druckgeräts, der typischerweise Flecken generiert. Diese können durch bandbegrenzte oder sich bewegende Diffusoren reduziert werden.

#### 4.3.2.4 Materials for bone tissue engineering

Für die Herstellung von Knochennachbildungen werden unterschiedlichste Materialien eingesetzt, um die Eigenschaften und Funktionen der verschiedenen Knochenbestandteile nachzuahmen. Geforscht wird nicht nur nach Materialien, die als Implantate anstelle von echtem Knochengewebe eingesetzt werden. Auch „bioaktive" Materialien, die sich mit dem umgebenden Gewebe verbinden und zur Bildung von neuem natürlichem Gewebe beitragen, sind Gegenstand aktueller Forschung.[42] Für die Nachbildung von Knochen gibt es mittlerweile viele unterschiedliche Materialien, die aufgrund ihrer mineralischen Ähnlichkeit zum Knochengewebe für ein Implantat in Frage kommen.[43]

#### 4.3.2.5 High technology and barriers to innovation

Bei der letzten Forschungsfront ist der Artikel *High technology and barriers to innovation: From globalization to relocalization* von Milan Zeleny (2012) maßgeblich für das Thema entscheidend. Es ist die einzige Forschungsfront, die einen wirtschaftswissenschaftlichen Hintergrund hat. Betrachtet werden Innovationsbarrieren, die dadurch entstehen, dass Know-how und Innovationen begrenzten Personenkreisen oder Institutionen unterstehen, und Technologien, die diese Barrieren überwinden.[44]

[41] Vgl. Bose et al. (2013)
[42] Vgl. Stevens (2008)
[43] Vgl. ebd.
[44] Vgl. Zeleny (2012)

## 4.4 Forschungsfronten

**Zusammenfassung**

Wie schon bei den Wissensbasen zählt die Konstruktion von künstlichem Knochengewebe zu den emergenten Forschungsthemen. Die weiteren Forschungsgebiete fokussieren sich jedoch nicht auf konkrete Anwendungsbereiche. Bei diesen Forschungsfronten stehen die Technologie und der Druckprozess im Vordergrund.

Mit Hilfe der Suche nach Forschungsfronten kann ermittelt werden, welches die bedeutendsten Forschungsschwerpunkte im Bereich des 3D-Drucks sind, wenn viele Publikationen das gleiche Thema behandeln. Hierzu wird die Datenbasis mit Hilfe der Bibliometrie-Software BibTechMon nach diesen Forschungsschwerpunkten, den sogenannten *Reasearch Fronts* oder *Forschungsfronten* untersucht. Das Zusammenfassen mehrerer Artikel zu einer Forschungsfront ist ähnlich dem Verfahren zur Bestimmung von Wissensbasen. Unterschied ist jedoch, dass nicht die zusammenhängenden Referenzen in einem Artikel verbunden werden, sondern dass die Artikel selber vernetzt werden, wenn sie gemeinsame Referenzen aufweisen. Die Vernetzung der Artikel stellt eine inhaltliche Ähnlichkeit dar. Die Dimension der Forschungsfront wird durch die Anzahl der enthaltenen Artikel bestimmt.

### 4.4.1 Forschungsfronten im 3D Printing

Im Folgenden werden die sechs größten Forschungsfronten (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) und deren grafische Darstellung (Abbildung 22) betrachtet.

| Name der Forschungsfront | Anzahl der Artikel | Nr. |
|---|---|---|
| Bone Tissue Engineering | 22 | 1 |
| Three-dimensional printing process | 12 | 2 |
| Direct Ink Writing | 11 | 3 |
| Rapid Prototyping | 9 | 4 |
| Rapid Prototyping and Tooling Technologies | 4 | 5 |
| Synthetic biodegradable scaffold materials | 4 | 6 |

**Tabelle 2:** Forschungsfronten

Die Forschungsfronten wurden analog zu den Wissensbasen thematisch benannt und sind inhaltlich identisch. Die Forschungsfront mit der größten Dimension widmet sich dem Thema *Bone Tissue Engineering*, welches im vorherigen Kapitel (4.3.2.2) erläutert wurde. Auch die zuletzt aufgeführte Forschungsfront *Synthetic biodegradable scaffold materials* hat einen medizinischen Hintergrund. Der Untersuchungsgegenstand der Artikel ist vergleichbar mit der Wissensbasis *Porous Ceramic Scaffolds*. Schwerpunkt sind verschiedene Materialien, mit denen jedoch nicht nur Knochengewebe, sondern auch Organe bzw. organische Materialien, die in dreidimensionaler Form hergestellt werden können. Die restlichen Forschungsfronten sind nur schwer voneinander abzugrenzen. Das liegt zum einen daran, dass für die Benennung einzelne Artikel ausschlaggebend sind, die jedoch subjektiv ausgewählt

wurden. Zum anderen ist es schwer, einen ökonomischen oder medizinischen Kontext zu unterscheiden, da auch medizinische Artikel Referenzen benutzen, die etwa rein technologischer Art sind. Größte Schwierigkeit ist jedoch die unklare Namensgebung der Publikationstitel. Beispielsweise wird in der Forschungsfront *Direct Ink Writing* der Begriff zwar konsistent benutzt, ein abgegrenztes Thema kann jedoch nicht identifiziert werden. Dies liegt vor allem daran, dass der 3D-Druck als Unterkategorie des Direct Ink Writings bezogen auf eine bestimmte Drucktechnik aufgefasst werden kann. Direkt Ink Writing stellt nur den Überbegriff für verschiedene Techniken dar, bei denen dreidimensionale Modelle anhand von Computermodellen erstellt werden.[45] Im Sprachgebrauch haben sich jedoch die Begriffe *3D-Druck* oder auch *Rapid Prototyping* ebenfalls als Überbegriffe durchgesetzt.

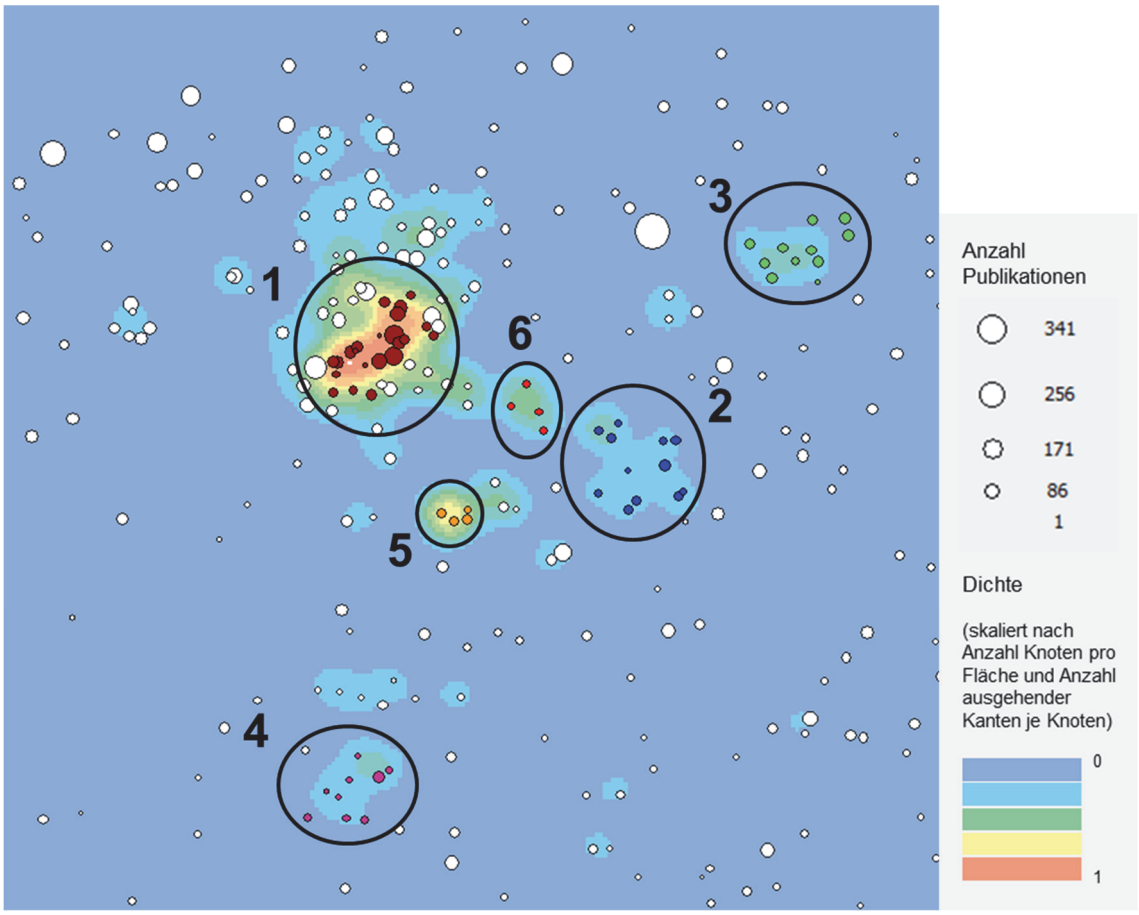



**Abbildung 22:** Forschungsfronten – 2D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von bibliographisch gekoppelten Publikationen

In Abbildung 22 sind die Netzwerke der gekoppelten Publikationen zu sehen. Die Dichte der Publikationen, also Anzahl der Publikationen je Flächeneinheit, ist wieder farblich gekennzeichnet. Um die Dichte der einzelnen Forschungsfronten besser vergleichen zu können, wird diese dreidimensional dargestellt. Somit entsteht eine Gebirgslandschaft der gekoppelten Publikationen (Abbildung 23). Je höher eine Forschungsfront in dieser Grafik ist, desto mehr Artikel enthält sie demzufolge.

[45] Vgl. Lewis und Gratson (2004)

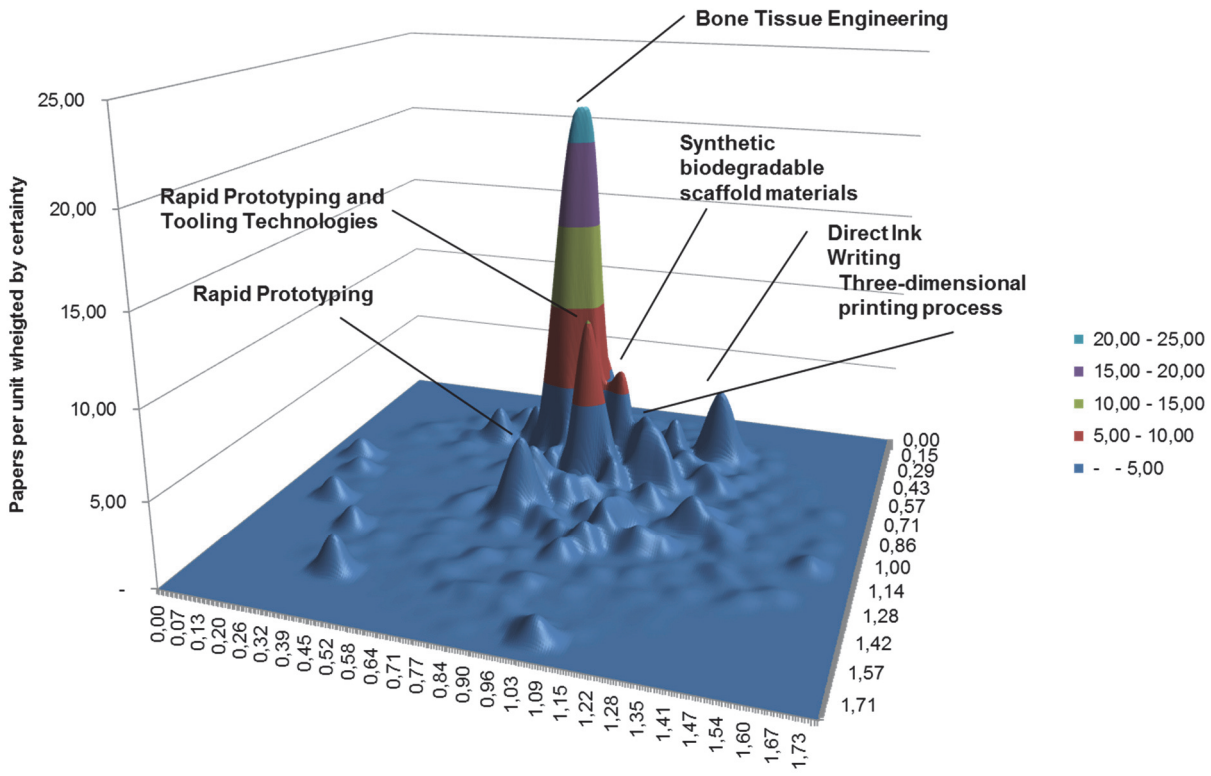



**Abbildung 23:** Forschungsfronten – 3D Darstellung der lokalen Dichteverteilung von bibliographisch gekoppelten Publikationen

Wie auch bei den Wissensbasen dominiert die medizinische Forschung zum Druck von Knochengerüsten und stellt mit weitem Abstand die größte Forschungsfront dar. Artikel mit allgemeineren Anwendungsbereichen sind jedoch schon an zweiter Stelle. Auch bei den restlichen Forschungsfronten ist nur die Forschungsfront *Synthetic biodegradable scaffold* materials einem eindeutigen medizinischen Kontext zuzuordnen.

## 4.5 Forschungsportfolio

**Zusammenfassung**

Das Forschungsthema *Bone Tissue Engineering* sowie die Verbesserung der Drucktechnologie und des Druckprozesses verzeichnen die größten Wachstumsraten bei der Publikationsanzahl. Insgesamt stellen Publikationen aus medizinischen Anwendungsbereichen den Großteil der aktuellen Publikationen und befinden sich vor dem Transfer in die Praxis.

Um die aktuelle Bedeutung und zeitliche Entwicklung der Forschungsfronten beurteilen zu können, werden diese in ein Forschungsportfolio eingetragen, das an das Marktanteils-Marktwachstums-Portfolio der Boston Consulting Group angelehnt ist. Hierfür werden zuerst die Publikationen je Forschungsfront zeitlich eingeordnet und zwei Zeiträume (Perioden) gebildet (Abbildung 24). In diesem Fall sind das die Zeiträume 2008-2010 (Periode 1) und 2011-2013 (Periode 2).

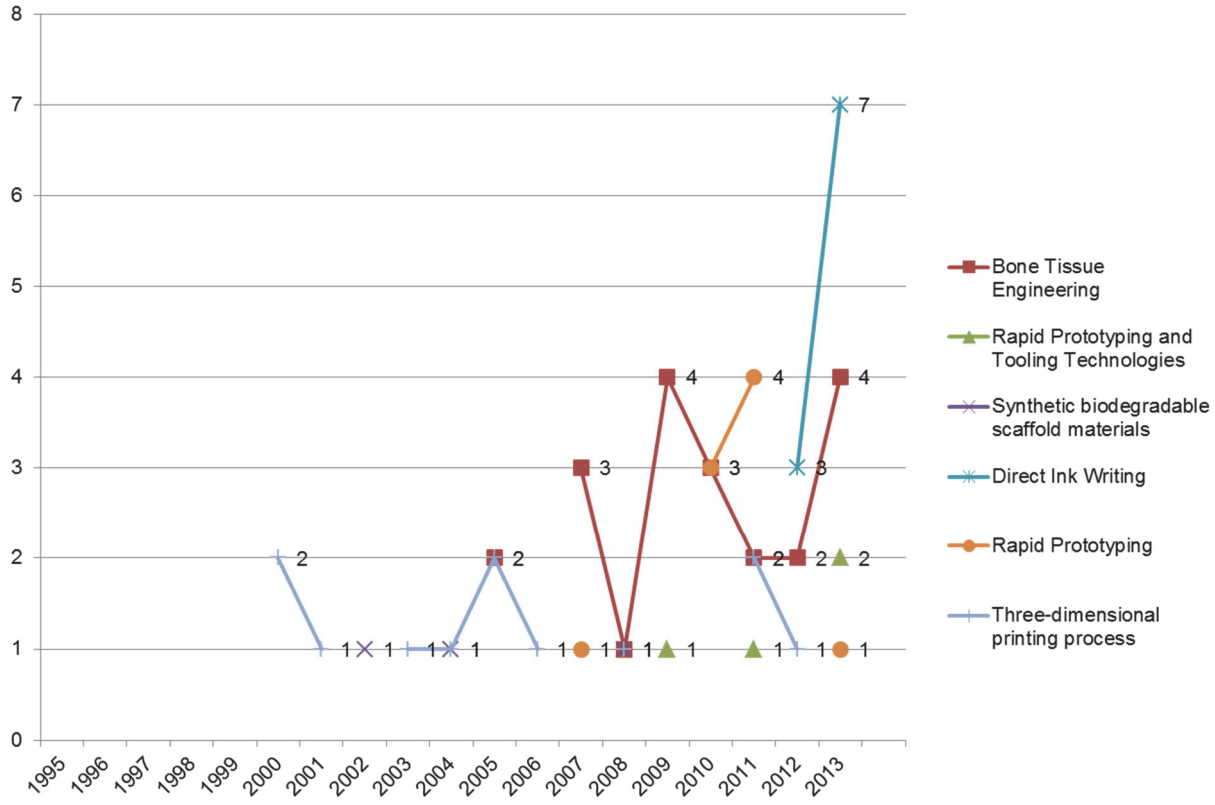



**Abbildung 24:** Zeitliche Einordnung der Publikationen je Forschungsfront

Die X-Achse des Forschungsportfolios stellt die prozentualen Anteile der Forschungsfronten zur Gesamtzahl der Publikationen in Periode 2 dar, die Y-Achse die Anteilsänderung über beide Perioden, also:

$$\frac{(Publikationen\ in\ Periode\ 2 - Publikationen\ in\ Periode\ 1)}{Publikationen\ in\ Periode\ 1}$$

Die Kreisgröße gibt die Anzahl der Publikationen über den Gesamtzeitraum (alle Publikationen bis 2014) an (Abbildung 25).

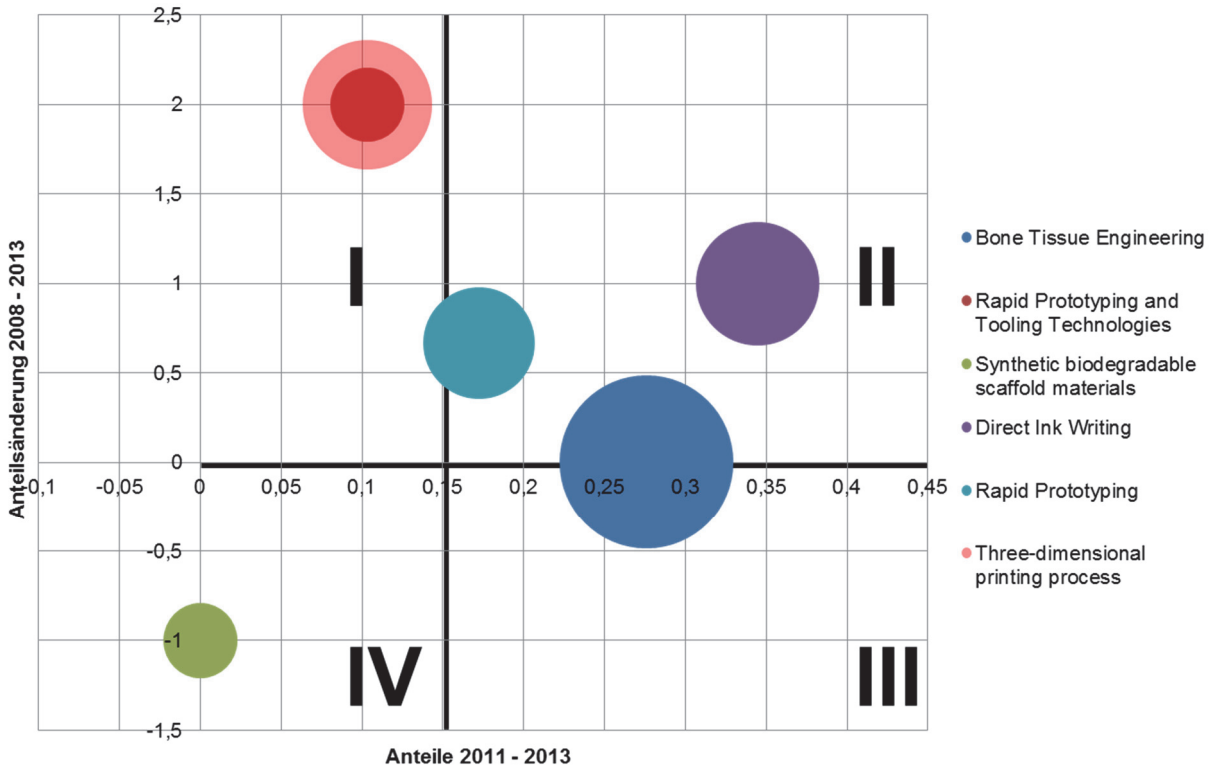



**Abbildung 25:** Portfolio der Forschungsaktivitäten in den Forschungsfronten

Das Portfolio wird nun in vier Quadranten aufgeteilt:

I. Question Marks
II. Stars
III. Cash Cows
IV. Poor Dogs.

Die Forschungsfronten *Rapid Prototyping and Tooling Technologies* und *Three-dimensional printing process* liegen im ersten Quadranten. Die Forschungsthemen dieses Quadranten sind relativ jung, aber mit hohem Wachstum. Typischerweise sind es Themen mit ungewisser Zukunft. Die betrachteten Publikationen sind erst in den letzten Jahren entstanden, obwohl die behandelten Themen anhand ihres Namens nicht als neu bezeichnet werden können. Grund hierfür ist, dass die Publikationen bei der Namensgebung Themenblöcken zugeordnet wurden, die für alle Publikationen der Gruppe zutreffend sein sollten. So sind innerhalb bekannter Themen neue Forschungserkenntnisse entstanden, deren zukünftiges Potential noch fraglich ist.

