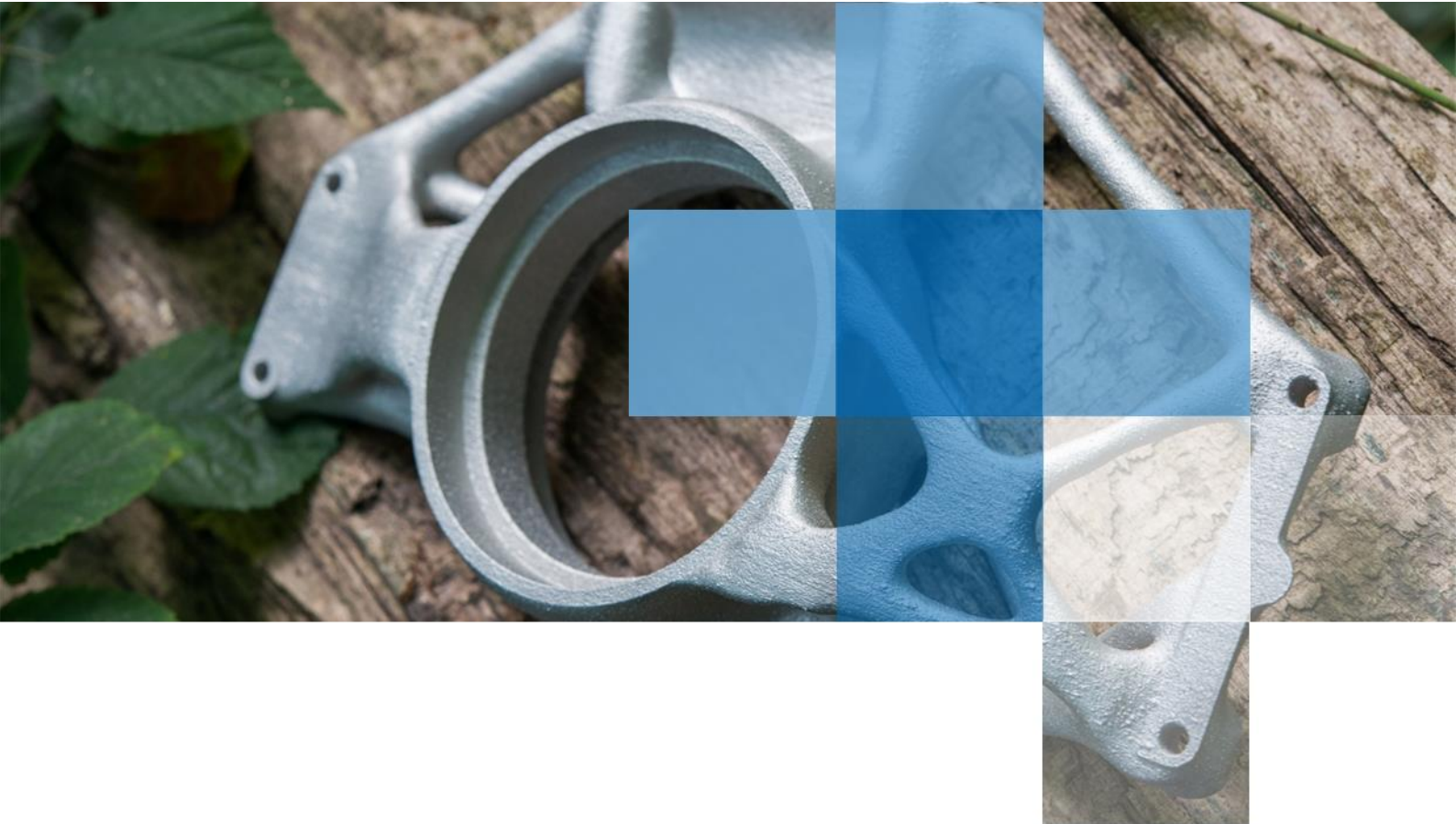




**AACHEN CENTER  
FOR ADDITIVE  
MANUFACTURING**



## Resilienz in Lieferketten

Wie die additive Fertigung eine resiliente Supply Chain ermöglicht

Prof. Dr. Johannes Schleifenbaum, Dr. Kristian Arntz, Dr. Daniel Trauth,  
Gerret Lukas, Philipp Niemietz, Johannes Mayer, Tobias Kaufmann

## ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing

Das ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing mit Sitz auf dem RWTH Aachen Campus bündelt Ressourcen und erleichtert der Industrie den Zugang zum Know-how führender Wissenschafts- und Forschungseinrichtungen im Bereich Additive Manufacturing. ACAM ist die zentrale Anlaufstelle für Additive-Manufacturing, das die gesamte Prozesskette vom Design bis zur Qualitätskontrolle abdeckt. Die ACAM fokussiert Themen, wie die Automatisierung der Prozesskette, die Entwicklung maßgeschneiderter Materialien, die Steigerung der Produktivität und die Reduzierung der Durchlaufzeiten. Darüber hinaus bietet die ACAM Möglichkeiten für gemeinsame Forschung und Entwicklung, ein weitreichendes Schulungs- und Ausbildungsprogramm sowie eine Online-Plattform, die es den Mitgliedern der Branche ermöglicht, innerhalb des Netzwerks praktisches Wissen auszutauschen.

## senseering GmbH

Die senseering GmbH (SE) ist ein mehrfach ausgezeichnetes Digitalisierungs-Startup für die Erschließung von Industrie 4.0- und Nachhaltigkeitsstrategien. Mit Hilfe der eigens entwickelten Potenzialanalyse werden die größten Stellhebel in Unternehmen auf dem Weg der digitalen Transformation identifiziert. Bei Bedarf versorgt die senseering Kunden mit ihrer eigenen standardisierten, kostengünstigen und skalierenden Connectivity-Lösung oder wendet Data-Science-Algorithmen direkt auf die Bestandsdaten an. Abgerundet wird das Produktportfolio durch die Entwicklung von digitalen KI-Produkten und digitalen Geschäftsmodellen auf den identifizierten Stellhebeln. So schafft die SE für seine Kunden nachhaltige Mehrwerte durch eine aktive Datennutzung.

Die Studie wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert und im Auftrag der senseering GmbH vom Aachen Center for Additive Manufacturing (ACAM) innerhalb des Projekts SPAICER (Förderkennzeichen 01MK20015F) durchgeführt.



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Autoren



**Prof. Dr. Johannes Henrich Schleifenbaum**  
Managing Partner  
ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing GmbH



**Dr. Kristian Arntz**



**Dr. Daniel Trauth**  
CEO and Founder  
senseering GmbH



**Gerret Lukas**  
Director Projects  
ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing GmbH



**Philipp Niemietz**  
Head of Business Development  
senseering GmbH



**Johannes Mayer**  
Business Development  
senseering GmbH



**Tobias Kaufmann**  
Business Development  
senseering GmbH

## Impressum

### Herausgeber:

ACAM Aachen Center for Additive Manufacturing  
Campus-Boulevard 30  
52078 Aachen  
Germany  
[www.acam.rwth-campus.com](http://www.acam.rwth-campus.com)

senseering GmbH  
c/o WeWork  
Friesenplatz 4  
50672 Köln  
Germany  
[www.senseering.de](http://www.senseering.de)

### Verantwortlich:

Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Daniel Trauth  
Prof. Dr.-Ing. Johannes Schleifenbaum