Im zweiten Quadranten befinden sich Forschungsthemen mit hoher Aufmerksamkeit und Erkenntnisfortschritt. Die Einordnung der Forschungsfront *Direct Ink Writing* mit Fokus auf neuen Drucktechniken ist deshalb durchaus plausibel, da bisherige Drucktechniken noch deutliches Verbesserungspotential aufweisen. Gleiches gilt für das Forschungsthema *Rapid Prototyping*.

*Bone Tissue Engineering* befindet sich beim Übergang vom zweiten zum dritten Quadranten. Cash Cows haben einen großen Anteil an den gesamten Publikationen, typischerweise mit rückläufigem Publikationswachstum. Für die Forschungsfront *Rapid Prototyping* kann hier keine Aussage gemacht werden, die behandelten Themen sind zu unklar abgegrenzt. Die Forschung zu 3D-gedruckten Knochenimplantaten genießt schon seit mehreren Jahren ein hohes Forschungsinteresse. Die medizinische

Forschung unterliegt jedoch anderen Zeiträumen. Eine praktische Umsetzung von Forschungsergebnissen dauert länger verglichen mit anderen Wissenschaftsbereichen, da sich auch ausgereifte Technologien umfangreichen Tests unterziehen müssen. Damit ist der Cash Cow-Status in der Realität noch nicht erreicht, verglichen mit den anderen Themen aber durchaus zutreffend.

Die Forschungsfront *Synthetic biodegradable scaffold materials* befindet sich im vierten Quadranten. Dieser beinhaltet typischerweise Forschungsthemen mit rückläufiger Bedeutung. Für Unternehmen sind diese Forschungsthemen besonders attraktiv, da die Ergebnisse möglicherweise schon für eine wirtschaftliche Nutzung geeignet sind bzw. schon ausgereifte Lösungen existieren. Die Forschung an 3D-Druckmaterialien für medizinische Zwecke kann sicherlich als ausgereift bezeichnet werden, es muss jedoch angenommen werden, dass der Schritt zur Anwendungsreife im medizinischen Bereich länger dauert, da bereits bei Einführung hohe Standards erfüllt sein müssen.

## 4.6 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der deskriptiven Analyse, der Netzwerkanalyse sowie der Wissensbasen und Forschungsfronten zeigen, dass der 3D-Druck in unterschiedlichen Forschungsdisziplinen behandelt wird, sich die Technologie für den Einsatz in vielfältigen Anwendungsgebieten eignet und ein steigendes Forschungsinteresse besteht. Auffallend ist jedoch der hohe Anteil an Publikationen aus der medizinischen Forschung bzw. die hohe Forschungsaktivität medizinischer Forschungsinstitutionen in diesem Themengebiet. Eine Erklärung hierfür könnte zum einen die Tatsache sein, dass der3D-Druck besonders im Bereich der Orthopädie für den medizinischen Fortschritt großes Potential bietet und für diesen Bereich besonders interessant ist, zum anderen, dass ein Großteil der Forschung zur 3D-Drucktechnologie in Unternehmen stattfindet und nicht publiziert wird.

Im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung des 3D-Drucks und die folgende Szenarioanalyse lässt sich deshalb festhalten, dass im Bereich des 3D-Drucks bereits sehr ausgereifte Lösungen existieren und trotzdem das Potential besonders in der industriellen Anwendung bei weitem nicht ausgeschöpft ist.

Im nächsten Kapitel werden auf dieser Basis potentielle Entwicklungen (Szenarien) des 3D-Drucks im Umfeld der produzierenden Industrie untersucht sowie robuste Technologien und Maßnahmen abgeleitet.

# 5 Szenarien für 3D Printing

Die Szenariotechnik wird im folgenden Abschnitt dazu verwendet, Erfolgspotentiale und Risiken für die Zukunft von produzierenden Unternehmen zu prognostizieren. Die Entwicklungsmöglichkeiten der Unternehmen werden detailliert im Rahmen mehrerer Szenarien aufgezeigt. Aus den Zukunftsbildern werden in Kapitel 6 strategische Maßnahmen für ein typisches produzierendes Unternehmen abgeleitet. Die Handlungsoptionen sollen dabei helfen, das Geschäftsmodell, vornehmlich für Industrieunternehmen, zukunftsträchtig für jedwedes Szenario zu rüsten und somit nachhaltig zu gestalten. Im Sinne der Technologievorausschau bedeutet dies, dass zur Ableitung strategischer Maßnahmen im Vorfeld emergente Technologien abgeleitet werden und deren Entwicklungspotential in den einzelnen Szenarien bewertet wird (robuste Technologien).

Im weiteren Verlauf folgt die Durchführung der Szenariotechnik im Kontext der Technologievorausschau und in Kombination mit der Bibliometrie dem Ablauf nach Stelzer et al. (2015)[46].

## 5.1 Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes

**Zusammenfassung**

Die Anwendung des 3D-Drucks als Ersatz für konventionelle Fertigungsmethoden ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt besonders für Kleinserien und hochgradig individualisierte Einzelstücke interessant. Fehlende Skalenerträge verhindern eine erfolgreiche Implementierung in der Massenproduktion. Die Anwendungsbereiche sind zahlreich. Dies wird durch den Einsatz verschiedenster Materialien ermöglicht. Die Erforschung neuer Druckmaterialien und ein steigender Automatisierungsgrad sind für eine nachhaltigere Produktion besonders bedeutsam. Der 3D-Druck bietet das Potential, traditionelle Marktleistungen und Produktionsformen zu ersetzen und den Trend für individualisierte Produkte voranzutreiben.

Ziel dieses Schrittes ist, die Analyse und Definition des Betrachtungsgegenstandes - der 3D-Druck im Umfeld der produzierenden Industrie. Ausgangspunkt ist eine kurze Charakterisierung der Ist-Situation. Die Beschreibung des Betrachtungsgegenstandes geschieht in Form eines semantischen Netzes. Dieses entsteht aus der Analyse von Makro- und Mikro-Umwelt eines Unternehmens der produzierenden Industrie und besteht aus den wichtigsten Akteuren, Produktionsfaktoren und weiteren Einflussgrößen sowie deren Beziehungen. Mit dem semantischen Netz ist ein Rahmen für die Vorausschau geschaffen.

### 5.1.1 Gegenwärtige Situation und erste Prognose

Der Trend zur Digitalisierung der Industrie verspricht mit Blick auf die zukünftigen industriellen Prozesse eine kostengünstigere Produktion von Kleinserien, größeres Individualisierungspotenzial, geringeren Ressourcenverbrauch, neue Arbeitsprozesse sowie den erhöhten Einsatz von Robotern.[47] Die

[46] Vgl. Stelzer et al. (2015).
[47] Vgl. The Economist (2012)

wichtigsten Erwartungen an die Fabrik der Zukunft sind demnach Flexibilität und Effizienz. Unter Berücksichtigung der tatsächlich vorhandenen Einschränkungen des 3D-Drucks, wie zum Beispiel der langen Druckdauer, der aufwendigen Gestaltung von reproduzierbaren 3D-Vorlagen und der begrenzten Materialauswahl, ist aktuell die weit verbreitete Ansicht, dass der 3D-Druck eher für diese Kleinserien und hochgradig individualisierten Einzelstücke interessant ist. Die fehlenden Skaleneffekte bei Großserien oder Massenproduktion bieten gerade für kleine und mittelständische Unternehmen Wettbewerbspotentiale.[48] Des Weiteren stellen wissenschaftliche Ansätze aufgrund von Kosten und Fertigungsdauer eine Tauglichkeit für die Massenproduktion im Moment eindeutig in Frage. Nur bleibt es abzuwarten, vergleicht man die Entwicklung der 3D-Drucktechnik mit der Entwicklung der normalen Drucktechnik, ob das so bleibt.[49] Mit Hinblick auf die prognostizierte Entwicklung der 3D-Druck-Branche[50] lässt sich erahnen, welch großes Potenzial mit dem 3D-Druck verbunden wird. Die Möglichkeiten, die durch diese Technologie erschlossen worden sind, waren vor wenigen Jahren noch weit entfernt von konkreten Anwendungen. Doch der aktuelle Stand dieser Technologie erlaubt es von Lebensmitteln über Metallkonstruktionen bis hin zu voll funktionsfähigen Automobilen nahezu jedes erdenkliche Produkt zu drucken.

Die vorliegende Arbeit befasst sich vor allem mit den Aspekten der produzierenden Industrie und der Fragestellung unter welchen Voraussetzungen eine Revolutionierung der Industrie stattfinden kann, welche Umwelteinflüsse existieren und wie sich die Umwelt der produzierenden Unternehmen durch Einzug der 3D-Drucktechnologie in die Fabriken verändert.

### 5.1.2 Einbettung des 3D-Drucks in das Umfeld der produzierenden Industrie

Das semantische Netz (Abbildung 26) setzt die einzelnen Aspekte des Betrachtungsfelds und den 3D-Druck in Relation. Es baut sich ausgehend von der Technologie 3D-Druck auf.

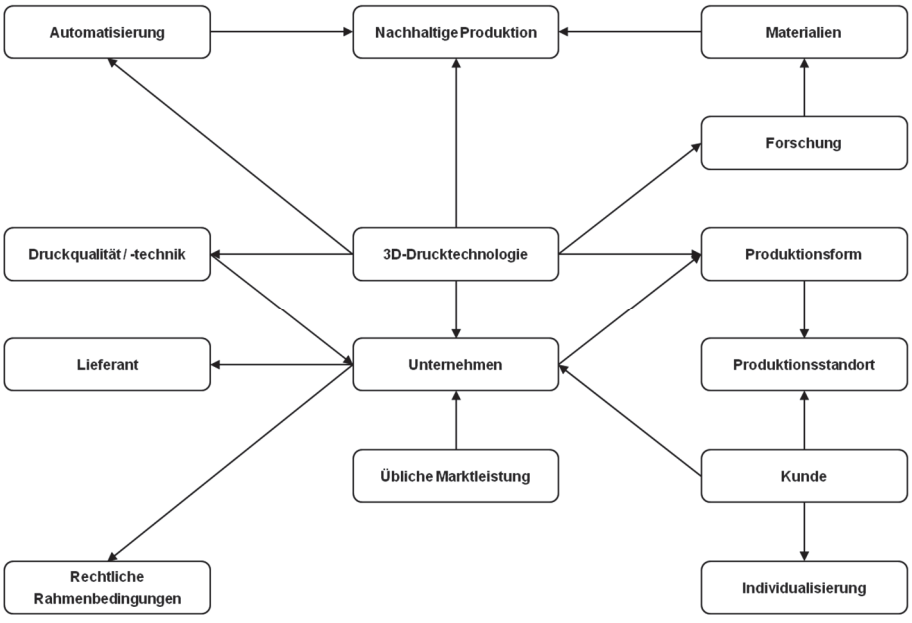



**Abbildung 26:** Semantisches Netz zur Darstellung des Betrachtungsgegenstandes 3D-Druck

[48] Vgl. Fuchs (2013)
[49] Vgl. ebd.
[50] Vgl. Statista (2014)

In der Darstellung wird deutlich, dass die 3D-Drucktechnologie unbeeinflusst von den anderen Akteuren bleibt, allerdings die Forschung, die Produktionsform, die nachhaltige Produktion, den Grad der Automatisierung und die Druckqualität beeinflusst. Die Forschung wird insofern beeinflusst, als dass durch die Technologie ein neues Forschungsfeld geschaffen wird, das diese immer weiter verbessert, verändert und weiterentwickelt. Die 3D-Drucktechnologie begründet damit ein neues Forschungsfeld. Durch die Forschung werden immer neue Materialien erschlossen, welche zum 3D-Druck eingesetzt werden können. Diese reichen mittlerweile von Metall über organische Substanzen (Zellen und Zellträger, Biomasse) bis hin zu Holz und sogar Papier. Durch die Erforschung immer neuer Materialien wird eine nachhaltige Produktion gewährleistet, da es die chemischen und physikalischen Verfahren des 3D-Drucks ermöglichen aus beispielsweise Altpapier, alten Kunststoffen oder verrosteten Metallteilen ein neues Objekt zu drucken. Die Technologie des 3D-Drucks wirkt sich außerdem auf den Automatisierungsgrad aus. Hierunter ist zu verstehen, dass vollautomatische Prozesse andere Prozesse ersetzen, die bislang von Menschen erledigt wurden. Als Beispiel hierfür wird vor allem die Lagerhaltung und Ersatzteilaufbewahrung aufgeführt. Durch den 3D-Druck besteht die Möglichkeit, Ersatzteile nicht erst aufwendig nachproduzieren zu lassen, sondern diese einfach und schnell vor Ort zu drucken. Durch die Möglichkeit, Ersatzteile direkt vor Ort und in kürzester Zeit drucken zu können, würde sich die komplette Lagerhaltung dieser Teile erübrigen. Der Automatisierungsgrad wirkt sich somit auch auf eine nachhaltige Produktion aus (nachhaltig im Sinne von Ressourceneffizienz und der Nutzung des Einsparungspotenzials). Dadurch würden die Transportkosten vollkommen entfallen und es müsste kein Transport vom Ort der Leistungserzeugung zum Warenumschlagsplatz stattfinden. Die Technologie beeinflusst außerdem die Druckqualität bzw. –technik.

Es gibt verschiedene Verfahren des 3D-Drucks[51]:

- **Additive Verfahren:** Ein bestimmter Gegenstand wird durch Hinzufügen, Auftragen und Ablagern von Material, anhand eines digitalen Modells erzeugt. Diese Verfahren werden auch “Generative Fertigung” genannt und bilden den Hauptbereich der “3D-Drucktechnologie”.
- **Subtraktive Verfahren:** Hier wird ein Rohmaterial mittels Fräsen, Drehen, Bohren und elektrischen Verfahren wie Funkerodieren (also durch mechanische Abtragung von Material) bearbeitet, um ein bestimmtes Objekt zu erzeugen.
- **Formende Verfahren:** Bei diesen Verfahren wird ein Gegenstand durch Anwendung von mechanischen oder thermischen Verfahren geformt. Hierunter fallen beispielsweise Biegen, Pressen und Gießen.
- **Hybride Verfahren:** Alle übrigen Verfahren, die sich entweder nicht eindeutig kategorisieren lassen oder mehrere Verfahren miteinander verbinden, werden als hybride Verfahren bezeichnet.

Bei den additiven Verfahren hängt die Druckqualität vor allem von der Druckgeschwindigkeit und der Schichtstärke, die aufgetragen wird, ab. Mit zunehmender Druckgeschwindigkeit wird der Druck von Ecken und Kanten unsauberer. Deshalb kann festgehalten werden, dass die Geschwindigkeit beim Drucken sowohl für die Druckdauer als auch für die Qualität verantwortlich ist. Je schneller gedruckt wird, desto weniger Zeit wird benötigt. Jedoch steigt die Möglichkeit, dass das Ergebnis nicht die gewünschte Qualität erzielt.[52]

[51] Vgl. 3Druck (o. J.)
[52] Vgl. Shapeking (o. J.)

Ein weiterer Zusammenhang besteht zwischen der Schichthöhe und der Druckqualität. 3D-Drucker, die heutzutage verwendet werden, ermöglichen eine Einstellung der Schichthöhe zwischen 0,1 und 0,4 Millimetern. Wie bei der Druckgeschwindigkeit wirkt sich auch hier die jeweilige Einstellung stark auf die Qualität des Objekts aus. Je geringer die Schichthöhe eingestellt wird, desto feiner und glatter werden die Oberflächen.[53]

Diese Abhängigkeit verursacht bei der produzierenden Industrie ein Dilemma, da die Kunden eine bestmögliche Qualität fordern, andererseits aber möglichst kurze Herstellungszeiten und Lieferzeiten verlangen. Damit wird deutlich, dass die Druckqualität zusammen mit der Technologie, neben dem Kunden den größten Einfluss auf die Umsetzung des 3D-Drucks in der Industrie (im semantischen Netz in Abbildung 26 als Unternehmen dargestellt) haben.

Ein weiteres Gebiet, das durch die Technologie beeinflusst wird, ist die Produktionsform. Mit Produktionsform ist die Art der Leistungserzeugung gemeint, beispielsweise Einzelfertigung oder Massenproduktion. Durch eine ausgereifte 3D-Drucktechnologie könnten die industriellen Herstellungsprozesse revolutioniert werden. Allerdings bedarf es zusätzlicher Forschungsanstrengungen bis es tatsächlich so weit kommen könnte[54]: „Weit ab von der industriellen Nutzung in der Massenfertigung und noch zu unausgereift für eine Anwendung in einer produktiven Umgebung“.[55] Wenn der 3D-Druck allerdings so ausgereift ist, dass es sowohl zur Massen-, als auch zur Einzelfertigung verwendet werden kann, hat dies einen enormen Einfluss auf die Industrie. Der umgekehrte Einfluss ist allerdings nicht von der Hand zu weisen, nämlich dass die Produktionsform stark vom Unternehmen und dessen angebotener Produktpalette abhängig ist. Des Weiteren wirkt sich die Art der Leistungserstellung insofern auf den Produktionsstandort aus, als dass dieser in das Haus des Kunden verlagert werden könnte. Man stelle sich vor, ein Haushalt kauft per Netzwerkverbindung die CAD-Daten eines Produkts und druckt dieses bequem zuhause. Insofern wäre eine kundennahe Produktionsstätte in teuren Ballungsräumen überflüssig. Allerdings wäre auch denkbar, dass große 3D-Druckanlagen, ähnlich wie Einkaufszentren, in Ballungsräumen entstehen und die Kunden vor Ort ihre Waren nicht vom Regal nehmen, sondern frisch drucken. Der Einfluss der Produktionsform und das Kundenbedürfnis beeinflussen die Standortwahl eines Unternehmens also in großem Maße. Vor allem die Entwicklung der Nachfrage der Kunden nach individualisierten Produkten steigt stetig: „Der Kunde der Zukunft sei immer mehr ein Individualist, der kaum mehr Kompromisse akzeptiert“[56].

Weiterhin wird ein Unternehmen von den Marktleistungen beeinflusst, die in der jeweiligen Branche üblich sind. Eine Möglichkeit ist, das Produkt isoliert zu verkaufen oder besondere Leistungen (z. B. Versicherungen, Verträge, kostenlose Wartungen etc.) mit dem Produkt zu verbinden (Bundle).

Die Unternehmen der Branche beeinflussen die Lieferanten in großem Maße. Würde eine Umstellung der Produktion vom klassischen Herstellungsprozess auf einen 3D-lastige Leistungserstellung erfolgen, würden die klassischen Teilelieferanten von Lieferanten abgelöst, die das benötigte 3D-Druckmaterial anbieten. Die Nachfrage nach Rohstoffen beeinflusst die Lieferantenstruktur in dem Maße, dass Lieferanten, die keine 3D-Druckmaterialien anbieten, schlichtweg von den Wettbewerbern verdrängt würden.

[53] Vgl. Shapeking (o. J. a)
[54] Vgl. Fuchs (2013)
[55] Ebd.
[56] Tauber (2012)

Das letzte Element des semantischen Netzes sind die rechtlichen Rahmenbedingungen. Durch Gesetze, Vorschriften und Verordnungen wird dem Markt ein rechtlicher Rahmen gesetzt, um einen reibungsfreien Ablauf und auf einem Markt übliche Prozesse zu gewährleisten und die einzelnen Akteure zu schützen.

## 5.2 Einflussbereiche und Einflussfaktoren/Treiber[57]

**Zusammenfassung**

Wichtige Trends im Umfeld des Betrachtungsgegenstands sind folgende Megatrends: *Digitalisierung*, *Globalisierung* und *Urbanisierung*. Eine *Flexible Produktion*, *On-Demand Production* und *„Let the customer design"* sind für die vorliegende Analyse als relevant erachtete Branchentrends. *Individualisierte Produkte*, *Produktleasing* und *Sharing* sind Konsumententrends, welche die Entwicklung des 3D-Drucks beeinflussen. Die Schlüsseltreiber, welche den Betrachtungsgegenstand in Zukunft am meisten beeinflussen werden, sind *Energiekosten*, *Forschungsstand der Materialien*, *Drucktechnik*, *Druckqualität*, *Produktionsform*, *Absatzmarktentwicklung bei produzierenden Unternehmen* sowie *Individualisierte Produkte*.

Ziel dieses Schrittes ist die Ermittlung der wichtigsten Einflussfaktoren, die auf die zukünftige Entwicklung des Betrachtungsgegenstands wirken. Zur Ableitung der Einflussfaktoren werden die für den Betrachtungsgegenstand wichtigsten Mega-, Branchen-, und Konsumententrends ermittelt. Anschließend werden Einflussbereiche identifiziert, aus denen sich Einflussfaktoren ableiten lassen.

### 5.2.1 Trendanalyse

Unter Berücksichtigung der Akteure und deren Beziehungen im Betrachtungsfeld wurden mittels Internetrecherche und Brainstorming Mega-, Branchen- und Konsumententrends (Abbildung 27) identifiziert. Ziel ist es, Trends zu identifizieren, die bei der Ableitung der Einflussfaktoren als Informationsquelle mit einbezogen werden können.

[57] Die Begriffe werden synonym verwendet.

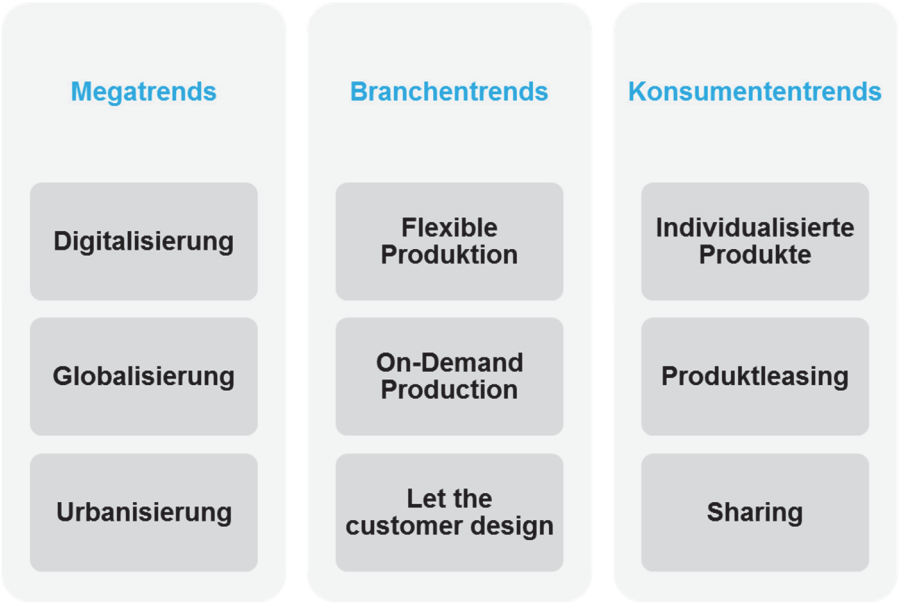



**Abbildung 27:** Identifizierte Trends

### 5.2.2 Ermittlung der Einflussbereiche

Die Einflussbereiche dienen einer Kategorisierung der Einflussfaktoren. Die identifizierten Einflussbereiche sind: Wirtschaft, Gesellschaft, Umwelt, Politik, Technologie, Branche und Markt (Abbildung 28). Sie sind an die externen Faktoren einer klassischen Umweltanalyse angelehnt. Die Einflussbereiche werden in Einflussbereiche auf die ein einzelnes Unternehmen wenig bis keinen Einfluss hat (äußerer Kreis) und Einflussbereiche, die direkt an den Einflussbereich des Unternehmens angrenzen (innerer Kreis), untergliedert.

Im nachfolgenden Kapitel wird erläutert, wie aus den Einflussbereichen Einflussfaktoren abgeleitet werden.

### 5.2.3 Ermittlung der Einflussfaktoren

Die Einflussfaktoren werden den fünf Einflussbereichen unter Berücksichtigung der Mega-, Branchen und Konsumententrends zugeordnet (Abbildung 28).




**Abbildung 28:** Identifikation der Einflussfaktoren[58]

Die Konsumententrends *Individualisierte Produkte*, *Produktleasing* und *Sharing* finden sich in den Einflussfaktoren *Individualiserte Produkte* und *Branchenübliche Leistungen* wieder. Die Branchentrends wurden im Einflussfaktor *Produktionsform* zusammengefasst. Megatrends wie *Globalisierung* und *Urbanisierung* sind dem Einflussbereich Wirtschaft zugeordnet, die resultierenden Einflussfaktoren sind: *Weltwirtschaftliche Entwicklung* und *Kundennahe Produktionsstandorte*. Der Megatrend *Digitalisierung* wurde dem Einflussbereich *Gesellschaft, Umwelt und Politik* zugeordnet und wird durch den Einflussfaktor *Digitalisierung der Infrastruktur* repräsentiert.

Da der Betrachtungsgegenstand „3D-Printing“ und somit auch das betroffene Unternehmen, in diesem Fall die Fabrik der Zukunft, in ein komplexes System von Einflussfaktoren eingebettet ist, ist es von großer wirtschaftlicher Bedeutung, diese zu kennen und möglichst detailliert über deren Einfluss und Relevanz für das Unternehmen Bescheid zu wissen.

Im Folgenden werden die Einflussfaktoren näher beschrieben, um die Zuordnung zu den jeweiligen Einflussbereichen zu verdeutlichen und deren Einfluss auf die Fabrik der Zukunft darzustellen.

Die weltwirtschaftliche Entwicklung im Bereich *Wirtschaft* hat einen großen Einfluss auf die Absatzentwicklung eines Unternehmens. Tritt beispielsweise der Fall ein, dass die Wirtschaft stagniert, wirkt sich das in der Regel negativ auf die finanzielle Situation der Unternehmen aus. Das bedeutet, dass Investitionen zurückgefahren werden, vor allem auch in neue, noch nicht vollständig ausgereifte Technologien, wie dem 3D-Druck. *Kundennahe Produktionsstandorte* beeinflussen die wirtschaftliche Situation der Fabrik der Zukunft insofern, als dass sie einerseits je nach Spezialisierung der Fabrik notwendig

[58] Vgl. Brecht 2014, S. 117

sind, beispielsweise bei großen Objekten, wie Maschinen. Andererseits kann der Faktor aber auch einen geringeren Einfluss haben, wenn beispielsweise individualisierte Kleinprodukte, wie Gürtelschnallen, Dekorationsartikel oder ähnliches produziert werden. Ein weiterer Einflussfaktor sind die Rohstoff- und Materialkosten. Diese beeinflussen die wirtschaftliche Lage eines Unternehmens im produzierenden Gewerbe enorm, da sowohl Rohstoffe, als auch Materialien zur Produktion unbedingt nötig sind und beträchtlichen Einfluss auf die Kostenstruktur haben.

Dem Einflussbereich der *Gesellschaft, Umwelt und Politik* wurden die Einflussfaktoren *Rechtliche Rahmenbedingungen*, *Energiekosten*, *Rohstoffverfügbarkeit* und *Digitalisierung der Infrastruktur* zugeordnet. Vor allem die Einflussfaktoren *Rechtliche Rahmenbedingungen* und *Digitalisierung der Infrastruktur* beeinflussen die Erzeugung von Produkten in hohem Maße, da einerseits die Verwendung des 3D-Drucks für bestimmte Produkte, beispielsweise Nahrungsmittel beschränkt oder verboten werden könnte. Andererseits entsteht durch die Digitalisierung der gesamten Infrastruktur ein Problem des Datenschutzes, da Produktpläne, Modellbaupläne und Lizenzen online für jedermann verfügbar sind. Je nachdem in wie weit diese beiden Treiber reglementiert werden, entsteht ein positiver oder negativer Einfluss auf die Fabrik der Zukunft. Energiekosten und Rohstoffverfügbarkeit haben einen Einfluss darauf, ob die Verwendung des 3D-Drucks in der Fabrik der Zukunft ein realer Bestandteil werden kann, da ohne die vorhandenen Druckmaterialen, welche heutzutage meist mit Hilfe von Öl erzeugt werden, an einen verbreiteten industriellen Einsatz dieser Technologie nicht zu denken ist. Die Herstellung von Produkten mit Hilfe des 3D-Drucks ist bei momentanem Stand der Technologie sehr zeitaufwendig und in Folge dessen auch sehr energie- bzw. kostenintensiv.

Dem Einflussbereich der *Technologie* wurden die Treiber *Automatisierungsgrad*, *Forschungsstand der Materialien*, *Drucktechnik* sowie *Druckqualität und Softwarekompatibilität* zugeordnet. Der *Automatisierungsgrad* ist mit der Umsetzbarkeit der 3D-Technologie dahingehend korreliert, als dass das Verhältnis der bereits automatisierten Fertigungsschritte zur Gesamtzahl der Fertigungsschritte idealerweise noch einen relativ geringen Stand hat. Durch den Einsatz der Technologie kann somit die Gesamtzahl der Fertigungsschritte auf ein Minimum reduziert werden. Beispielsweise ist es möglich, eine Fahrzeugtür in der entsprechenden Farbe zu drucken. Lediglich die Montage würde als weiterer Schritt verbleiben. Betrachtet man den Forschungsstand der Materialien, wird deutlich, dass je mehr Materialien für den 3D-Druck erschlossen werden, desto mehr Produkte können damit produziert werden. Heutzutage ist es beispielsweise möglich, Metalle oder auch Lebensmittel per 3D-Druck zu erstellen. Je nachdem, welche weiteren Materialien den 3D-Druck ermöglichen werden, erweitert sich das Anwendungsgebiet dieser Technologie in der Fabrik der Zukunft. Sowohl die Drucktechnik, als auch die Druckqualität sind entscheidende Treiber im Bereich der Technologie. Die in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Verfahren des 3D-Drucks variieren hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit zur Produktion stark. Während subtraktive und formende Verfahren in der Industrie bereits sehr verbreitet sind, hat sich das additive Verfahren aufgrund des hohen Zeitaufwands und der (je nach Schichthöhe und Druckgeschwindigkeit variierenden) Qualität noch nicht durchsetzen können. Bei Verbesserung dieser beiden Treiber wird ein enormes Potenzial zum Einsatz des additiven Verfahrens des 3D-Drucks in der Fabrik der Zukunft freigesetzt. Ein weiterer identifizierter Treiber im Bereich der Technologie ist die Softwarekompatibilität. Vor allem bei der Übersetzung der Daten, zwischen Anwender, Computer oder 3D-Scanner und dem 3D-Drucker ist es von entscheidender Wichtigkeit, dass die Softwarekompatibilität gewährleistet ist, da aus Übersetzungsfehlern häufig Ausschussprodukte resultieren.

Der *Branche* als drittem Einflussbereich wurden die Treiber der *Produktionsform*, der *branchenüblichen Leistung,* der *Wettbewerbsstruktur* und der *Lieferantenstruktur* zugeordnet. Die Produktionsform

hat großen Einfluss auf die Umsetzbarkeit des 3D-Drucks in der Fabrik der Zukunft. Es ist denkbar die Produktion einer Fabrik, die hauptsächlich auftragsbezogen fertigt und somit einen hohen Flexibilitätsgrad in der Produktion hat, vom herkömmlichen Produktionsprozess zu einem, auf den 3D-Druck ausgerichteten, Produktionsprozess zu überführen. Da nicht abzusehen ist, ob die 3D-Drucktechnologie soweit verbessert werden kann, dass sie in der Massenfertigung eingesetzt werden kann, hat die Produktionsform einen großen Einfluss auf den 3D-Druck und die Fabrik der Zukunft. Die branchenübliche Leistung hat Einfluss darauf, wie das Geschäftsmodell der Fabrik der Zukunft gestaltet ist. Beispielsweise könnte das Produkt isoliert, in einem Bundle oder mit verschiedenen Services angeboten werden. Die Treiber *Wettbewerbs- und Lieferantenstruktur* beeinflussen die Anreize, die für eine Einführung des 3D-Drucks vorhanden sind sowie die Umsetzung des Produktionsverfahrens im Kontext der gesamten Supply Chain.

Im Einflussbereich *Markt* wurden die Einflussfaktoren *Absatzmarktentwicklung bei produzierenden Unternehmen*, *individualisierte Produkte* und *verkürzter Produktlebenszyklus* identifiziert. Die Absatzmarktentwicklung korreliert, wie auch die weltwirtschaftliche Entwicklung, stark mit der wirtschaftlichen Situation der Fabrik der Zukunft. Die Absatzmarktentwicklung für Produkte, die mit Hilfe des 3D-Drucks erzeugten wurden, ist entscheidend für die flächendeckende Umstellung von herkömmlichen Produktionsprozessen auf die 3D-Technologie. Werden beispielsweise Produkte, die mit Hilfe des 3D-Drucks erzeugt wurden vom Markt abgelehnt, dann spiegelt sich das einerseits in der wirtschaftlichen Situation einer Fabrik, die mittels 3D-Druck produziert wieder, andererseits werden Fabriken mit herkömmlicher Produktion ihre bisherigen Produktionsmethoden nicht auf den 3D-Druck umstellen. Ein weiterer identifizierter Treiber ist die steigende Nachfrage nach individualisierten Produkten. Der Einfluss, der daraus für den 3D-Druck in der Fabrik der Zukunft resultiert, ist enorm. Großer Vorteil der 3D-Drucktechnologie ist, dass sie einen sehr flexiblen Produktionsprozess ermöglicht. Mit einer Maschine kann eine Vielzahl von Produkten produziert werden. Je ausgereifter, leistungsfähiger, präziser produziert werden kann und je mehr Materialien per 3D-Druck verarbeitet werden können, desto größer ist die Bedeutung des 3D-Drucks bei der Herstellung von individualisierten Produkten. Der verkürzte Produktlebenszyklus wurde ebenfalls als Treiber des Marktes identifiziert. Durch die Verkürzung der Produktlebenszyklen entstehen vor allem im Bereich der produzierenden Industrie große Probleme. Beispielsweise ist die Umrüstung oder Anschaffung von Produktionsmaschinen einerseits sehr zeitaufwendig, andererseits werden dadurch hohe Kosten verursacht. Dadurch, dass die Lebenszyklen von Produkten verkürzt werden, muss dieser Vorgang in der produzierenden Industrie in immer kürzeren Zeitabständen wiederholt werden.

Die oben identifizierten und beschriebenen Treiber wurden im nächsten Schritt in eine Einflussmatrix übertragen. Ziel der Vorgehensweise ist, die wesentlichen Treiber zu identifizieren, die auf die Entwicklung des 3D-Drucks wirken. In diesem Zusammenhang wird die Treiberliste außerdem reduziert und die Bündelung der alternativen Projektionen auf ein handhabbares Maß gebracht. Die Aktivsumme gibt Auskunft darüber, wie stark ein Einflussfaktor andere Treiber beeinflusst, während die Passivsumme wiederspiegelt wie stark ein Einflussfaktor vom Gesamtsystem beeinflusst wird.[59] Die folgende Grafik zeigt die Einflussmatrix (Abbildung 29). Die farblich hervorgehobenen Zeilen zeigen die Treiber mit den größten Aktivsummen und die farblich markierten Spalten die Treiber mit den größten Passivsummen.

[59] Vgl. Gausemeier et al. (1998), S. 119 f.

**Einflussmatrix**

Bewertungsmaßstab
0 = kein Einfluss
1 = schwacher, verzögerter Einfluss
2 = mittlerer Einfluss
3 = starker, unmittelbarer Einfluss

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Weltwirtschaftliche Entwicklung | Kundennahe Produktionsstandorte | Rohstoff- und Materialkosten | Rechtliche Rahmenbedingungen | Energiekosten | Rohstoffverfügbarkeit | Digitalisierung der Infrastruktur | Automatisierungsgrad | FS Materialien | Drucktechnik | Druckqualität | Softwarekompatibilität | Produktionsform | Branchenübliche Leistungen | Wettbewerbsstruktur | Lieferantenstruktur | Absatzmarktentwicklung | Individualisierte Produkte | Verkürzter Produktlebenszyklus | **Aktivsumme** |
| 1 | Weltwirtschaftliche Entwicklung | | 2 | 3 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | **29** |
| 2 | Kundennahe Produktionsstandorte | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 3 | 2 | 1 | 0 | **9** |
| 3 | Rohstoff- und Materialkosten | 2 | 0 | | 0 | 2 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 1 | **22** |
| 4 | Rechtliche Rahmenbedingungen | 2 | 3 | 2 | | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 0 | 0 | **27** |
| 5 | Energiekosten | 3 | 1 | 2 | 0 | | 0 | 1 | 2 | 0 | 3 | 1 | 0 | 1 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | **29** |
| 6 | Rohstoffverfügbarkeit | 1 | 2 | 3 | 0 | 2 | | 1 | 0 | 3 | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | **23** |
| 7 | Digitalisierung der Infrastruktur | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0 | | 3 | 0 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 | 2 | 1 | 0 | 3 | 0 | **27** |
| 8 | Automatisierungsgrad | 2 | 0 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 | | 0 | 3 | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 1 | 1 | 3 | 1 | **32** |
| 9 | FS Materialien | 1 | 0 | 3 | 1 | 2 | 3 | 0 | 2 | | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | **36** |
| 10 | Drucktechnik | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | 3 | 3 | 0 | | 3 | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 1 | **43** |
| 11 | Druckqualität | 1 | 0 | 2 | 0 | 2 | 1 | 0 | 2 | 2 | 3 | | 0 | 2 | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | **34** |
| 12 | Softwarekompatibilität | 2 | 3 | 1 | 1 | 3 | 0 | 3 | 3 | 0 | 3 | 1 | | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | **38** |
| 13 | Produktionsform | 0 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 0 | 3 | 3 | 3 | | 2 | 2 | 3 | 1 | 3 | 2 | **36** |
| 14 | Branchenübliche Leistungen | 0 | 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 0 | 3 | 3 | 3 | 2 | | 3 | 3 | 3 | 2 | 1 | **34** |
| 15 | Wettbewerbsstruktur | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 0 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | 2 | 3 | 2 | 2 | **46** |
| 16 | Lieferantenstruktur | 1 | 1 | 3 | 0 | 2 | 0 | 2 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 | 2 | | 0 | 1 | 0 | **18** |
| 17 | Absatzmarktentwicklung | 1 | 3 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 3 | 1 | 0 | 3 | 0 | 3 | 3 | | 2 | 2 | **28** |
| 18 | Individualisierte Produkte | 0 | 3 | 3 | 0 | 2 | 1 | 1 | 2 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3 | 2 | 3 | 1 | 3 | | 0 | **29** |
| 19 | Verkürzter Produktlebenszyklus | 0 | 2 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 | 0 | 2 | 1 | | **19** |
| | **Passivsumme** | **24** | **32** | **34** | **13** | **36** | **24** | **27** | **35** | **12** | **39** | **24** | **19** | **34** | **31** | **46** | **42** | **37** | **35** | **18** | |

**Abbildung 29:** Darstellung der Einflussmatrix[60]

Die Einflussfaktoren mit den größten Aktivsummen sind die *Wettbewerbsstruktur*, die *Drucktechnik* sowie die *Druckqualität*, der *Forschungsstand der Materialien*, die *Softwarekompatibilität*, die *Produktionsform* und die *branchenüblichen Leistungen*. Die Einflussfaktoren mit den größten Passivsummen sind die *Wettbewerbsstruktur*, die *Lieferantenstruktur*, die *Drucktechnik*, die *Absatzmarktentwicklung bei produzierenden Unternehmen* und die *Energiekosten*.

Als nächstes werden die Treiber in eine Relevanzmatrix (Abbildung 30) übertragen, um zu ermitteln, welche Treiber die höchste Relevanzsumme haben. Die Höhe der Relevanzsumme spiegelt die Wichtigkeit des Einflussfaktors wider.[61]

[60] Bewertungsmaßstab: 0 = kein Einfluss; 1 = schwacher, verzögerter Einfluss; 2 = mittlerer Einfluss; 3 = starker, unmittelbarer Einfluss

[61] Vgl. Gausemeier et al. (1998), S. 119 f.