### Redaktion:

Johannes Mayer, Tobias Kaufmann

### Stand:

10/2021

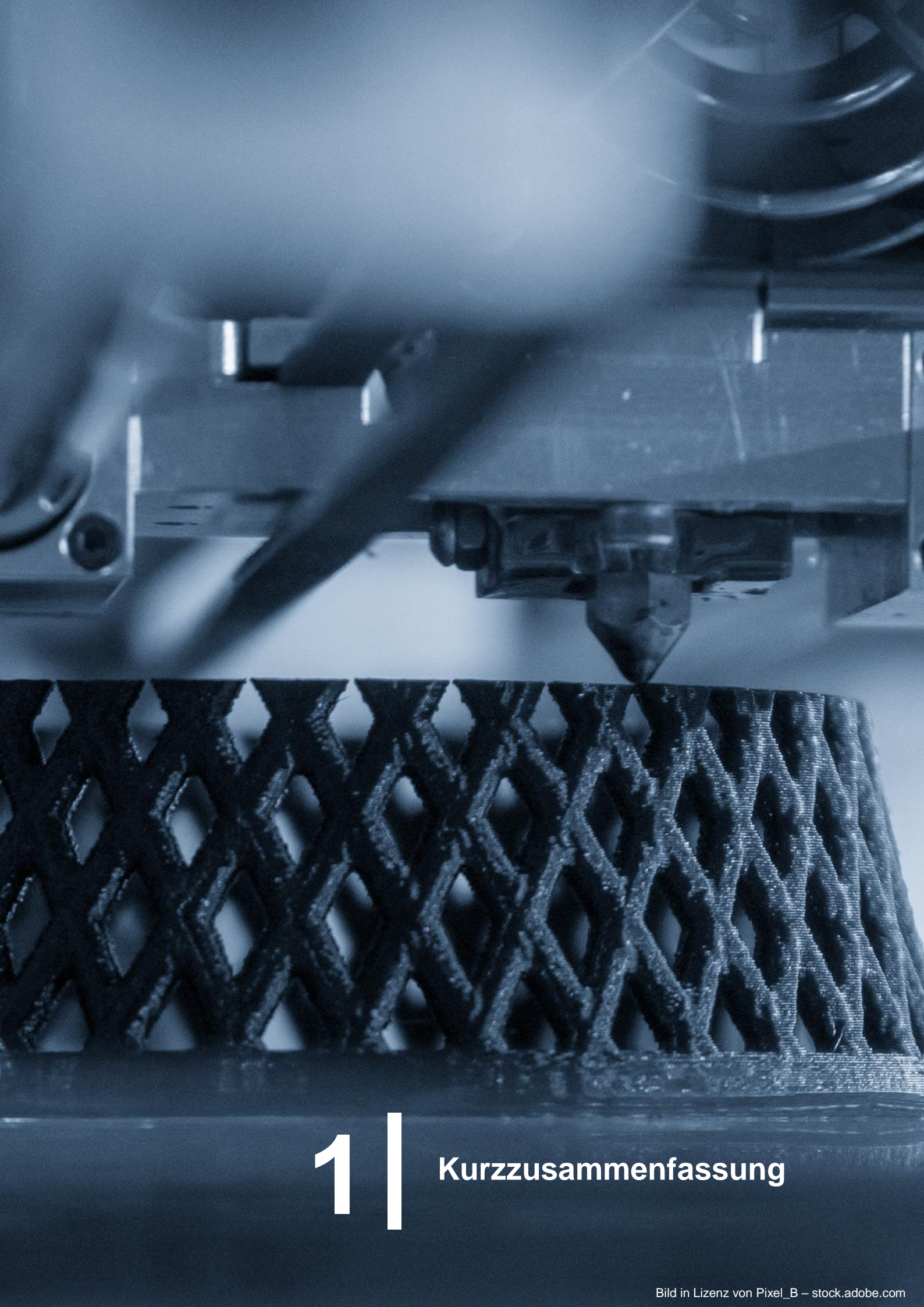
### ISBN:

978-3-00-070404-8

## Inhalt

1. Kurzzusammenfassung.....	7
2. Einleitung .....	9
2.1 Definition von Resilienz.....	9
2.2 Rolle der additiven Fertigung in der Lieferkette .....	10
2.3 Die digitale Prozesskette der AM .....	14
3. Resilienzmanagement.....	17
3.1 Treiber der Resilienz in der Produktion und entlang der Lieferkette .....	17
3.2 Dimensionen der Resilienz .....	20
4. Anforderungen an Resilienz innerhalb der Supply Chain.....	24
5. Messbarkeit von Resilienz in der Supply Chain .....	26
6. Additive Fertigung in der Lieferkette zur Steigerung der Resilienz.....	34
7. Neue Geschäftsmodelle „Turning Data into Sustainable Resilience“ .....	37
8. Zusammenfassung.....	41
9. Literaturverzeichnis .....	42