**Relevanzmatrix**

Bewertungsmaßstab
0 = i ist unwichtiger als j
1 = i ist wichtiger als j

| i \ j | Weltwirtschaftliche Entwicklung | Kundennahe Produktionsstandorte | Rohstoff- und Materialkosten | Rechtliche Rahmenbedingungen | Energiekosten | Rohstoffverfügbarkeit | Digitalisierung der Infrastruktur | Automatisierungsgrad | FS Materialien | Drucktechnik | Druckqualität | Softwarekompatibilität | Produktionsform | Branchenübliche Leistungen | Wettbewerbsstruktur | Lieferantenstruktur | Absatzmarktentwicklung | Individualisierte Produkte | Verkürzter Produktlebenszyklus | Relevanzsumme |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 Weltwirtschaftliche Entwicklung | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 2 Kundennahe Produktionsstandorte | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 3 Rohstoff- und Materialkosten | 1 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 |
| 4 Rechtliche Rahmenbedingungen | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 3 |
| 5 Energiekosten | 1 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 6 Rohstoffverfügbarkeit | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 8 |
| 7 Digitalisierung der Infrastruktur | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 17 |
| 8 Automatisierungsgrad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| 9 FS Materialien | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 16 |
| 10 Drucktechnik | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 14 |
| 11 Druckqualität | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 15 |
| 12 Softwarekompatibilität | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 9 |
| 13 Produktionsform | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 16 |
| 14 Branchenübliche Leistungen | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 |
| 15 Wettbewerbsstruktur | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | | 1 | 0 | 0 | 0 | 7 |
| 16 Lieferantenstruktur | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 17 Absatzmarktentwicklung | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | | 0 | 1 | 14 |
| 18 Individualisierte Produkte | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | | 1 | 14 |
| 19 Verkürzter Produktlebenszyklus | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | | 10 |

**Abbildung 30:** Darstellung der Relevanzmatrix

Durch einen paarweisen Vergleich wurden die Treiber mit der größten Relevanzsumme ermittelt. Diese sind die *Digitalisierung der Infrastruktur*, der *Forschungsstand der Materialien*, die *Produktionsform*, die *Druckqualität und –technik*, die *Absatzmarktentwicklung bei der produzierenden Industrie* sowie die *individualisierten Produkte*.

Für den nächsten Schritt der Systemanalyse werden die Ergebnisse der vorangegangenen Methoden benötigt. Zur Auswahl der Schlüsseltreiber wird ein Systemgrid, das eine Portfoliodarstellung ist, erstellt. Diese gliedert sich in vier Felder. Im Bereich der System-Hebel sind Treiber angesiedelt, die eine aktive Gestaltung des Systems erlauben.[62] Im Bereich der extremen Knoten finden sich die Treiber mit der stärksten Einbindung in das Betrachtungsfeld. System-Indikatoren dienen als Frühwarnsignal bei Systemveränderungen, wohingegen unabhängige Faktoren einen sehr geringen Einfluss auf das Gesamtsystem haben. Das Systemgrid benötigt als Input zum einen Aktiv- und Passivsumme und zum anderen das Ergebnis der Relevanzmatrix. Die horizontale Achse bildet hierbei die, in der Einflussmatrix ermittelte, Passivsumme ab, während die vertikale Achse die Aktivsumme darstellt. Je größer die Relevanzsumme eines Treibers ist, desto größer ist dessen Kreisdurchmesser.[63]

[62] Vgl. Gausemeier (2009), S. 70 f.
[63] Vgl. Gausemeier et al. (1998), S. 120

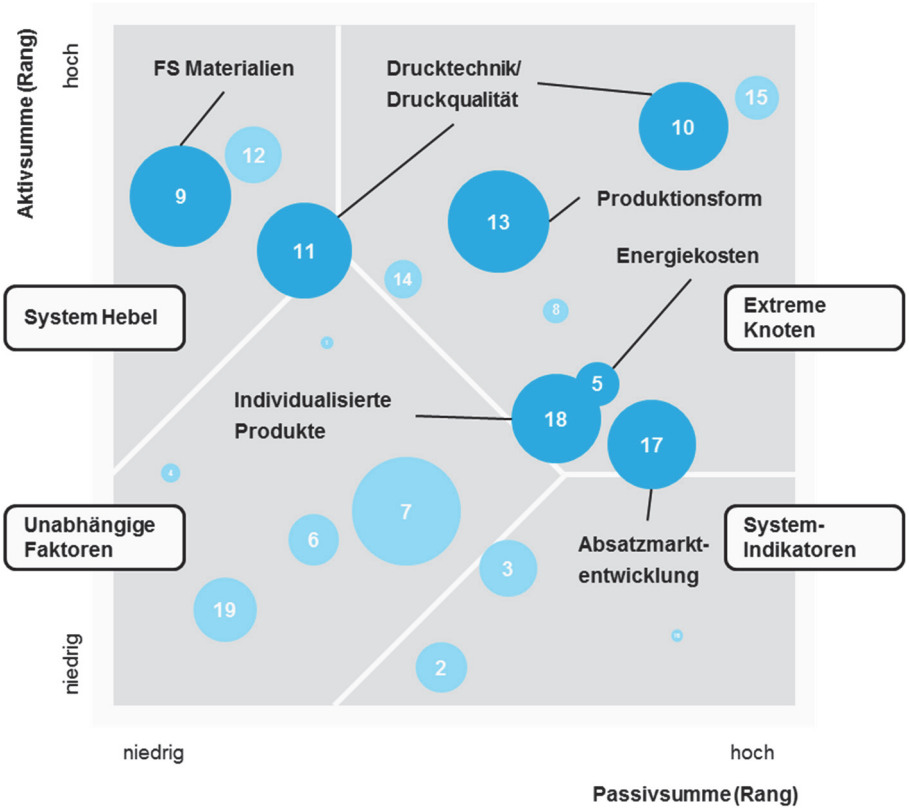



**Abbildung 31:** Darstellung des Systemgrids

Die im obigen Systemgrid dargestellten Kreise (5, 9, 10, 11, 13, 17, 18) wurden für das Betrachtungsfeld als kritische Treiber identifiziert (Abbildung 31).

## 5.3 Deskriptoren und Projektionen

**Zusammenfassung**

Als Indikatoren für den Einflussfaktor *Energiekosten*, dienen die Deskriptoren *Anteil an der Bruttowertschöpfung*, *CO2-Ausstoß* und *Industriestrompreis*. Den Einflussfaktoren *Forschungsstand der Materialien* und *Druckqualität/-technik* wurden die Deskriptoren *Förderung von Materialforschung* und *Patentanmeldungen der Chemiebranche* sowie *Druckgeschwindigkeit und Schichthöhe* zugeordnet. Die *Absatzmarktentwicklung* und *Individualisierung* werden durch den *Exportanteil in die eigene Region* und den *Welthandel* beschrieben, die *Produktionsform* durch den *Anteil an Massenfertigung*. Für jeden Deskriptor wurden bis zu drei unterschiedliche Zukunftsverläufe prognostiziert.

Die gewählten Schlüsseltreiber werden mithilfe von Deskriptoren und Projektionen quantifiziert. Ziel ist es, für jeden Treiber geeignete Indikatoren (Deskriptoren) zu finden, deren mögliche Entwicklung in der Zukunft prognostiziert werden kann (Projektionen) (Abbildung 32). In den folgenden Unterkapiteln werden die einzelnen Deskriptoren und deren mögliche zukünftige Entwicklung näher beschrieben.

| Einfluss-Niveau | Einfluss-bereich | Einfluss-faktor | Deskriptor | Projektion | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ausprägungen | Gesellschaft, Umwelt und Politik | Energie-kosten | Anteil an der Bruttowert-schöpfung | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | CO2-Ausstoß | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Industrie-strompreis | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Technologie | FS Materialien | Förderung von Materialforschung | | bleibt | steigt | |
| | | | Patentanmeld-ungen in Chemie-branche | | bleibt | steigt | |
| | | Druckqualität / -technik | Druck-geschwindigkeit | | bleibt | steigt | |
| | | | Schichthöhe | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Markt | Absatzmarkt-entwicklung | Exportanteil in eigene Region | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Welthandel | | | steigt | steigt stark |
| | | Individual-isierung | Kundennachfrage | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Einfluss auf Unternehmens-erfolg | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Branche | Produktions-form | Massenfertigung | sinkt | bleibt | steigt | |

**Abbildung 32:** Einflussfaktoren, Deskriptoren und Projektionen

### 5.3.1 Energiekosten

Für den Einflussfaktor *Energiekosten* wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Anteil an der Bruttowertschöpfung
- CO2-Ausstoß
- Industriestrompreis.

#### 5.3.1.1 Anteil an der Bruttowertschöpfung

Bei der Metallerzeugung und -bearbeitung ist der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung nach wie vor am höchsten (Abbildung 33). Bei Herstellern von End- oder Zwischenprodukten wie beispielsweise dem Automobil- oder Maschinenbau ist er sehr gering, da die energieintensiven Rohstoffe zugekauft werden. Inwieweit direkte Energiekosten anfallen hängt also maßgeblich von der Fertigungstiefe ab. Gerade diese kann durch den 3D-Druck stark beeinflusst werden.

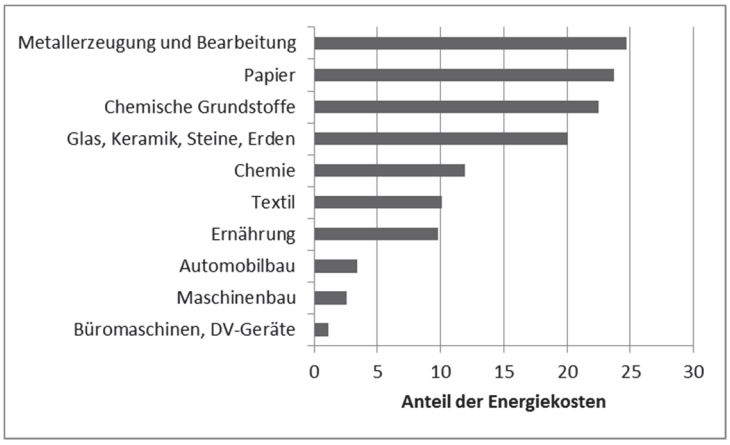



**Abbildung 33:** Anteil der Energiekosten nach Branche im Jahr 2006[64]

Der Energiekostenanteil ist je nach Branche unterschiedlich ausgeprägt. In vielen Branchen wird er stark abhängig vom Strompreis sein. Für produzierende Unternehmen, die aufwendige Materialien verwenden wie Aluminium oder andere Metalle und chemische Kunststoffe, spielt die Energieintensivität der Rohstoffe eine große Rolle. Exemplarisch sind in Abbildung 34 die Energiekosten für die Herstellung von Metallerzeugnissen in Deutschland dargestellt, die sich im Zeitraum 1997 bis 2011 mehr als verdoppelt haben.

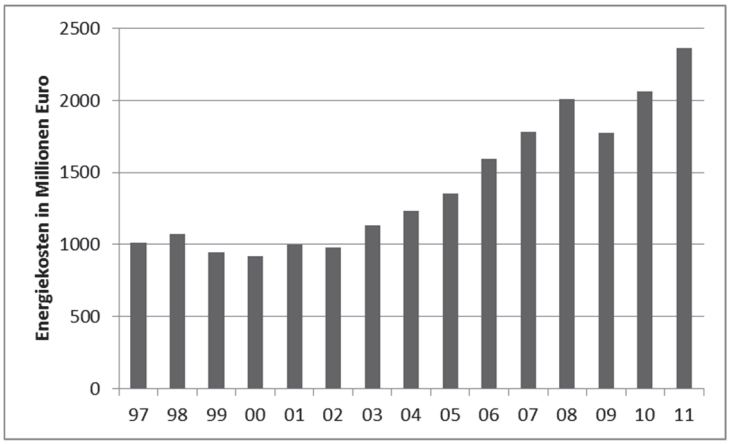



**Abbildung 34:** Energiekosten für die Herstellung von Metallerzeugnissen in Deutschland in den Jahren 1997 bis 2011 (in Millionen Euro)[65]

Auch bei der Produktion von Kunststoffprodukten hat der Energieverbrauch bei der Herstellung den größten Anteil am Gesamtenergieverbrauch (Abbildung 35). Dieser ist jedoch geringer als bei alternativen Materialien mit ähnlichen Eigenschaften. Für die Energiekosten sind also die Kosten bei der Herstellung der Materialien entscheidend.

[64] Vgl. Statista (2014a)
[65] Vgl. Statista (2014b)

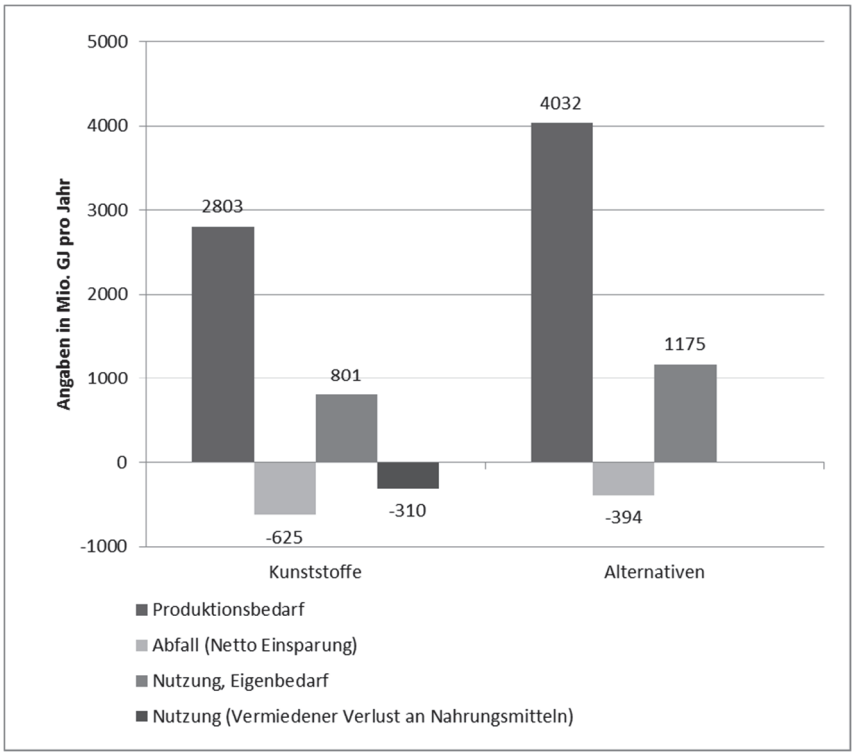



**Abbildung 35:** Gesamtenergieverbrauch und Energie-Einsparung bei Kunststoffen und alternativen Materialien[66]

Da der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung branchenabhängig ist, kann er nicht direkt gemessen werden. Wichtig ist also zu welchen Anteilen die verschiedenen Materialien hergestellt werden. Für die **Projektion** stellt es sich wie folgt dar:

- Der Anteil der Energiekosten **sinkt**, wenn Substitute für Metallerzeugnisse verwendet werden oder der energieunabhängige Anteil der Bruttowertschöpfung stark steigt und die Stromkosten nicht stark steigen.
- Der Anteil der Energiekosten **steigt**, wenn keine Substitute für Metallerzeugnisse verwendet werden oder der Strompreis stark steigt.

#### 5.3.1.2 CO2-Ausstoß

Der *CO2-Ausstoß* führt deshalb zu Kosten, weil er in vielen Ländern an Emissionsrechte gebunden ist. Der weltweite CO2-Ausstoss ist in den letzten 20 Jahren stark gestiegen (Abbildung 36).

[66] Vgl. Statista (2014c)

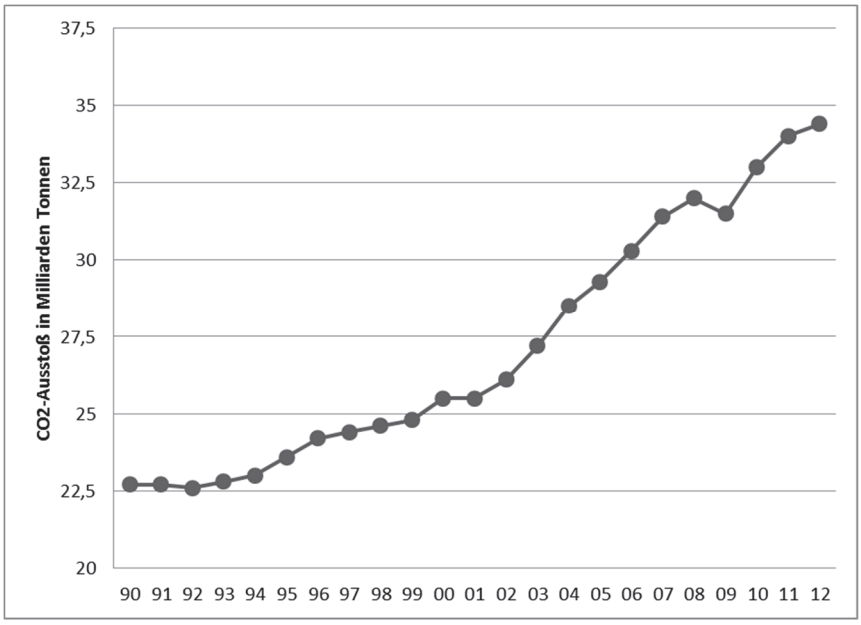



**Abbildung 36:** Entwicklung des weltweiten CO2-Ausstoßes von 1990 bis 2012 (in Mrd. Tonnen)[67]

Für die Projektion des CO2-Ausstoßes wird angenommen, dass sich zukünftig mehr Länder verpflichten, ihre Emissionen zu sanktionieren. Dies kann in Form eines Emissionshandels sein, aber auch eine einfache gesetzliche Besteuerung wäre denkbar.

Es wird angenommen, dass der CO2-Ausstoß der Industrie vor allem von der Herstellungsart der Materialien, der Effizienz der Produktion und der Menge an produzierten Erzeugnissen abhängt. Dies führt zu zwei möglichen Entwicklungen (Abbildung 37).

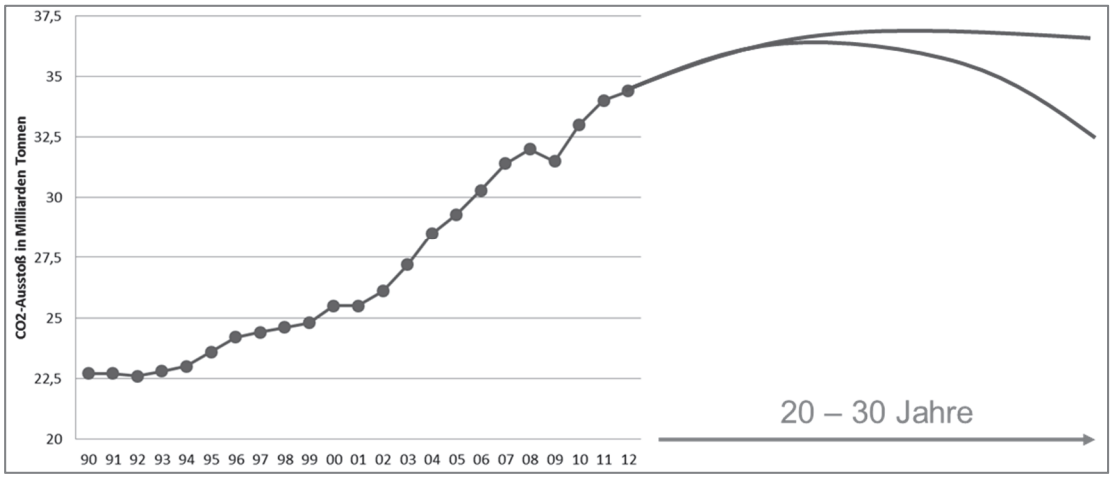



**Abbildung 37:** Projektion des weltweiten CO2-Ausstoßes[68]

Die **Projektionen** sind demnach folgende:

- Der weltweite CO2-Ausstoß **sinkt.**
- Der weltweite CO2-Ausstoß **bleibt gleich**.

[67] Vgl. Statista (2014d)
[68] Vgl. ebd.

Gründe hierfür sind unter anderem die Tendenz zu ölunabhängigen Materialien wie biologisch abbaubaren Kunststoffen (z. B. auf Maisstärke), die kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz von Antrieben oder Fertigungsprozessen sowie der Verzicht auf fossile Rohstoffe zur Energiegewinnung. Gerade der 3D-Druck könnte an einer Revolution der Produktionsindustrie maßgeblich beteiligt sein. Diese Fortschritte könnten durch anhaltendes Wirtschaftswachstum zum Teil ausgeglichen werden, weshalb auch ein Gleichbleiben des CO2-Ausstoßes denkbar ist.

#### 5.3.1.3 Industriestrompreis

Als weiterer Indikator für die Energiekosten werden die Strompreise der Industrie gewählt. Insbesondere die IT-Infrastruktur, die sich im Zuge der Digitalisierung ausweitet, ist sehr stromintensiv. Auch die zunehmende Vernetzung von Geräten spielt hier eine Rolle. Um Serverlandschaften und (batteriegetriebene) Geräte zu versorgen, kommt dem Strom als Energiequelle eine wichtige Bedeutung zu.