# 1

## Kurzzusammenfassung

## Kurzzusammenfassung

Resilienz – die Fähigkeit mit Krisen umzugehen und sich schnellstmöglich von deren Auswirkungen zu erholen – wird seit der COVID-19-Pandemie als neues Wundermittel gegen die Auswirkungen für eintretende Störungen der Zukunft glorifiziert. Insbesondere für den exportorientierten Standort Deutschland ist die resiliente Gestaltung von Lieferketten ein wirtschaftlicher Erfolgsfaktor. Eine strategische Verankerung des Resilienzgedankens im Management sowie die Nutzung zukunftsorientierter Technologien sind jedoch erforderlich, um die Potenziale einer robusten, agilen, adaptiven und integrativen Lieferkette nutzbar zu machen. Die additive Fertigung birgt aufgrund ihrer digitalen „DNA“ und der großen Gestaltungsfreiheiten das Potenzial, die Resilienz einer Lieferkette effizienter hergestellt bzw. vorangetrieben werden kann. Die Redundanz durch Lagerbestände wird bspw. durch die ortsunabhängige, flexible Fertigung ohne große Anlaufzeiten benötigter Produkte auf Basis computergestützter Designdateien hinfällig. Auch das Investitionsrisiko für Maschinen der additiven Fertigung müssen die Unternehmen einer Lieferkette aufgrund neuer, datenbasierter Geschäftsmodelle nicht tragen. Für viele produzierende Unternehmen und unternehmerische Allianzen in Form einer Lieferkette stellt sich daher zunehmend die Frage, ob die Technologie der additiven Fertigung als Instrument zur Steigerung der Resilienz entlang der Lieferkette zukünftig verstärkt herangezogen werden kann. Die Studie „Resilienz in Lieferketten – Wie die additive Fertigung eine resiliente Supply Chain ermöglicht“ beleuchtet diese wirtschaftliche und auch ökologisch wertvolle Fragestellung und stellt potenzielle datengetriebene Geschäftsmodelle für den Technologiezweig vor.



# 2

## Einleitung





## Einleitung

Die vorliegende Studie ist im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „SPAICER – Skalierbare adaptive Produktionssysteme durch KI-basierte Resilienzoptimierung“ mit dem Förderkennzeichen 01MK20015F entstanden und wurde von der senseering GmbH in Auftrag gegeben und vom Aachen Center for Additive Manufacturing (ACAM) erstellt. Die Studie erarbeitet den Themenkomplex des Resilienzmanagements in der additiven Fertigung entlang der Lieferkette. Hierzu werden relevante Kennzahlen aus der Produktion und Logistik abgebildet und ein Einblick in den Status quo, die Potenziale sowie Herausforderungen eines ganzheitlichen Resilienzmanagements innerhalb der Lieferkette auf Basis des Einsatzes von Verfahren der additiven Fertigung gegeben. Nach einer Begriffsdefinition und Erläuterung des Resilienzmanagements folgt eine Anforderungs- und Potenzialanalyse der technologischen Verfahren der additiven Fertigung und der digitalen Wertschöpfungskette im Hinblick auf die Steigerung der Resilienz der Lieferkette. Der Einfluss des Einsatzes dieses Technologiezweigs auf ausgewählte Kennzahlen eines ganzheitlichen Resilienzmanagements und die Produktivität werden untersucht und Potenziale aufgezeigt. Anschließend werden in der Studie potenzielle neue Geschäftsmodelle für Anbieter additiver Fertigungsverfahren detailliert vorgestellt.

Die theoretischen Grundlagen dieser Studie stützen sich u. a. auf die Erkenntnisse des Forschungsprojekts SPAICER, an welchem z. B. das Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen University und die senseering GmbH maßgeblich beteiligt sind. Das durch den Innovationswettbewerb „Künstliche Intelligenz als Treiber für volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderte Projekt forciert ein datengetriebenes Ökosystem, in welchem sog. KI-gestützte, smarte Resilienzservices zu einer Vorhersage von Störungen und optimierten Anpassung der Produktionsplanung auf jene Störungen im Maschinenbau befähigen [TRAU 19]. Dies erfolgt im Projektvorhaben auf Makro-, Meso- und Mikroebene der Produktion. Konkret ist die Feinschneidtechnologie Forschungsgegenstand des WZL. Am Beispiel von Störungen, die in der Wertschöpfungskette dieser Technologie auftreten, soll die Resilienz von Unternehmen der Produktionstechnik und Logistik erhöht werden. Die Feinschneidtechnologie selbst gilt im Vergleich zur additiven Fertigung jedoch als starr. Die additive Fertigung gilt aufgrund ihrer Charakteristika wie die großen Individualisierungs- und Designmöglichkeiten und den Verzicht auf Werkzeuge und Formen als zukunftsweisende, flexible Technologie. Der stetig wachsende Reifegrad, auch im Bereich der Fertigung komplexer Objekte, erhöhen die Erwartungen an deren Einsatz zur Steigerung der Resilienz der Lieferkette. Aus diesem Grund wird in dieser Studie die Eignung der additiven Fertigung als Enabler für eine resiliente Lieferkette untersucht.