Die weltweiten Industriestrompreise sind sehr unterschiedlich. Als Datengrundlage für den Deskriptor Industriestrompreis wurde deshalb die Preisentwicklung in Deutschland verwendet. Dies hat folgende Gründe:

Die Stromversorgung in Deutschland war in den letzten Jahren verglichen mit anderen Ländern relativ unabhängig von außenpolitischen Konflikten oder anderen Ereignissen und unterlag keinen extremen Beeinflussungen. Außerdem sind für die Projektion weniger absolute Werte entscheidend, sondern vielmehr die relative Tendenz der Preisentwicklung, somit können auch Währungsunterschiede vernachlässigt werden. Ausschlaggebend ist jedoch, dass Deutschland mit der Energiewende, dem Ersetzen von fossilen Energieträgern durch neuen Energien, eine Entwicklung angestrebt hat, die anderen Ländern noch bevor steht, jedoch zu erwarten ist. Beispielsweise gibt es mittlerweile auch vergleichbare Pläne in den USA, die sich lange geweigert haben, eine drastische Reduktion des CO2-Ausstoßes anzustreben.[69] Die Auswirkung dieser Entwicklung soll deshalb in Deutschland stellvertretend für andere Industrienationen bestimmt werden.

Abbildung 38 zeigt, dass sich die Industriestrompreise im letzten Jahrzehnt leicht erhöht haben.

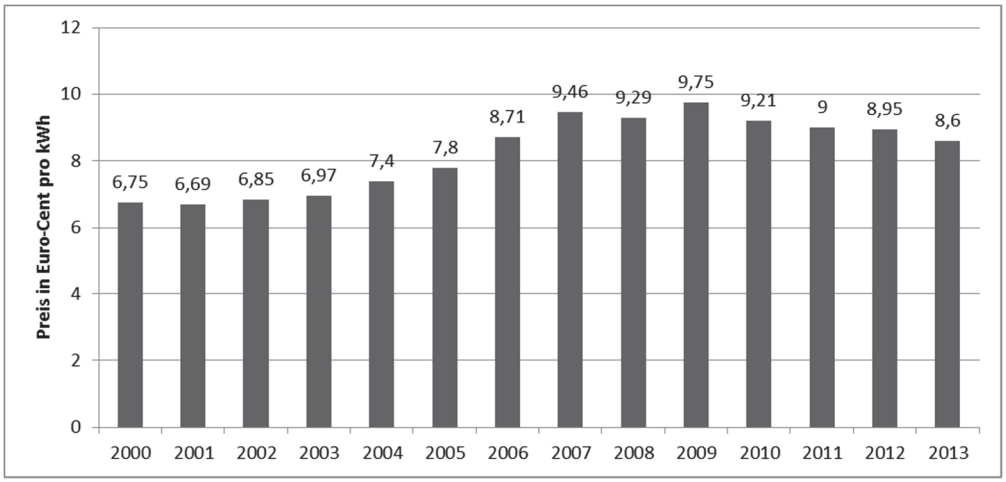



**Abbildung 38:** Industriestrompreise in Deutschland in den Jahren 2000 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)[70]

[69] Vgl. Tagesschau.de (2014)
[70] Vgl. Statista (2014e)

Deutliche Unterschiede gibt es jedoch, wenn die erhobene Stromsteuer einbezogen wird (Abbildung 39). Hier zeigt sich eine deutliche Erhöhung des Strompreises, selbst bei sinkenden Nettopreisen in den Jahren 2009 – 2013. Die staatliche Einwirkung durch die Steuererhebung hatte also enorme Auswirkungen auf die tatsächlichen Preise.

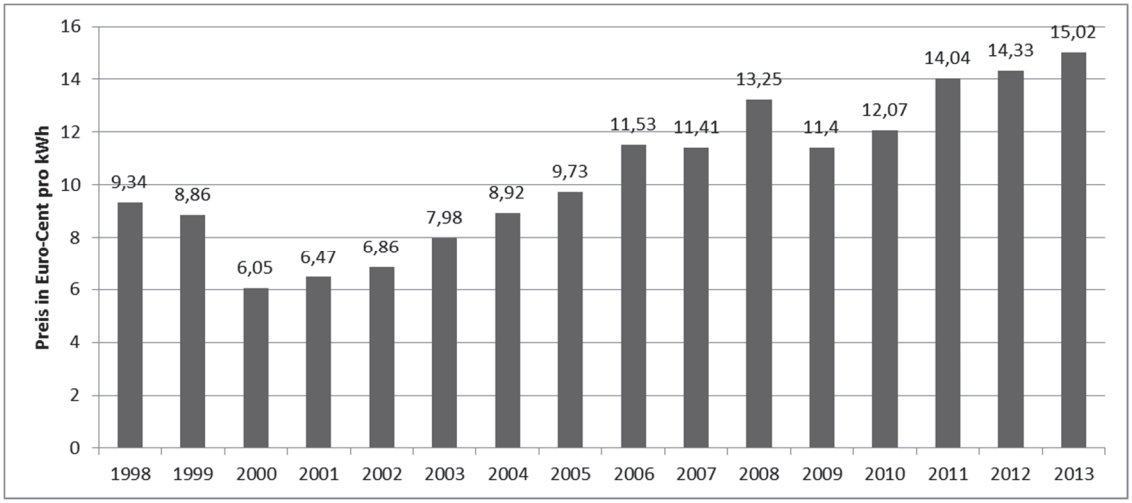



**Abbildung 39:** Industriestrompreise* (inklusive Stromsteuer) in Deutschland in den Jahren 1998 bis 2013 (in Euro-Cent pro Kilowattstunde)[71]

Für die Projektion des Industriestrompreises in die Zukunft bedeutet dies, dass mögliche staatliche Eingriffe einen hohen Stellenwert für die zukünftige Preisentwicklung haben. Diese muss demnach neben Fortschritten bei Technologien zur Energiegewinnung berücksichtigt werden.

Da der Deskriptor Industriestrompreis folglich von vielen Faktoren stark beeinflusst werden kann, werden drei **Projektionen** berücksichtigt:

- Der Industriestrompreis **sinkt**.
- Der Industriestrompreis **bleibt gleich**.
- Der Industriestrompreis **steigt**.

Die gewählte Ausprägung wird anschließend in den einzelnen Szenarien detailliert begründet.

### 5.3.2 Forschungsstand der Materialien

Für den Einflussbereich *Forschungsstand der Materialien* (FS Materialien) wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Förderung von Materialforschung
- Patentanmeldungen in der Chemiebranche.

#### 5.3.2.1 Förderung von Materialforschung

Mit der steigenden Anzahl an Materialien, die für den 3D-Druck verwendet werden können, steigt die Anzahl der Anwendungsgebiete. So gibt es mittlerweile auch die Möglichkeit, Stahlkonstruktionen zu

[71] Vgl. Statista (2014f)

drucken.[72] Da in der Medizintechnik schon bioaktive Materialien eingesetzt werden, ist auch eine Ausweitung von Nanomaterialien, die spezifische Eigenschaften erfüllen, denkbar. Die Bundesausgaben in Deutschland für Nano- und Werkstofftechnologien waren beispielsweise in den letzten Jahren sehr konstant.[73] Das Potential, das speziell diese Technologie bietet, wurde jedoch erkannt und für das Jahr 2015 ein eigener Aktionsplan aufgestellt.[74]

Da zukünftigen Anforderungen an die Materialien, wie z. B. Energieeffizienz, nicht mehr mit existierenden Materialien gelöst werden können, kommt der Materialforschung eine hohe Bedeutung zu. Die Projektionen werden deshalb wie folgt gewählt:

- Die Förderung der Materialforschung **bleibt gleich**.
- Die Förderung der Materialforschung **steigt**.

#### 5.3.2.2 Patentanmeldungen in der Chemiebranche

Patentdaten können Aufschluss darüber geben, wie intensiv Unternehmen sich mit einem Thema beschäftigen und welche Fortschritte erzielt werden. Unternehmen nutzen Patente, um ihre Ideen zu schützen und für einen definierten Zeitraum eine monopolistische Stellung im Markt einzunehmen. Als Indikator für die Materialforschung werden die Patentanmeldungen der Chemiebranche gewählt.

In Abbildung 40 sind die Wachstumsraten der europäischen Patentanmeldungen einzelner Branchen im letzten Jahrzehnt dargestellt. Der Fokus liegt dabei auf den Anteilen von gesundheitsbezogenen Teilbereichen. Interessant ist jedoch, dass die Patentanmeldungen in der Chemiebranche sehr viel stärker gewachsen sind (21,2 %) als im Maschinenbau (13,8 %) oder der Elektrotechnik (17,1 %). Im Unternehmensvergleich belegte der Chemiekonzern BASF im Jahr 2013 mit 1577 Patentanträgen Platz 5 der Unternehmen mit den meisten Patentanträgen (Abbildung 41).

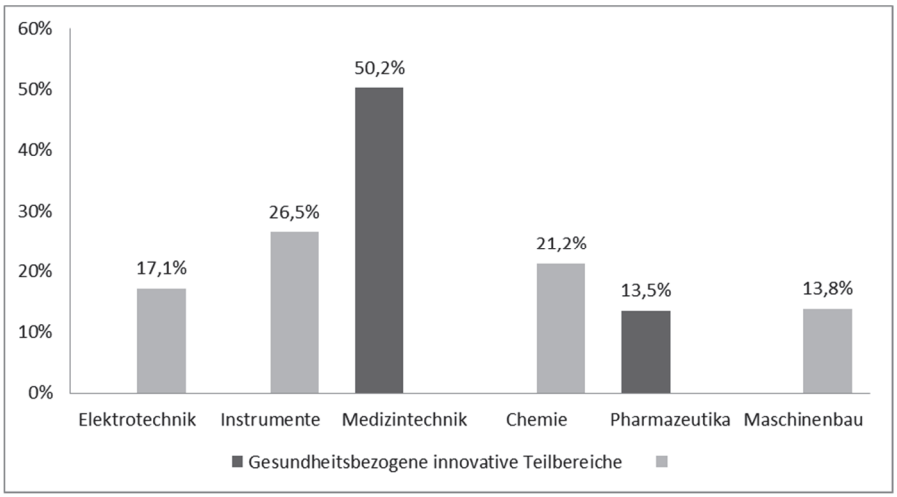



**Abbildung 40:** Europäische Patentanmeldungen 2001–2010, Wachstumsraten der Periode 2006–2010 gegenüber 2001–2005[75]

[72] Vgl. Stott (2014)
[73] Vgl. Statista (2014g)
[74] Vgl. BMBF (o. J.)
[75] Vgl. HWWI (2012), S. 25

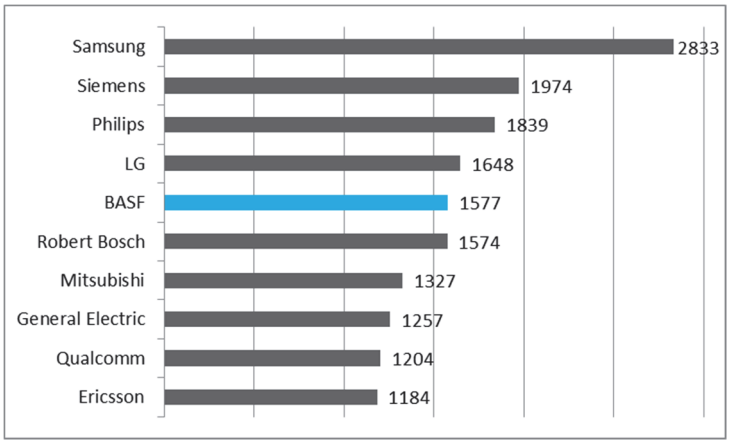



**Abbildung 41:** Die 10 Unternehmen mit den meisten Patentanträgen 2013[76]

Aufgrund der Tendenz in Abbildung 40 wird ein Rückgang der Patentanmeldungen in den nächsten 20 - 30 Jahren ausgeschlossen. Daraus ergeben sich folgende Projektionen:

- Die Patentanmeldungen in der Chemiebranche **bleiben gleich**.
- Die Patentanmeldungen in der Chemiebranche **steigen**.

### 5.3.3 Druckqualität und Drucktechnik

Für den Einflussbereich *Druckqualität und Drucktechnik* wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Druckgeschwindigkeit
- Schichthöhe.

#### 5.3.3.1 Druckgeschwindigkeit und Schichthöhe

Dem Marktforschungsinstitut Gartner zufolge wird der 3D-Druck bereits im Jahr 2016 zu einer Mainstream-Technologie geworden sein.[77] Zu diesem Zeitpunkt kann der Endverbraucher im Prinzip alles selbst drucken, z. B. Ersatzteile für Ikea-Möbel oder Haushaltsgeräte.[78] Allerdings ist dieses Szenario nur denkbar, wenn die Einschränkungen des 3D-Drucks überwunden werden können (langsame Druckgeschwindigkeit). Sowohl die Schichthöhe, als auch die Druckgeschwindigkeit haben gravierenden Einfluss auf die Qualität und Druckdauer des Produkts (Kapitel 5.1). Ein großer Nachteil des 3D-Drucks ist, dass die Objekte nicht auf einmal erstellt werden, sondern Schicht auf Schicht aufgetragen wird – und das dauert Stunden oder sogar Tage.[79] Die zur Reduktion der Druckdauer maßgeblichen Faktoren sind demzufolge einerseits die Schichthöhe und andererseits die Druckgeschwindigkeit. Nicht zu vernachlässigen ist der Zusammenhang dieser beiden Deskriptoren mit der Qualität. Wird nämlich die Schichthöhe erhöht, so geht dies bei heutigem Stand der Technologie zu Lasten der Qualität. Kann die 3D-Drucktechnologie nicht in den beiden genannten Punkten verbessert werden, wird der 3D-

[76] Vgl. European Patent Organisation (2013)
[77] Vgl. Marwan (2013)
[78] Vgl. Fuchs (2013)
[79] Vgl. Kerkmann (2013)

Druck in der Massenfertigung keinen Einsatz finden, sondern eher in der Kleinserienfertigung und für Sonderanfertigungen verwendet werden.

Die 3D-Drucktechnologie muss demnach für vielfältigere Einsatzzwecke weiterentwickelt werden. Vor allem der Druckgeschwindigkeit und der Schichthöhe kommt eine hohe Bedeutung zu. Die Projektionen werden deshalb wie folgt gewählt:

- Die Druckgeschwindigkeit **bleibt gleich**.
- Die Druckgeschwindigkeit **steigt**.
- Die Schichthöhe **sinkt**.
- Die Schichthöhe **bleibt gleich**.
- Die Schichthöhe **steigt**.

### 5.3.4 Absatzmarktentwicklung

Für den Einflussbereich *Absatzmarktentwicklung* wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Exportanteil in die eigene Region
- Welthandel.

#### 5.3.4.1 Exportanteil in die eigene Region

Laut einer Studie der World Trade Organisation exportieren Länder hauptsächlich in die eigene Region.[80] So sind 2010 beispielsweise fast die Hälfte (49%) der Exporte in Nordamerika innerhalb Nordamerikas und in Europa haben im gleichen Jahr 71% der Exporte den Kontinent nicht verlassen.

Im Hinblick auf die 3D-Drucktechnik, die es ermöglicht, ein CAD-Modell zu verschicken, um es an einem anderen Ort zu drucken, ist es interessant, wie weit die Transportwege tatsächlich sind und wie groß die Vorteile sind, die sich bei einem Verzicht auf einen Transport ergeben.

Der überregionale Export wird neben einer bestehenden Nachfrage durch andere Faktoren beeinflusst, wie z. B. Zölle, Transportkosten oder das Vorhandensein regionaler Anbieter. Vor allem politische Entscheidungen können hier ausschlaggebend sein wie das geplante Freihandelsabkommen zwischen der EU und der USA.[81] Da analog zum Deskriptor Welthandel (s. u.) mit einer zunehmenden Globalisierung zu rechnen ist, wurden folgende Projektionen gewählt:

- Der Exportanteil in die eigene Region **sinkt** und es kommt zu einem verstärkten überregionalen Handel.
- Der Exportanteil in die eigene Region **bleibt gleich**, falls lange Transportwege ein starkes negatives Kriterium sind.

[80] Vgl. World Trade Organisation (2011), S. 2ff.
[81] Vgl. European Commission (o. J.)

#### 5.3.4.2 Welthandel

Der Welthandel bzw. das weltweite Handelsvolumen wird typischerweise am weltweiten Gesamtwert der Exporte gemessen. Die Entwicklung des Handelsvolumens soll grob aufzeigen wie global die nationalen Industrien weltweit agieren und wie international die Unternehmen ausgerichtet sind. Abbildung 42 zeigt das absolute Exportvolumen von 1950 – 2012.

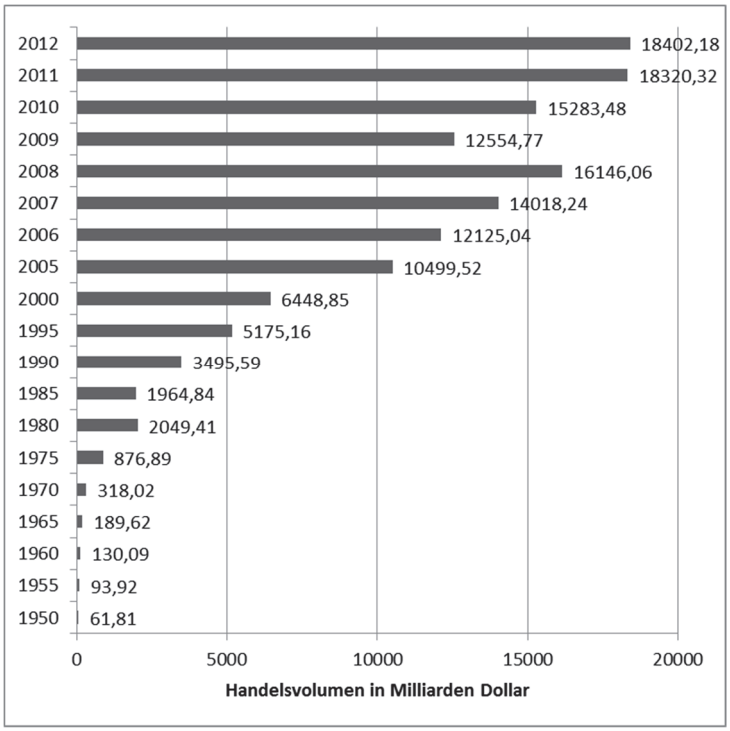



**Abbildung 42:** Entwicklung des weltweiten Handelsvolumens im Warenhandel von 1950 bis 2012 (in Milliarden US-Dollar)[82]

Gerade um die Jahrtausendwende zeigt sich ein starker Anstieg des Welthandels. Abgesehen von dem Einbruch 2009 aufgrund der Wirtschaftskrise hält dieses Wachstum auch an. Laut einer Studie der Hongkong & Shanghai Banking Corporation Holdings (HSBC) soll das weltweite Handelsvolumen bis 2030 um 8% pro Jahr steigen und der Anteil von Infrastrukturgütern im Jahr 2030 auf fast ein vierfaches ansteigen und über 50% des Gesamtvolumens betragen.[83] Demnach wächst der Welthandel bis dahin exponentiell. Über den prognostizierten Anstieg des Welthandels gibt es zwar unterschiedliche Voraussagen, über einen Anstieg herrscht jedoch Einigkeit.

Die Projektionen des Welthandels sind deshalb beide steigend und unterscheiden sich nur in der Höhe des Wachstums (Abbildung 43). Der Welthandel steigt also kurz formuliert entweder **stark** oder **sehr stark**.

[82] Vgl. Statista (2014h)
[83] Vgl. HSBC (2013), S. 1ff

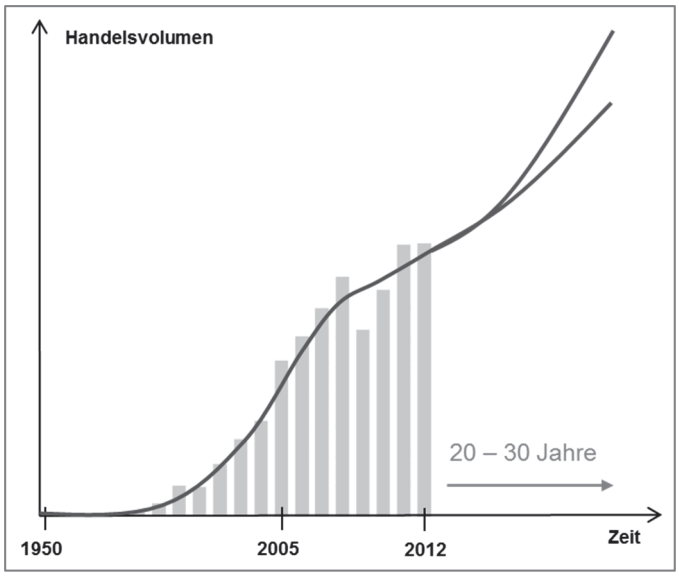



**Abbildung 43:** Projektion des Welthandels[84]

### 5.3.5 Individualisierung

Für den Einflussbereich *Individualisierung* wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Kundennachfrage
- Einfluss auf den Unternehmenserfolg.