### 2.1 Definition von Resilienz

Die Resilienz einer Lieferkette bezeichnet die Widerstandsfähigkeit eines mehrstufigen Netzwerks aus Unternehmen gegenüber internen und externen Störfaktoren [THUN 20]. Diese Eigenschaft entwickelt sich über die Zeit und ist im Sinne einer Adaptierbarkeit einzelner Unternehmen „erlernbar“. Zentrales Element der Resilienz ist die eingetretene Störung. Eine resiliente Lieferkette ist fähig, nach dem Eintritt eines Störeevents zu einem Ausgangszustand bzw. neuen, wünschenswerten Zustands zurückzukehren.

Resilienz ist im Maschinen- und Anlagenbau und deren Zulieferbranchen keine fremde Kompetenz und bedeutet demzufolge keine Umstrukturierung oder Abkehr von existenten Strategien, sondern lediglich eine ganzheitliche Betrachtung und Verknüpfung der einzelnen Elemente zu einer Handlungsweise der Leitung, Organisation und Planung (s. Abbildung 1).

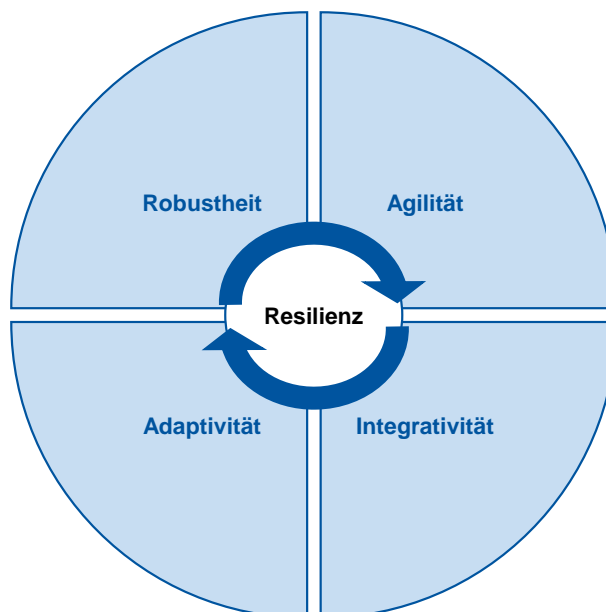


Abbildung 1: Eigenschaften der Resilienz

Die Eigenschaft Resilienz vereint die Prinzipien der Robustheit und Agilität [VDIW 21]. **Robuste** Lieferketten gewährleisten den Prozess von der Bestellung des Kunden bis zur Lieferung und Bezahlung des Produkts oder der Dienstleistung unbeeinflusst von wechselnden inneren und äußeren Einflussfaktoren. Von der Rohstoffgewinnung über die Veredelungsstufen bis hin zum Endverbraucher wird die Funktionalität der Lieferkette durch eingetretene Störungen nicht gefährdet. **Agilität** im Kontext von Lieferketten zeichnen sich durch eine schnelle Reaktion auf bspw. marktseitige Veränderungen, sowohl hinsichtlich des Volumens als auch der Vielfalt der Produkte, staatliche oder andere Restriktionen, aus. **Adaptive** Lieferketten beschreiben die Anpassung des Designs einer Lieferkette an positive oder negative Veränderung der Umwelt, um den strukturellen Veränderungen auf den Märkten gerecht zu werden und das Versorgungsnetzwerk hinsichtlich der Bereitstellungsstrategie, die sich an Verschiebungen in Schlüsselmärkten, Lohnkosten und anderen Faktoren anzupassen [IVAN 10]. In Analogie zur integrativen Produktion führt eine **integrative** Lieferkette zu einer unternehmensübergreifenden Optimierung von Waren- und Informationsflüssen durch die Beseitigung logistischer Schnittstellen [PLAC 07]. Ein Zusammenwirken der vier genannten Dimensionen bzw. Charakteristika einer Lieferkette beeinflussen die Resilienz, wie Abbildung 1 veranschaulicht.