#### 5.3.5.1 Kundennachfrage

Die Entwicklung der Nachfrage der Kunden nach individualisierten Produkten steigt stetig. Ein Artikel der Zeitschrift *Die Welt* von Andre Tauber, beschreibt den Kunden der Zukunft wie folgt: „Der Kunde der Zukunft sei immer mehr ein Individualist, der kaum mehr Kompromisse akzeptiert.“[85] Eine bei Kunden sehr beliebte Art der Individualisierung von Produkten ist heutzutage das Baukastenprinzip. Ob Hemden, Torten oder Müsli: Immer mehr Kunden stellen sich ihre Produkte im Internet nach diesem Prinzip zusammen.[86] Diese Entwicklung unterstützt die Verbreitung und den Einzug des 3D-Drucks in die Fabrik der Zukunft in enormem Maße. Mit dieser Produktionstechnologie können individualisierte Produkte vom Kunden selbst kreiert werden und mittels 3D-Druck produziert werden.

Deshalb werden die Projektionen wie folgt gewählt:

- Die Kundennachfrage **sinkt**.
- Die Kundennachfrage **bleibt gleich**.
- Die Kundennachfrage **steigt**.

[84] Vgl. Statista (2014h)
[85] Tauber (2012)
[86] Vgl. Tauber (2012)

#### 5.3.5.2 Einfluss auf den Unternehmenserfolg

Der Einfluss der Individualisierung auf den Unternehmenserfolg spiegelt sich vor allem bei Expertenumfragen und Trendanalysen wider. Eine Statistik, die den Einfluss von generellen Megatrends auf Unternehmen untersucht, kommt zu dem Ergebnis, dass 70% der befragten Unternehmen angeben, dass Produktvielfalt und Individualisierung der Angebote entscheidenden Einfluss auf den Unternehmenserfolg haben (Abbildung 44). Durch den Konsumententrend *Individualisierte Produkte* und den Branchentrend *Let the custumer design* (Abbildung 27**,** Kapitel 5.2.1) wird der Einfluss von individualisiertem Produktangebot auf den Unternehmenserfolg verstärkt.

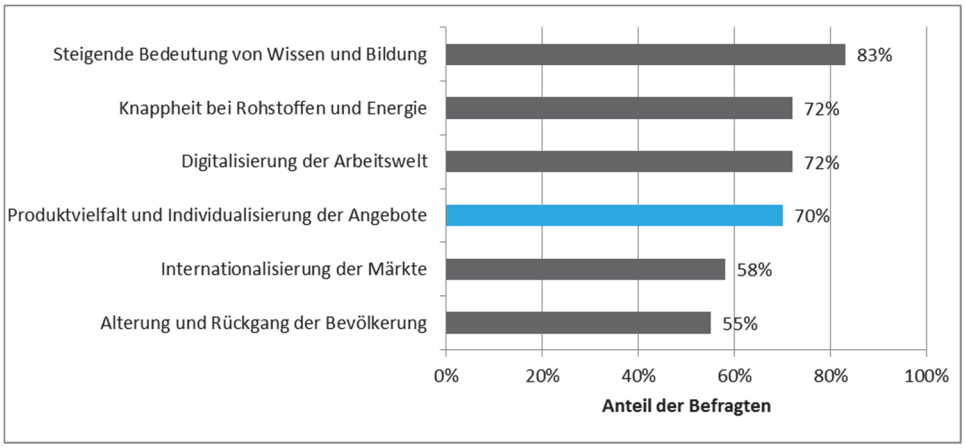



**Abbildung 44:** Auswirkung von Megatrends auf Unternehmen[87]

### 5.3.6 Produktionsform

Für den Einflussbereich *Produktionsform* wurden folgende Deskriptoren identifiziert:

- Anteil der Massenfertigung.

#### 5.3.6.1 Anteil der Massenfertigung

Eine ausgereifte 3D-Drucktechnologie hat das Potenzial, die industriellen Herstellungsprozesse zu revolutionieren. Allerdings bedarf es noch einiger Zeit bis es tatsächlich so weit kommen könnte. Der Redakteur Jochen G. Fuchs schreibt beispielsweise in einem Artikel der Webseite t3n – digital pioneers: „Weit ab von der industriellen Nutzung in der Massenfertigung und noch zu unausgereift für eine Anwendung in einer produktiven Umgebung.“[88] Wenn der 3D-Druck allerdings so ausgereift ist, dass er ebenfalls zur Massenfertigung verwendet werden kann, hat dies einen enormen Einfluss auf die Industrie. Einer Studie von Roland Berger zufolge haben Forscher neue 3D-druckfähige Materialien entwickelt und Prozesse so verbessert, dass der 3D-Druck mittels additivem Verfahren vor dem endgültigen Durchbruch steht. "Die Herstellung von dreidimensionalen Objekten mithilfe von 3D-Druckern für metallische Strukturen (‚Additive Manufacturing‘) könnte schon bald in der Serienproduktion eingesetzt werden"[89], so die Studie.

[87] Vgl. Statista (2014i)
[88] Fuchs (2013)
[89] Roland Berger o. J.

Daraus ergeben sich folgende Projektionen:

- Der Anteil an der Massenfertigung **sinkt**.
- Der Anteil an der Massenfertigung **bleibt gleich**.
- Der Anteil an der Massenfertigung **steigt**.

## 5.4 Alternativenbündelung

**Zusammenfassung**

Aus den Projektionen werden drei verschiedene Projektionsbündel zusammengefasst. Jedes Projektionsbündel stellt eines der Szenarien dar, die in Kapitel 5.5 näher beschrieben werden.

Bei der Alternativenbündelung werden die Projektionen der Deskriptoren zu Projektionsbündeln zusammengefasst. Ziel ist es, Projektionsbündel zu erhalten, die in einem späteren Schritt als Szenario ausformuliert werden können. Ein Projektionsbündel beinhaltet für jeden Deskriptor eine Projektion. Die Projektionen in einem Bündel müssen untereinander konsistent und stabil sein, sich also weder inhaltlich widersprechen noch anfällig für Schwankungen einzelner Projektionen sein. Des Weiteren sollten sich die Projektionsbündel in ihren Ausprägungen weitestgehend unterscheiden, um unterschiedliche Grundtypen der Szenarien zu ermöglichen und eine frühzeitige Einschränkung zu verhindern. Die Bündel werden im paarweisen Vergleich sukzessive zusammengefasst.

Bei den Projektionsbündeln handelt es sich um das Grundgerüst der Szenarien. Für das Erstellen von Projektionsbündeln wird ein schrittweises Vorgehen mittels Paarvergleich angewendet. Die einzelnen Projektionen stellen dabei die Ausprägungen der Deskriptoren dar. Als Ausgangspunkt für die Projektionsbündel werden u. a. verschiedene Projektionen des Einflussfaktors *Energiekosten* gewählt, da dieser Einflussfaktor eine große Bedeutung für die energieintensiven Druckmethoden besitzt und weil sich nationale oder globale Energiekostenentwicklungen nicht im unmittelbaren Einflussbereich der Unternehmen befinden. Auf dieser Basis werden anschließend paarweise Projektionen ausgewählt, die inhaltlich mit den bereits gewählten Projektionen konsistent sind. Im Folgenden werden die drei Projektionsbündel dargestellt und kurz erläutert.

### 5.4.1 Projektionsbündel 1

| Einfluss-Niveau | Einfluss-bereich | Einfluss-faktor | Deskriptor | Projektion | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ausprägungen | Gesellschaft, Umwelt und Politik | Energie-kosten | Anteil an der Bruttowert-schöpfung | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | CO2-Ausstoß | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Industrie-strompreis | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Technologie | FS Materialien | Förderung von Materialforschung | | bleibt | steigt | |
| | | | Patentanmeld-ungen in Chemie-branche | | bleibt | steigt | |
| | | Druckqualität / -technik | Druck-geschwindigkeit | | bleibt | steigt | |
| | | | Schichthöhe | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Markt | Absatzmarkt-entwicklung | Exportanteil in eigene Region | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Welthandel | | | steigt | steigt stark |
| | | Individual-isierung | Kundennachfrage | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Einfluss auf Unternehmens-erfolg | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Branche | Produktions-form | Massenfertigung | sinkt | bleibt | steigt | |

**Abbildung 45:** Morphologische Analyse: Projektionsbündel 1

Ausgangspunkt für das erste Projektionsbündel ist ein steigender Industriestrompreis, der sich durch staatliche Eingriffe und die Substitution von fossilen Energieträgern ergibt (Abbildung 45). Dies hat eine Senkung des CO2-Ausstoßes zufolge. Der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung steigt jedoch, zum einen durch die steigenden Strompreise, zum anderen weil Strom aus erneuerbaren Energien Hauptenergiequelle ist. Energieeffiziente Wertschöpfungsketten und Produkte gewinnen an Bedeutung, woraus große Anreize für energiesparende und ökologische Materialien bestehen. Demzufolge steigen die Förderung der Materialforschung und die Patentanmeldungen für neue Materialien. Die Druckqualität bleibt bestehen und wird weniger stark durch die anderen Projektionen beeinflusst. Auch die Absatzmarktentwicklung setzt ihren Trend fort. Der Exportanteil in die eigene Region bleibt gleich. Zwar sind die Möglichkeiten für überregionalen Handel besser, unnötige Transportwege werden aber gemieden und führen zu einem Ausgleich. Der globale Handel steigt weiter an. Die Kundennachfrage nach individuellen Produkten verstärkt sich. Es handelt sich um einen Megatrend, der von den Projektionen nicht stark genug beeinflusst wird. Für die Unternehmen bedeutet dies, dass Individualisierungsmöglichkeiten ihrer Produkte wichtig für ihre Konkurrenzfähigkeit sind. Deshalb werden Fertigungsverfahren angewendet, die eine Individualisierung in unterschiedlichem Maße begünstigen.

### 5.4.2 Projektionsbündel 2

| Einfluss-Niveau | Einfluss-bereich | Einfluss-faktor | Deskriptor | Projektion | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ausprägungen | Gesellschaft, Umwelt und Politik | Energie-kosten | Anteil an der Bruttowert-schöpfung | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | CO2-Ausstoß | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Industrie-strompreis | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Technologie | FS Materialien | Förderung von Materialforschung | | bleibt | steigt | |
| | | | Patentanmeld-ungen in Chemie-branche | | bleibt | steigt | |
| | | Druckqualität / -technik | Druck-geschwindigkeit | | bleibt | steigt | |
| | | | Schichthöhe | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Markt | Absatzmarkt-entwicklung | Exportanteil in eigene Region | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Welthandel | | | steigt | steigt stark |
| | | Individual-isierung | Kundennachfrage | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Einfluss auf Unternehmens-erfolg | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Branche | Produktions-form | Massenfertigung | sinkt | bleibt | steigt | |

**Abbildung 46:** Morphologische Analyse: Projektionsbündel 2

Ausgangspunkt für das zweite Projektionsbündel ist eine steigende Qualität und sinkende Kosten für Drucker im Heimgebrauch, die eine hohe Druckgeschwindigkeit und eine geringe Schichthöhe haben (Abbildung 46). Die Kundennachfrage für individuelle Produkte sinkt dadurch, da vieles zuhause gedruckt werden kann. Individuelle Produkte verlieren für Unternehmen an Bedeutung und haben einen sinkenden Einfluss auf den Unternehmenserfolg. Daraus resultiert eine Steigerung der Massenproduktion mit spezialisierten Produkten. Diese verlangen Materialien, die nicht zuhause gedruckt werden können. Dies führt zu einem Anstieg der Förderung der Materialforschung und der Patentanmeldungen, um mit Hochtechnologie erfolgreich zu bleiben. Dies führt zu globalen Supply Chains und einem sehr starken Anstieg des Welthandels. Auch regionale Exporte haben dadurch einen sinkenden Anteil am Welthandel. Der Industriestrompreis und der CO2-Ausstoss sind davon weniger betroffen. Der CO2-Ausstoß hält sein Niveau trotz der Steigerung des globalen Welthandels durch effizientere Energiegewinnung. Der Anteil an der Bruttowertschöpfung sinkt, da die Entwicklungskosten einen hohen Anteil haben.

### 5.4.3 Projektionsbündel 3

| Einfluss-Niveau | Einflussbereich | Einflussfaktor | Deskriptor | Projektion | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ausprägungen | Gesellschaft, Umwelt und Politik | Energiekosten | Anteil an der Bruttowertschöpfung | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | CO2-Ausstoß | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Industriestrompreis | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Technologie | FS Materialien | Förderung von Materialforschung | | bleibt | steigt | |
| | | | Patentanmeldungen in Chemiebranche | | bleibt | steigt | |
| | | Druckqualität / -technik | Druckgeschwindigkeit | | bleibt | steigt | |
| | | | Schichthöhe | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Markt | Absatzmarktentwicklung | Exportanteil in eigene Region | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Welthandel | | | steigt | steigt stark |
| | | Individualisierung | Kundennachfrage | sinkt | bleibt | steigt | |
| | | | Einfluss auf Unternehmenserfolg | sinkt | bleibt | steigt | |
| | Branche | Produktionsform | Massenfertigung | sinkt | bleibt | steigt | |

**Abbildung 47:** Morphologische Analyse: Projektionsbündel 3

Ausgangspunkt für das dritte Projektionsbündel sind sinkende Strompreise (Abbildung 47). Diese resultieren aus einer verbesserten Effizienz der Technologien zur Energiegewinnung. Die fallenden Strompreise führen zu einem weltweiten Aufschwung und einer Steigerung der Produktion. Dies spiegelt sich durch einen stark steigenden Welthandel und einen sinkenden Anteil der Exporte in die eigene Region wider, da lange Transportwege nicht stark negativ ins Gewicht fallen. Die Nachfrage nach personalisierten Produkten steigt, da keine hohen Preise der Produkte die Nachfrage bremsen. Für die Unternehmen haben individualisierte Produkte somit einen hohen Einfluss auf den Unternehmenserfolg. Folglich sinken die Losgrößen und der Anteil der Massenproduktion. Die Druckqualität und Drucktechnik verbessert sich, da geringe Schichthöhen benutzt werden können, ohne dass die Energiekosten zu stark ansteigen. Die Druckgeschwindigkeit ändert sich jedoch nicht. Die sinkenden Strompreise wirken sich direkt auf den Anteil der Energiekosten aus, der dadurch sinkt. Der CO2-Ausstoß bleibt gleich, da sich die effizienteren Methoden zur Energiegewinnung mit dem Anstieg der Produktion ausgleichen. Für eine Intensivierung der Materialforschung und für Patentanmeldungen fehlen die Anreize.

Im folgenden Kapitel werden aus den Projektionsbündeln Szenarien entwickelt (Kapitel 5.5).[90]

[90] Die Nummerierung der Szenarien entspricht der Nummerierung der Projektionsbündel.

## 5.5 Beschreibung der Szenarien

**Zusammenfassung**

Im Szenario „A Convenient Truth“ konzentriert sich die Produktion auf kundennahe Standorte. Staatliche Eingriffe und die Erforschung umweltfreundlicher Materialien begrenzen den CO2-Ausstoß. Umweltfreundliche Herstellungsprozesse und individualisierte Produkte gehören zu den wichtigsten Kundenanforderungen.

Das Szenario „Do-It-Yourself“ ist charakterisiert durch die Möglichkeit eines kostengünstigen und qualitativ hochwertigen 3D-Drucks. Dieser ermöglicht die Anwendung im Haushalt und zwingt die Unternehmen, hochtechnologische Produkte kostengünstig herzustellen, um der fallenden Nachfrage nach individualisierten Produkten entgegenzuwirken.

Im Szenario „The Rebound Effect“ führen technologische Fortschritte bei der Energiegewinnung zu mehr Effizienz und niedrigen Energiekosten. Das resultierende Wirtschaftswachstum und die gesteigerte Produktion verhindern jedoch eine globale Senkung des CO2-Ausstoßes. Konkrete Anreize in der Materialforschung fehlen durch die niedrigen Produktionskosten.

In diesem Kapitel werden drei Szenarien beschrieben, denen jeweils ein Projektionsbündel zugrunde liegt. Jedes Szenario enthält eine kurze Übersicht über die Auswirkung auf die einzelnen Einflussbereiche. Diese entstehen durch eine inhaltliche Verknüpfung der Projektionen eines Bündels.

### 5.5.1 Szenario 1: A Convenient Truth

**Wirtschaft**

Vor allem in nahen Ballungsräumen steigt die Zahl der Unternehmensstandorte an, da einerseits durch die staatliche Regulierung lange Transporte unterbunden werden und andererseits die Kunden das Bewusstsein entwickelt haben, dass es überflüssig und zusätzlich umweltschädlich ist, Produkte aus weit entfernten Regionen zu beziehen. Zum Großteil werden Teile deshalb kundennah produziert. Dies ist mittels 3D-Druck bedeutend einfacher geworden. Rohstoff- und Materialkosten für Unternehmen entwickeln sich moderat.

**Gesellschaft, Umwelt und Politik**

Die Energiekosten erreichen einen sehr hohen Stand, der sich aus der Knappheit von fossilen Energieträgern ergibt. Einerseits wird der CO2-Ausstoß durch die Reduzierung der Verwendung von fossilen Brennstoffen gesenkt. Andererseits sinkt er durch die hohe staatliche Regulierung, um einer weiteren Verknappung dieser Rohstoffe entgegenzuwirken und den CO2-Ausstoß zu reduzieren. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern existieren ausreichend Rohstoffe, welche für den 3D-Druck verwendet werden können. Des Weiteren ist der Auf- bzw. Ausbau der digitalen Infrastruktur nahezu vollständig abgeschlossen.

**Technologie**

Vor allem durch die Beschränkung der fossilen Energieträger und der staatlichen Eingriffe steigen die Investitionen im Bereich der Materialforschung stark an. Durch die verstärkte Forschung und die damit

einhergehenden Erkenntnisse ist die Druckqualität auf einem guten Stand angekommen und es können immer mehr Materialien für die Produktionstechnik 3D-Druck erschlossen werden. Besonders im Bereich der biologischen Druckmaterialien und des automatisierten Bestell- und Druckvorgangs werden große Fortschritte erzielt. Dieser Erfolg ist nicht zuletzt auf die verbesserte Kompatibilität der verschiedenen Anwendungssysteme des 3D-Drucks zurückzuführen.

**Branche**

Der Trend im produzierenden Gewerbe wandelt sich aufgrund von sinkender Nachfrage nach Massengütern und steigender Nachfrage nach individualisierten Produkten. Effiziente und umweltfreundliche Produktionsprozesse sind dringend erforderlich.

**Markt**

Das Kundenbewusstsein hat sich dahingehend verändert, dass sich eine hohe Nachfrage nach individualisierten Produkten entwickelt hat. Dies hat zur Folge, dass Unternehmen, die dem Kundenwunsch entsprechende Produkte anbieten einen Wettbewerbsvorteil erlangen.

### 5.5.2 Szenario 2: Do-It-Yourself

**Wirtschaft**

Besonders im Bereich der Forschung zahlen sich die hohen Investitionen der vergangenen Jahre aus. Es wurde eine Vielzahl von neuen Druckmaterialien entdeckt und die Druckqualität und -geschwindigkeit wurden stark verbessert. Diese Forschungsergebnisse haben den Vormarsch des 3D-Drucks weiter verstärkt und bieten für Unternehmen zahlreiche Differenzierungsmöglichkeiten.

**Gesellschaft, Umwelt und Politik**

Die Energiekosten sind in den letzten Jahren kaum merklich gestiegen.

**Technologie**

Durch die verstärkte Forschung der letzten Jahre erreichte die Druckqualität ein höheres Level. Die Verbesserung der Druckgeschwindigkeit und die gleichzeitige Verringerung der Schichthöhe ohne Qualitätsverlust sowie die Reduzierung der Anschaffungskosten eines 3D-Druckers haben dem 3D-Druck den Weg in die Haushalte geebnet.

**Branche**

Der Einzug des 3D-Druckers in die Haushalte hat in der Industrie einen Wandel ausgelöst. Dort, wo früher dem Kundenwunsch entsprechend produziert wurde, wird heutzutage ein Einheitsprodukt hergestellt. Grund dafür ist die gesunkene Nachfrage nach individualisierten Produkten, weil die Kunden mittlerweile einen Großteil ihrer Produkte bequem zuhause drucken können.

**Markt**

Die Veränderung des Kundenverhaltens führt zu einem Umdenken, weg von Einzelfertigung und individualisierten Produkten, hin zu riesigen globalen Supply Chains und Massenproduktionen mit hohen Stückzahlen. Besonders erfolgreich sind hochtechnologische Produkte, die nicht durch einen einfachen 3D-Druck hergestellt werden können.

### 5.5.3 Szenario 3: The Rebound Effect

**Wirtschaft**

Das Wirtschaftswachstum hat weltweit stetig zugenommen, da die Produktionskosten sehr gering sind. Es wird überwiegend kundennah produziert, um schnelle Lieferzeiten zu gewährleisten.

**Gesellschaft, Umwelt und Politik**

Der technologische Fortschritt in der Energiebranche der letzten Jahre zahlt sich aus. Dies führt einerseits zu rückläufigen Energiekosten und andererseits zu einer umweltfreundlicheren Energiegewinnung durch Verringerung des CO2-Ausstoßes. Die Produktion wurde, angetrieben durch die Einsparung von Energiekosten, über nahezu alle Branchen hochgefahren. Von Seiten der Gesetzgebung wurden präventive Maßnahmen zur Regulierung von Überproduktion versäumt. Dies hat zur Folge, dass trotz effizienterer und umweltfreundlicher Energiegewinnung der CO2-Ausstoß nicht gesenkt werden konnte.

**Technologie**

Die niedrigen Energiekosten geben wenig Anreiz zur weiteren Forschung im Bereich des 3D-Drucks, da der Kostentreiber Energie auf ein Minimum gesunken ist. Des Weiteren hat der 3D-Druck bereits einen so hohen technischen Stand erreicht, dass er als leistungsstärkste Produktionsmethode angesehen wird. Ein weiterer Vorteil ist die nahezu vollständige Automatisierung eines Großteils der Produktionsprozesse. Auch im Bereich der Materialforschung sind rückläufige Investitionen zu beobachten.

**Branche**

Vor allem die Industrie profitiert von den Möglichkeiten des 3D-Drucks, da er leistungsstark und geeignet für die Massenproduktion ist. Außerdem ermöglicht der 3D-Druck eine äußerst flexible Produktion, wo früher lange und kostspielige Umrüstungen der Maschinen vorgenommen werden mussten.

**Markt**

Sowohl Angebot als auch Nachfrage auf den globalen Märkten steigen, angetrieben durch die gute Konjunktur. Die verkürzten Produktlebenszyklen sowie der tendenziell sinkende Produktpreis am Markt verstärken diesen Effekt noch zusätzlich.

## 5.6 Störereignisanalyse

**Zusammenfassung**

Durch den Ausbruch eines dritten Weltkrieges verliert das Szenario „A Convenient Truth“ seine grundlegende Charakteristik. Die Priorität der Bevölkerung ist nicht mehr ein umweltfreundlicher Lebensstil, sondern Existenzsicherung. Der 3D-Druck wird genutzt, materielle Notstände in der Bevölkerung auszugleichen, da die Produktion der Unternehmen flexibel umgestellt werden kann.

Ein Ausfall des Internets führt im Szenario „Do-it-yourself“ zu einem kurzfristigen Einbruch der Weltwirtschaft. Langfristig kann durch den Wechsel auf traditionelle bzw. veraltete Informations- und Kommunikationsmittel Stabilität einkehren. Für den Kunden eignet sich der 3D-Druck zuhause nicht mehr. Individualisierte Produkte werden bei den Unternehmen wieder verstärkt nachgefragt.

Im Szenario „The Rebound Effect“ führt eine Ölkrise dazu, dass auf ölunabhängige Materialien zurückgegriffen werden muss. Diese bestehen zu großen Teilen schon oder erhalten in der Materialforschung einen Aufschwung. Da die Anwendung des 3D-Drucks nur den Austausch des Druckmaterials und keine Umstellung der Fertigungsmethode ermöglicht, kann die kurzfristige Rezession verhindert werden. Ökologieorientierte Produktionsmethoden gewinnen die Oberhand, das Szenario nähert sich dem Szenario „A Convenient Truth“ an.

Das Ziel der Störereignisanalyse ist es, auch Ereignisse, die sehr unwahrscheinlich sind, jedoch große Auswirkungen auf die Zukunft haben, zu berücksichtigen. Diese sogenannten „Wild Cards“ werden als Störereignis auf die Szenarien angewendet, indem die Auswirkung auf die Projektionen der Szenarien analysiert wird. Aus einer Sammlung von Störereignissen, die mittels Kreativitätstechniken wie Brainwriting ermittelt wurde, wurden drei Störereignisse ausgewählt, die im Kontext des Betrachtungsgegenstands die vermutlich größten Auswirkungen erzielen. Diese besitzen zwar geringe Eintrittswahrscheinlichkeiten, sind aber nicht völlig unrealistisch. Ähnlich wurde auch bei der Verknüpfung von Störereignis und Szenario vorgegangen. Auf jedes Szenario wird dasjenige Störereignis angewendet, das die vermutete größte Auswirkung besitzt.

### 5.6.1 Störereignis 1: 3. Weltkrieg

Das erste Störereignis bezieht sich auf das Szenario „A Convenient Truth“. Untersucht wird die Auswirkung eines dritten Weltkriegs auf das erste Projektionsbündel. Die deutlichsten Auswirkungen auf die Projektionen sind in Abbildung 48 rot dargestellt.

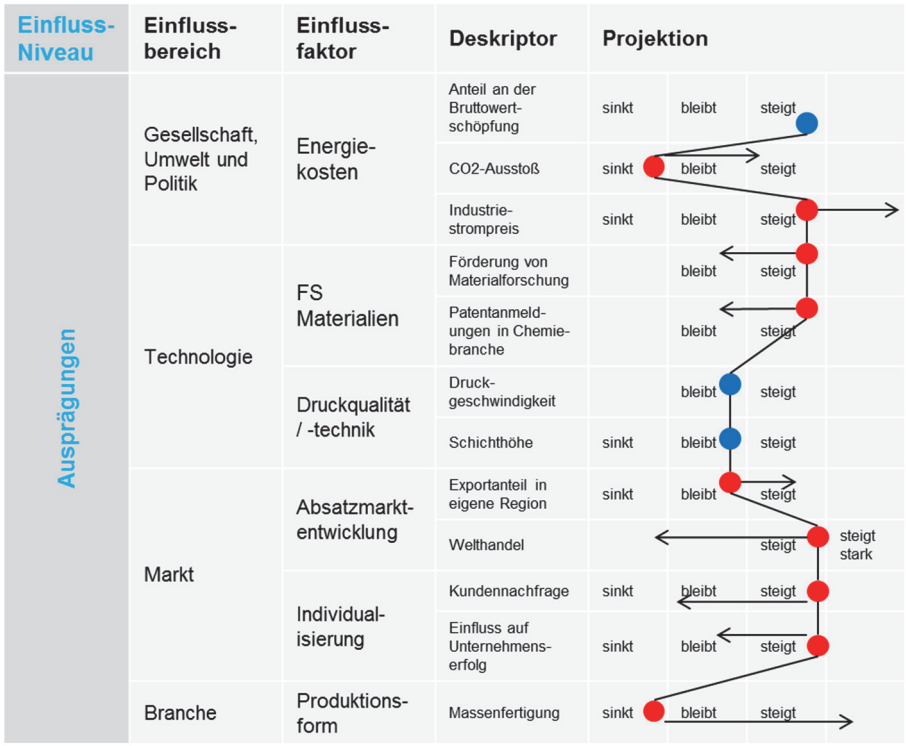



**Abbildung 48:** Auswirkung des ersten Störereignisses auf die Projektionen

Der Ausbruch eines dritten Weltkrieges bedeutet für die Wirtschaft eine Umstellung der Produktion auf Kriegsmittel. Waffen und andere Geräte können mittels 3D-Druck hergestellt werden und die grundlegende Bedarfsdeckung aufrechterhalten werden.

Der Produktionsanstieg für militärische Güter führt jedoch zu einem verstärkten CO2-Ausstoß und zu einer Verknappung der Energieressourcen. Diese spiegeln sich in einem weiteren extremen Anstieg der Strompreise wider.

Staatliche Förderungen inklusive der Förderung der Materialforschung werden eingestellt. Die Forschung und Entwicklung der Unternehmen erlahmt und führt zu einem Rückgang der Patentanmeldungen in der Chemiebranche. Die Entwicklung von Materialien, die militärisch eingesetzt werden, bleibt bestehen.

Handelsboykotte und außenpolitische Spannungen führen zu einem drastischen Rückgang des Welthandels. Die Staaten beschränken sich auf Exporte zu geografisch nahegelegenen Bündnispartnern.

Individualisierte Produkte stellen Luxusgüter dar und werden kaum mehr nachgefragt. Oberste Priorität der Bevölkerung ist es, den Grundbedarf an Nahrung und überlebenswichtigen Haushaltsgegenständen zu decken. Für Freizeitprodukte ist in der Konsumgüterindustrie kein Platz mehr. Die Unternehmen gleichen ihre Produktion dem Bedarf an. Entweder werden militärische Produkte hergestellt oder einfache Konsumgüter. Individualisierte Produkte haben keinen Einfluss mehr auf den Unternehmenserfolg. Einzig eine kurzfristige staatliche Unterstützung der Industrie wegen der Notstandssituation verhindert Firmenzusammenbrüche.

Die Massenfertigung steigt stark an, um den Bedarf der Bevölkerung so günstig wie möglich abzudecken.

Das Szenario „A Convenient Truth“ verliert seine grundlegende Charakteristik. Die Tendenz zu einem umweltfreundlichen Lebensstil wird durch die Verschiebung der Prioritäten der Bevölkerung vollständig aufgehoben. Die Menschen konzentrieren sich darauf, ihre Existenz zu sichern. Fragen zu Umweltproblemen rücken dabei in den Hintergrund. Die Wirtschaft nimmt merkantilistische Züge an. Durch die Möglichkeit des 3D-Drucks können Aufgaben an die unterschiedlichsten Unternehmen verteilt werden, ohne dass eine gravierende Anpassung der Produktion nötig ist. Nur so ist es möglich, Notstände der Bevölkerung zu verhindern, zumindest bei Staaten, die nicht unmittelbar in militärische Aktionen verwickelt sind.

### 5.6.2 Störereignis 2: Ausfall des Internets

Das zweite Störereignis bezieht sich auf das Szenario „Do-It-Yourself“. Untersucht wird die Auswirkung eines Internetausfalls auf das zweite Projektionsbündel. Die deutlichsten Auswirkungen auf die Projektionen sind in Abbildung 49 rot dargestellt.

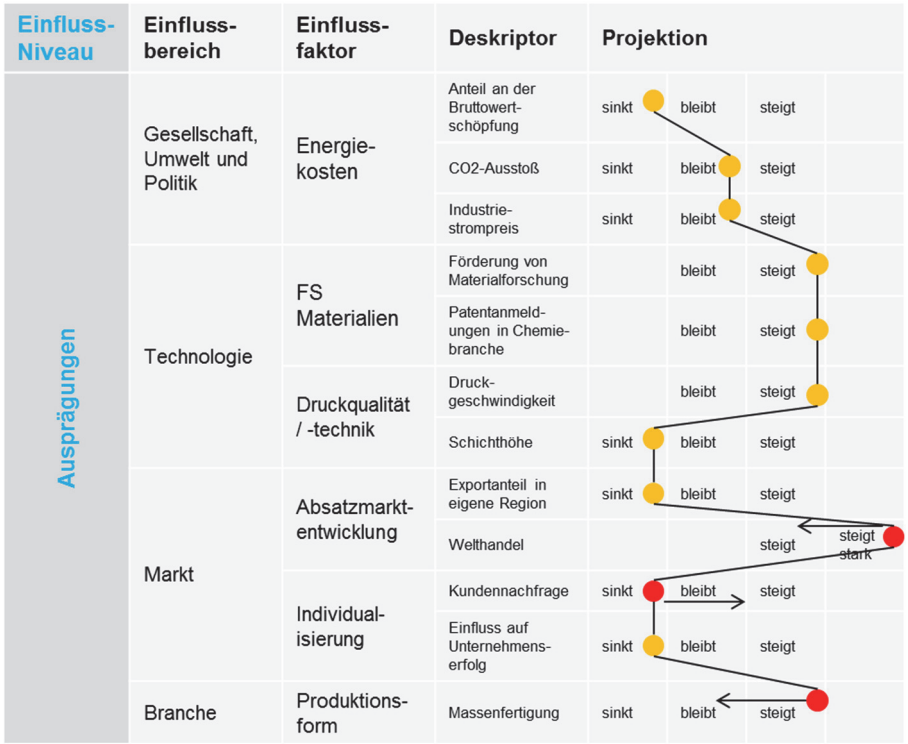



**Abbildung 49:** Auswirkung des zweiten Störereignisses auf die Projektionen

Ein Ausfall des Internets führt im Allgemeinen dazu, dass auf traditionelle bzw. in der Zukunft veraltete Kommunikationsmittel und Informationswege ausgewichen werden muss.

Die Möglichkeit, den 3D-Druck zuhause bequem zu nutzen, fällt durch das Störereignis vollständig weg, da keine CAD-Daten mehr heruntergeladen werden können. Einzige Möglichkeit wäre ein Verschicken der Daten auf dem Postweg, welche jedoch die grundlegenden Vorteile des Heimgebrauchs von 3D-Druckern wie Schnelligkeit und Bequemlichkeit ausschließt.

Da keine individuellen Produkte mehr zuhause gedruckt werden können, muss diese Aufgabe wieder von den Unternehmen übernommen werden. Die Kundennachfrage an die Unternehmen nach individuellen bzw. personifizierten Produkten steigt somit erneut an. Die Bedeutung der Spezialisierung der

Unternehmen bleibt jedoch bestehen. Der Einfluss auf den Unternehmenserfolg bleibt also gering, obwohl er tendenziell ansteigt.

Die Unternehmen müssen sich auf die neue Nachfrage einstellen und das steigende Kundenbedürfnis nach Individualisierung abdecken.

Auch vor der Einführung des Internets war eine funktionierende Wirtschaft möglich. Da jedoch ein Großteil der Unternehmensprozesse digitalisiert wurde, dauert es eine gewisse Zeit, um internetunabhängige Unternehmensprozesse neu einzuführen. Die Weltwirtschaft würde dies klar zu spüren bekommen und auch der Welthandel, der sehr stark von digitalen Kommunikationstechnologien abhängig ist, würde sich auf wesentliche Handelsaktivitäten beschränken.

Ein Komplettausfall des Internets ist zumindest für einen kurzen Zeitraum denkbar und hätte kurzfristig große Auswirkungen. Da es sich jedoch um eine Technologie handelt, die physikalischen Gesetzen unterliegt und deren Funktionalität beeinflusst werden kann, wirkt sich das Störereignis vergleichsweise milde auf das Szenario aus.

### 5.6.3 Störereignis 3: Ölkrise

Das dritte Störereignis bezieht sich auf das Szenario „The Rebound Effect“. Untersucht wird die Auswirkung einer Ölkrise auf das dritte Projektionsbündel. Die deutlichsten Auswirkungen auf die Projektionen sind in Abbildung 50 rot dargestellt.

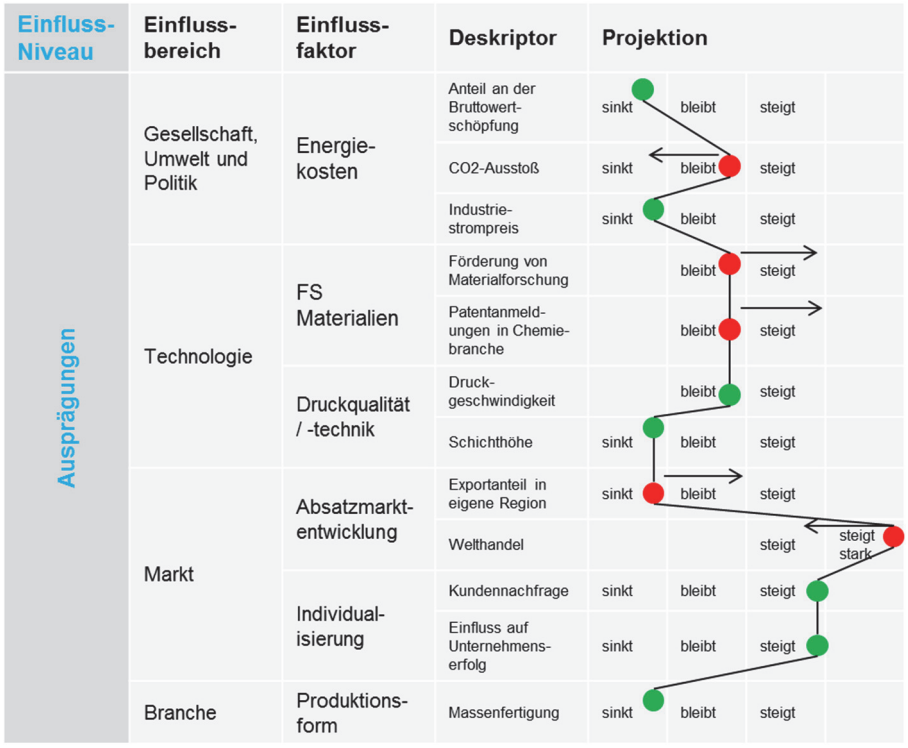



**Abbildung 50:** Auswirkung des dritten Störereignisses auf die Projektionen

Politische Spannungen in Ländern, die große Ölreserven haben, können zu einer Verknappung des Angebots und einer enormen Preissteigerung des Rohölpreises führen. Ein kompletter Wegfall des Angebots, weil beispielsweise Reserven falsch eingeschätzt wurden oder unbrauchbar werden, würde zu viel weitreichenderen Auswirkungen führen.

Da ein Großteil der Produkte Materialien auf Ölbasis enthält, wird die Produktion stark gedrosselt. Der Welthandel bricht ein, Exporte werden auf kurze Transportwege beschränkt.

Die Förderung der Materialforschung und die Patentanmeldungen in der Chemiebranche erfahren einen regelrechten Aufschwung, da Substitute für weggefallene Produkte benötigt werden und nur noch ökologische ölunabhängige Industrien Gewinne einfahren.

Ein positiver Aspekt des Störereignisses ist der Rückgang des CO2-Ausstoßes. Gründe sind zum einen die gedrosselte Produktion und zum anderen der kompletten Verzicht auf fossile Energieträger und der Wechsel zu nachhaltigen Produkten. Der Strompreis steigt nur leicht, da schon vorher eine effiziente Energiegewinnung existiert hat, die nur zu einem Teil aus fossilen Energieträgern bestand.

Eine Ölkrise hat anfangs enorme Auswirkungen auf das Szenario. Vor allem aber setzt das Ereignis die Institutionen unter zeitlichen Druck, die Produktionslandschaft zu verändern. Da es schon heute z. B. Kunststoffe gibt, die kein Öl enthalten, können die Probleme relativ schnell gelöst werden und Produkte, die vom Öl abhängig waren, ersetzt werden. Vor allem durch die Möglichkeiten, die der 3D-Druck bietet, könnte es schon ausreichen, die verwendeten Druckmaterialien auszutauschen ohne neue Fertigungsprozesse einzuführen. Damit nähert sich das Szenario „The Rebound Effect“ dem ersten Szenario „A Convenient Truth“ durch das Störereignis Ölkrise an. Der Unterschied ist nur, dass die Entwicklung im ersten Szenario freiwillig entstand, im dritten Szenario brauchte sie einen unmittelbaren Auslöser.

# 6 Ableitung relevanter Technologien

## 6.1 Robuste Technologien

**Zusammenfassung**

Die 3D-Drucktechnologie ist bereits für unterschiedliche Anwendungsgebiete geeignet. Für eine umfangreiche Substitution konventioneller Produktionsmethoden oder Erschaffung vollständig neuer Anwendungsgebiete sind eine stetig wachsende Druckqualität und kostengünstigere sowie energieeffizientere Drucktechniken eine wichtige Voraussetzung.

In diesem Kapitel werden die robusten Technologien, die aus den drei Szenarien hervorgehen (Kapitel 5.5), dargestellt und näher beschrieben. Technologien gelten dann als robust, wenn sie über alle zukünftigen Zustände Bestand haben. Im vorliegenden Fall sollen Ausprägungen der 3D-Druck Technologien ermittelt werden, welche die Entwicklung des jeweiligen Szenarios am besten unterstützen. Ziel ist es somit, die Auswahl an zukünftigen Technologien einzugrenzen und die Technologien zu ermitteln, die in den Szenarien eine entscheidende Rolle einnehmen. Mithilfe eines strategischen Roadmappings werden die robusten Technologien für jedes Szenario abgeleitet. Das heißt, es wird für jedes Szenario der Markt hinsichtlich Kunden, Regionen, Vertriebskanäle und Leistungen beschrieben (Marktszenario). Darauf aufbauend werden Technologien abgeleitet, die für die Produkte benötigt

werden. Für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand gehen verschiedene Ausprägungen der Technologie 3D-Druck hinsichtlich der Szenarien hervor. Die Szenarien sowie die abgeleiteten Technologieausprägungen sind in der folgenden Darstellung abgebildet (Abbildung 51).

| Szenario | A Convenient Truth | Do-It-Yourself | The Rebound-Effect |
|---|---|---|---|
| Markt | **Kunde** Umweltbewusste Kunden<br>**Region** EU, NA, ASEAN+3<br>**Vertriebskanal** Online<br>**Leistung** Nachhaltige Materialien/Produktionsmethoden | **Kunde** Privatanwender (Normalverbraucher)<br>**Region** EU, NA, ASEAN+3<br>**Vertriebskanal** Online<br>**Leistung** Konstruktion, Modellentwicklung | **Kunde** Privat und Unternehmen<br>**Region** Global<br>**Vertriebskanal** Online<br>**Leistung** Individualisierungsmöglichkeiten |
| Produkte/ Marktleistung | Biomaterialien, energieeffizient hergestellte Produkte | CAD-Daten, Software | Produktvarianten, Individualisierte Produkte |
| Technologien | „Grüne“ 3D-Drucktechnologie | Kostengünstige 3D-Drucktechnologie | Leistungsstarke 3D-Drucktechnologie |

**Abbildung 51:** Übersicht über die Ableitung der Technologien

### 6.1.1 A Convenient Truth

Das Szenario „A Convenient Truth“ befasst sich, wie in Kapitel 5.5.1 beschrieben, im Marktbereich mit Kunden, sowohl Privatpersonen als auch Unternehmen, die ein sehr ausgeprägtes Umweltbewusstsein haben. Die Regionen, die für dieses Szenario betrachtet werden liegen vor allem im europäischen, nordamerikanischen und süd-westasiatischen Raum. Die Wahl der Region begründet sich auf den Entwicklungsstand der jeweiligen Staaten hinsichtlich der wirtschaftlichen, politischen und sozialen Situation. Als Vertriebskanal wird in diesem Szenario das Internet betrachtet. Die Marktleistung bezieht sich einerseits auf den Einsatz von nachhaltigen Materialien und andererseits auf nachhaltige Produktionsprozesse. Im Bereich der Produkt- und Marktleistung stellen biologische Materialien, die sich zur Produktion eignen, eine wichtige Voraussetzung für das Szenario dar. Außerdem spielt die energieeffiziente Produkterzeugung eine große Rolle. Betrachtet man die genannten Eckpfeiler dieses Szenarios, lässt sich als robuste Technologieausprägung des 3D-Drucks die **„Grüne“ 3D-Drucktechnologie** ableiten.

### 6.1.2 Do-It-Yourself

In diesem Szenario steht der Privatkunde im Fokus. Des Weiteren liegt die Zielregion idealerweise im europäischen, nordamerikanischen und süd-westasiatischen Raum (siehe Szenario *A Convenient Truth*). Diese Auswahl begründet sich aus dem Lebensstandard und der durchschnittlichen Kaufkraft, die in diesen Regionen vorherrscht. Über den gewählten Vertriebskanal werden in diesem Szenario nicht nur die 3D-Drucker für den Heimgebrauch gekauft, sondern auch Modell- und Konstruktionspläne sowie CAD-Daten. Diese können dann von den Privatanwendern zuhause gedruckt werden. Die Marktleistung bezieht sich in diesem Szenario hauptsächlich auf die Erstellung von Konstruktionsplänen und die Modellentwicklung, da der Produktionsprozess vollständig an den Kunden abgegeben wird. Eine **kostengünstige 3D-Drucktechnologie,** durch Skaleneffekte und kreative Umsetzungen innerhalb einer breiten Produktpalette ermöglicht, nimmt in diesem Szenario eine Schlüsselrolle ein. Dadurch kann vielen Privatanwendern die Nutzung des 3D-Drucks ermöglicht werden.

### 6.1.3 The Rebound-Effect

Dieses Szenario fokussiert sich sowohl auf Privatkunden, als auch auf Unternehmen. Es wird keine Region im Einzelnen betrachtet, da in diesem Szenario sowohl entwickelte Volkswirtschaften (wie beispielsweise Deutschland oder die USA) als auch noch in der Entwicklung befindliche Länder (wie beispielsweise Indien) als rentabler Absatzmarkt betrachtet werden. Hauptsächlicher Vertriebskanal dieser Technologie ist, wie im Szenario zuvor, ebenfalls der Onlinehandel. Im Bereich der Marktleistung ist dieses Szenario auf die Individualisierungsmöglichkeiten ausgerichtet, welche sowohl in der Einzelfertigung als auch in der Massenfertigung mit Hilfe einer **leistungsstarken 3D-Drucktechnologie** umgesetzt werden können. Im Gegensatz zum Szenario *A Convenient Truth* liegt die Schwerpunktsetzung im Bereich der Produkt- und Marktleistung in diesem Szenario auf der Individualisierungsmöglichkeit von Produkten unterschiedlicher Produktionsformen und der damit einhergehenden Produktvielfalt, vor allem im Bereich der Massenproduktion.

## 6.2 Ableitung von Maßnahmen

**Zusammenfassung**

Der Entwurf von für den 3D-Druck geeigneten Produktkonstruktionen und die Integration in die Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung der gesamten Unternehmensumwelt sind wichtige Faktoren für einen wirtschaftlichen Einsatz der Technologie.

Da die 3D-Drucktechnologie bereits existiert, konzentrieren sich die Handlungsempfehlungen nicht auf eine Roadmap zur Erlangung des nötigen Know-hows, sondern auf wichtige Faktoren für den erfolgreichen Einsatz der Technologie im produzierenden Gewerbe. Diese Erfolgsfaktoren sind in den obigen Szenarien unterschiedlich stark ausgeprägt, jedoch implizit enthalten. Zusammenfassend lassen sich folgende Handlungsempfehlungen formulieren, die für den Unternehmenserfolg entscheidend sind:

- Förderung der Materialforschung und Suche nach neuen Anwendungsgebieten
- Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Druckprozesses bei der Konstruktion von Produkten
- Integration des 3D-Drucks in den Herstellungsprozess unter Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette.

Um das Potential, das der 3D-Druck hinsichtlich neuer Anwendungsgebiete bzw. Produkte ermöglicht, auszuschöpfen, bedarf es Kreativität und Innovationskraft der Unternehmen. Die Qualität des verwendeten Baumaterials ist entscheidend, um kritische Funktionen, wie beispielsweise die Stabilität einer Konstruktion, zu erhalten und konventionelle Herstellungsmethoden zu ersetzen. Der Einsatz von neuen Materialien wie Biokunststoffen kann zu nachhaltigeren Produkten und erhöhtem Kundennutzen führen. Gleichzeitig können erworbene Kompetenzen auch zur Anwendung auf neue Anwendungsgebiete oder Produkteigenschaften genutzt werden, die heute noch nicht existieren.

Gerade zur Erfüllung wichtiger Produkteigenschaften ist die Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften des Druckprozesses bei der Konstruktion von Produkten entscheidend. Unternehmen müssen die Vorteile der Druckverfahren, wie Einsparung von Material, Zeitersparnis oder die Möglichkeit neuer Formen, kennen und in die Entwicklung neuer Produkte miteinbeziehen, um die Potentiale zu

nutzen. Genauso müssen die Grenzen der Verfahren, wie beispielsweise die Energieeffizienz analysiert werden, um wirtschaftlich zu produzieren.

Dies bedeutet auch, dass nicht nur das eigene Unternehmen betrachtet wird, sondern die gesamte Unternehmensumwelt. So kann beispielsweise ein erhöhter Aufwand in der Produktentwicklung durch eine hohe Lieferflexibilität und resultierendem Kundennutzen kompensiert werden oder die Verwendung neuer Materialien zu mehr Unabhängigkeit von Lieferanten oder Rohstoffpreisen führen.

Der Einsatz des 3D-Drucks sollte sich nicht nur auf die Substitution herkömmlicher Produktionsprozesse beschränken. Vielmehr sollten auch nicht produktionsspezifische Unternehmensprozesse miteinbezogen werden. Dann bietet er das Potential neue Unternehmensleistungen oder gar neue Geschäftsmodelle zu realisieren.

# 7 Zusammenfassung

Unternehmen stehen in den nächsten Jahren vor großen Herausforderungen. Die Ergebnisse aus der bibliometrischen Analyse und den Szenarien zeigen, dass an einer Integration des 3D-Drucks in die Fertigungsprozesse kaum ein Weg vorbeigeht. Auch den Trend der Digitalisierung in der Produktion, der zwar Teil der Fabrik der Zukunft ist, jedoch nicht explizit Untersuchungsgegenstand war, gilt es in die Planung miteinzubeziehen. Die 3D-Drucktechnologie hat bereits den Weg in die Unternehmenspraxis gefunden. Allerdings bremsen kostenintensive Fertigungsprozesse eine umfangreichere Anwendung. Voraussetzung hierfür ist eine stetig wachsende Druckqualität, verbesserte Kosten-Leistungsverhältnisse, geeignete Produktkonstruktionen und eine Optimierung der Fertigungsprozesse unter Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette.

Das enorme Verbreitungswachstum der 3D-Drucktechnologien führt dazu, dass der 3D-Druck in naher Zukunft als Standard gelten wird. Gleiches wird voraussichtlich auch für die Digitalisierung in der Produktion gelten. Ähnlich wie bei heutigen Informations- und Kommunikationstechnologien wird die alleinige Anwendung der Technologie nicht mehr ausreichen, um Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Unternehmen müssen sich vor allem die Frage stellen, welche Kernkompetenzen sie aufbauen müssen, wenn die Produktionsmethode an sich keine wettbewerbsentscheidende Rolle mehr spielt. Es sollten also Maßnahmen eingeleitet werden, die vor allem die Innovationskraft des Unternehmens stärken und Technologien und Methoden entwickelt werden, die den 3D-Druck sinnvoll ergänzen.

Wenn eine hohe Marktdichte an 3D-Druckern in der Unternehmenspraxis erreicht ist, entscheiden die Entwicklung der Modelle und die besseren Produktkonzepte sowie die eingesetzten Materialien über den Erfolg eines produzierenden Unternehmens. Die tatsächlichen Bedürfnisse der Verbraucher rücken dadurch noch mehr in den Vordergrund, als es heute schon der Fall ist. Unternehmen werden nicht mehr als einfache Produzenten wahrgenommen, sondern als Institutionen, die ganzheitliche Lösungen anbieten.

**Wichtiger Hinweis:**

In der ITOP-Schriftenreihe ist der Bericht zum Thema „Future Shopping“ erschienen (ITOP-Schriftenreihe Nr. 4), welcher die Zukunft des Einzelhandels beleuchtet. Auch hier wird anhand der Methodenkombination aus Bibliometrie und Szenariotechnik ein systematischer Blick in die Zukunft geworfen.

Bei Fragen zur ITOP-Schriftenreihe wenden Sie sich bitte an:

Universität Ulm
iTOP Institut für Technologie- und Prozessmanagement
Frau Anette Lesle

Helmholtzstraße 22
89081 Ulm
Tel.: +49 (0) 7 31/50-3 23 01
anette.lesle@uni-ulm.de

# Literaturverzeichnis


**Boyack und Klavans (2010)**

Boyack, K. W. / Klavans, R. (2010): Co-citation analysis, bibliographic coupling, and direct citation: Which citation approach represents the research front most accurately? In: *J. Am. Soc. Inf. Sci.* 61 (12), S. 2389–2404.

**3Druck (o. J.)**

3Druck: http://3druck.com/grundkurs-3d-drucker/teil-1-entwicklung-und-geschichte-der-3d-druck-technologie-342079/, heruntergeladen am 22.06.2014.

**3D Printing Blog (2012)**

3D Printing Blog: http://3dprintingblog.wordpress.com/2012/02/16/3d-drucker-auf-dem-vormarsch-11-vorteile/, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Ball und Tunger (2005)**

Ball, R. / Tunger, D.: http://epub.uni-regensburg.de/4913/1/Biblio.Analys._Daten_Ball_Tunger.pdf, heruntergeladen am 10.06.2014.

**BMBF (o. J.)**

Bundesministerium für Bildung und Forschung: http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Bose et al. (2013)**

Bose. S. / Vahabzadeh, S. / Bandyopadhyay, A.: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970211300401X, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Brecht (2014)**

Brecht, L.: Vorlesungsskript Technologie- und Innovationsmanagement III – Block 3, Sommersemester 2014.

**Disney Research - Science at Play (2012)**

Disney Research: http://www.disneyresearch.com/research-labs/disney-research-boston, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Disney Research - Science at Play (2012a)**

Disney Research: http://www.disneyresearch.com/the-people-of-disney-research/, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Eades (1984)**

Eades, P. (1984): A heuristics for graph drawing. In: *Congressus numerantium 42*, S. 146–160.

**ETH Zürich (2014)**

ETH Zürich: http://www.mavt.ethz.ch/people/akkreditierte/ram/index_DE, heruntergeladen am 14.06.2014

**European Commission (o. J.)**

European Commission: http://ec.europa.eu/trade/policy/in-focus/ttip/about-ttip/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**European Patent Organisation (2013)**

European Patent Organisation: http://www.epo.org/about-us/annual-reports-statistics/annual-report/2013/statistics-trends/applicants.html, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Fuchs (2013)**

Fuchs, J. G.: http://t3n.de/news/3d-drucker-industrie-trend-453581/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Gausemeier et al. (1998)**

Gausemeier, J. / Fink, A., Schlake, O. / Siebe, A. (1996): Scenario management. An approach to develop future potentials, in: Technological Forecasting & Social Change (59), S. 111-130.

**Gausemeier et al. (2009)**

Gausemeier, J./ Plass, C./ Wenzelmann, C.: Zukunftsorientierte Unternehmensgestaltung, München, 2009.

**Genetic Engineering & Biotechnology News (2014)**

Genetic Engineering & Biotechnology News: http://www.genengnews.com/insight-and-intelligence/infographic-printing-the-human-body/77900028/, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Glänzel (o. J.)**

Glänzel, W.: https://www.ecoom.be/en/research/bibliometrics, heruntergeladen am 12.06.2015.

**HSBC (2013)**

HSBC: https://www.oxfordeconomics.com/publication/open/245734, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Havemann (2009)**

Havemann, F. (2009): Einführung in die Bibliometrie. Berlin. Online verfügbar unter http://d-nb.info/993717780/.

**HWWI (2012)**

HamburgischesWeltWirtschaftsInstitut: http://www.hwwi.org/fileadmin/hwwi/Publikationen/Partnerpublikationen/Berenberg/Strategie-2030-Gesundheit.pdf, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Jovanovic (2012)**

Jovanovic, M.: Eine kleine Frühgeschichte der Bibliometrie, Euskirchen/Düsseldorf 2012.

**Kagermann et al. (2014)**

Kagermann, H. / Wahlster, W. / Helbig, J.: http://www.iosb.fraunhofer.de/servlet/is/21752/Umsetzungsempfehlungen_Industrie_4.0_final_2012-10-02.pdf?command=downloadContent&filename=Umsetzungsempfehlungen_Industrie_4.0_final_2012-10-02.pdf, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Kerkmann (2013)**

Kerkmann C.: http://www.handelsblatt.com/technologie/it-tk/it-internet/was-stimmt-wirklich-die-mythen-um-den-3d-druck/8387608.html, heruntergeladen am 30.06.2014.

**Kessler (1962)**

Kessler, M. M. (1962): Bibliographic coupling between scientific papers. [Cambridge, Mass.]: [Massachusetts Institute of Technology] (M.I.T. report R-2).

**Lewis und Gratson (2004)**

Lewis, J. / Gratson, G.: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136970210400344X, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Marshakova-Shaikevich (1973)**

Marshakova-Shaikevich, I. (1973): System of Document Connections Based on References. In: *Nauchno- Tekhnicheskaja Informacya* 2, S. 3–8.

**Marwan (2013)**

Marwan, P.: http://www.itespresso.de/2013/03/26/gartner-2016-ist-3d-druck-mainstream/, heruntergeladen am 30.06.2014.

**Marx (2011)**

Marx, W.: http://www.forschung-und-lehre.de/wordpress/?p=9147, heruntergeladen am 10.06.2014.

**MIT MechE (o. J.)**

MIT MechE: http://meche.mit.edu/people/?id=73, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Persson (1994)**

Persson, O. (1994): The intellectual base and research fronts of JASIS 1986–1990. In: *Journal of the American Society for Information Science* 1 (45), S. 31–38.

**Ponsford und Glass (2014)**

Ponsford, M. / Glass, N.: http://edition.cnn.com/2014/02/13/tech/innovation/the-night-i-invented-3d-printing-chuck-hall/, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Porter (2013)**

Porter, M. E.: Wettbewerbsstrategie: Methoden zur Analyse von Branchen und Konkurrenten, 12. aktual. u. erw. Aufl., Frankfurt a. M. 2013.

**Roland Berger (o. J.)**

Roland Berger Holding GmbH: http://www.rolandberger.de/pressemitteilungen/513-press_archive2013_sc_content/Grosses_Potenzial_fuer_Additive_Manufacturing.html, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Schiebel (2012)**

Schiebel, E. (2012): Visualization of research fronts and knowledge bases by three-dimensional areal densities of bibliographically coupled publications and co-citations. In: *Scientometrics* 91, S. 557–566.

**Small (1973)**

Small, H. (1973): Co-citation in the Scientific Literature: A New Measure of the Relationship Between Two Documents. In: *Journal of the American Society for Information Science* 24, S. 265–269.

**Statista (2014)**

Statista: http://de.statista.com/infografik/2220/prognose-zur-entwicklung-der-3d-druck-branche/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014a)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/189173/umfrage/anteil-der-energiekosten-an-der-bruttowertschoepfung-nach-branche/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014b)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/250683/umfrage/energiekosten-fuer-die-herstellung-von-metallerzeugnissen-in-deutschland/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014c)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/183042/umfrage/energieverbrauch---und-einsparung-bei-kunststoffen-und-alternativen-materialien/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014d)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/280856/umfrage/weltweiter-co2-ausstoss/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014e)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/155964/umfrage/entwicklung-der-industriestrompreise-in-deutschland-seit-1995/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014f)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/252029/umfrage/industriestrompreise-inkl-stromsteuer-in-deutschland/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014g)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/153527/umfrage/bundesausgaben-fuer-forschung-und-entwicklung-nach-foerderbereichen/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014h)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/37143/umfrage/weltweites-exportvolumen-im-handel-seit-1950/, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Statista (2014i)**

Statista: http://de.statista.com/statistik/daten/studie/7088/umfrage/fuer-unternehmen-wichtige-megatrends/, heruntergeladen am 30.06.2014.

**Stevens (2008)**

Stevens, M.: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702108700865, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Stott (2014)**

Stott, R.: http://www.archdaily.com/514003/arup-develops-3d-printing-technique-for-structural-steel/?utm_source=dlvr.it&utm_medium=twitter, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Stuiber (2013)**

Stuiber, P.: http://www.thegap.at/creativestories/artikel/die-welt-aus-dem-drucker/seite-2/, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Tagesschau.de (2014)**

Tagesschau.de: http://www.tagesschau.de/ausland/usaklimaschutz104.html, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Tauber (2012)**

Tauber, A.: http://www.welt.de/wirtschaft/webwelt/article112081447/Massanfertigung-feiert-Comeback-dank-Internet.html, heruntergeladen am 26.06.2014.

**The Economist (2012)**

The Economist online: http://www.economist.com/node/21552901#sthash.4k3i4BKZ.dpbs, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Thomson Reuters (2011)**

Thomson Reuters: http://ip-science.thomsonreuters.com/m/pdfs/wos_qrc_de.pdf, heruntergeladen am 21.06.2014.

**Thomson Reuters Corporation (Web of Science) (2014)**

Web of Science Core Collection (kostenpflichtige Zitationsdatenbank): http://wokinfo.com/, Zugriff über Universität Ulm am 12.04.2014.

**Unger (o. J.)**

Unger, I.: http://t3n.de/magazin/3d-druck-schicht-schicht-zukunft-230252/, heruntergeladen am 12.06.2014.

**Universität Wien (o. J.)**

Universität Wien - Universitätsbibliothek: http://bibliometrie.univie.ac.at/indikatoren/h-index/, heruntergeladen am 10.06.2014.

**Universitätsklinikum Würzburg (2014)**

Universitätsklinikum Würzburg - Abteilung für Funktionswerkstoffe der Medizin und Zahnheilkunde: http://www.fmz.ukw.de/mitarbeiter.html, heruntergeladen am 10.06.2014.

**Utsugi und Yamaguchi (2013)**

Utsugi, T. /Yamaguchi, M.: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23388959, heruntergeladen am 15.06.2014.

**Web of Science (2014)**

Web of Science: www.webofscience.com, heruntergeladen am 10.06.2014.

**World Trade Organisation (2011)**

World Trade Organisation: http://www.wto.org/english/res_e/statis_e/world_region_export_10_e.pdf, heruntergeladen am 21.06.2012.

**Zeleny (2012)**

Zeleny, M.: http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S021962201240010X?journalCode=ijitdm, heruntergeladen am 15.06.2014