## 2.2 Rolle der additiven Fertigung in der Lieferkette

Technologisch zeichnet sich die additive Fertigung (AM) als Fertigungstechnologie aus, bei der Material schichtweise aufgetragen und dadurch Materialabfall bzw. Verschwendung vermieden wird [BERG 13]. Ursprünglich wurde sie als *Rapid Prototyping* in die Welt der Fertigungstechnik eingeführt. Diese Technologie wurde zunächst für das schnelle Erschaffen von Komponenten und Baugruppen entwickelt, von denen oder deren Basis anschließend die serienreifen Produkte abgeleitet wurden. Inzwischen ist diese Technologie in der Produktionstechnik jedoch so etabliert, gereift und zunehmend verbreitet, sodass sie für viele weitere Zwecke eingesetzt wird [GIBS 21]. Sie basiert grundlegend auf der Nutzung digitaler Datensätze und Verarbeitungsprogramme. Dies ermöglicht die Herstellung komplexer Geometrien, Hinterschnitten und Massen Anpassungen ohne zusätzliche Werkzeugkosten für eine komplexere Bauteilgeometrie. Die vier Hauptverfahren der additiven Fertigung sind das

Selektive Lasersintern (SLS), das Selektive Laserschmelzen (SLM), das Elektronenstrahlschmelzen (EBM) und der Pulverdruck.

Die additive Fertigung gewinnt zunehmend an Bedeutung für die Lieferkette. Statistiken zufolge wird der wirtschaftliche Einfluss pro Jahr ab 2025 auf ca. 550 Mrd. US-Dollar dotiert [NAGH 20]. Die genannte Fertigungstechnologie senkt die Markteintrittsbarrieren und bietet die Möglichkeit, mehrere Märkte gleichzeitig zu bedienen. Mehr und mehr Serienanwendungen werden durch die Integration der additiven Fertigungstechnik innerhalb der Wertschöpfungskette möglich [LANG 20]. Die sinkenden Kosten der Fertigung selbst, sinkende Anschaffungskosten der Fertigungsanlagen durch am Markt etablierte Hersteller sowie die steigende Vielfalt der zum Einsatz kommenden Materialien und Lösungen zur Inline-Prozessüberwachung optimieren das Qualitätsniveau und qualifizieren die additive Fertigung mittlerweile als Technologie für eine Vielzahl an Abnehmerbranchen (Abbildung 2). Die Einbringung maßgeschneiderter mechanischer Eigenschaften und Fertigung von funktionalen Oberflächen und Stützstrukturen ist bereits möglich.

Additive Fertigungsverfahren zeichnen sich u. a. durch den Verzicht an Werkzeug, die freie Formgestaltung und die potenzielle Integration von Funktionen in das Endprodukt bereits zum Zeitpunkt der Konstruktion aus. Die hochpräzise Fertigung insbesondere von Kleinstserien herunter bis zur Losgröße Eins wird durch diese Faktoren unterstützt. In Lieferketten kann die additive Fertigung aufgrund der genannten Vorteile einzelne Stufen und Lagerhaltungen obsolet machen und bietet die Möglichkeit, Produkte und Baugruppen mit weniger Komponenten On-Demand zu fertigen. Dies verkürzt die Lieferkette um ausgewählte Stufen und verlagert die Produktherstellung näher zum Kunden. Es resultiert ein geringerer Bedarf an Verpackung, Transport und Lagerhaltung [NAGH 20]. Weiterhin ermöglicht die Einzelteillfertigung mittels AM eine agilere Lieferkette im Falle kurzfristiger Lieferausfälle an Engpassstellen entlang der Wertschöpfungskette. Die aufwendigen Produkttests in mehreren Iterationsschleifen bei der Produktentwicklung werden durch die digitale Prozesskette der additiven Fertigung vereinfacht und kritische Übergabepunkte, insbesondere zwischen CAD-Software und Maschine sowie zwischen Kunde und Auftragsabwicklungsschnittstelle, geglättet [LANG 20].



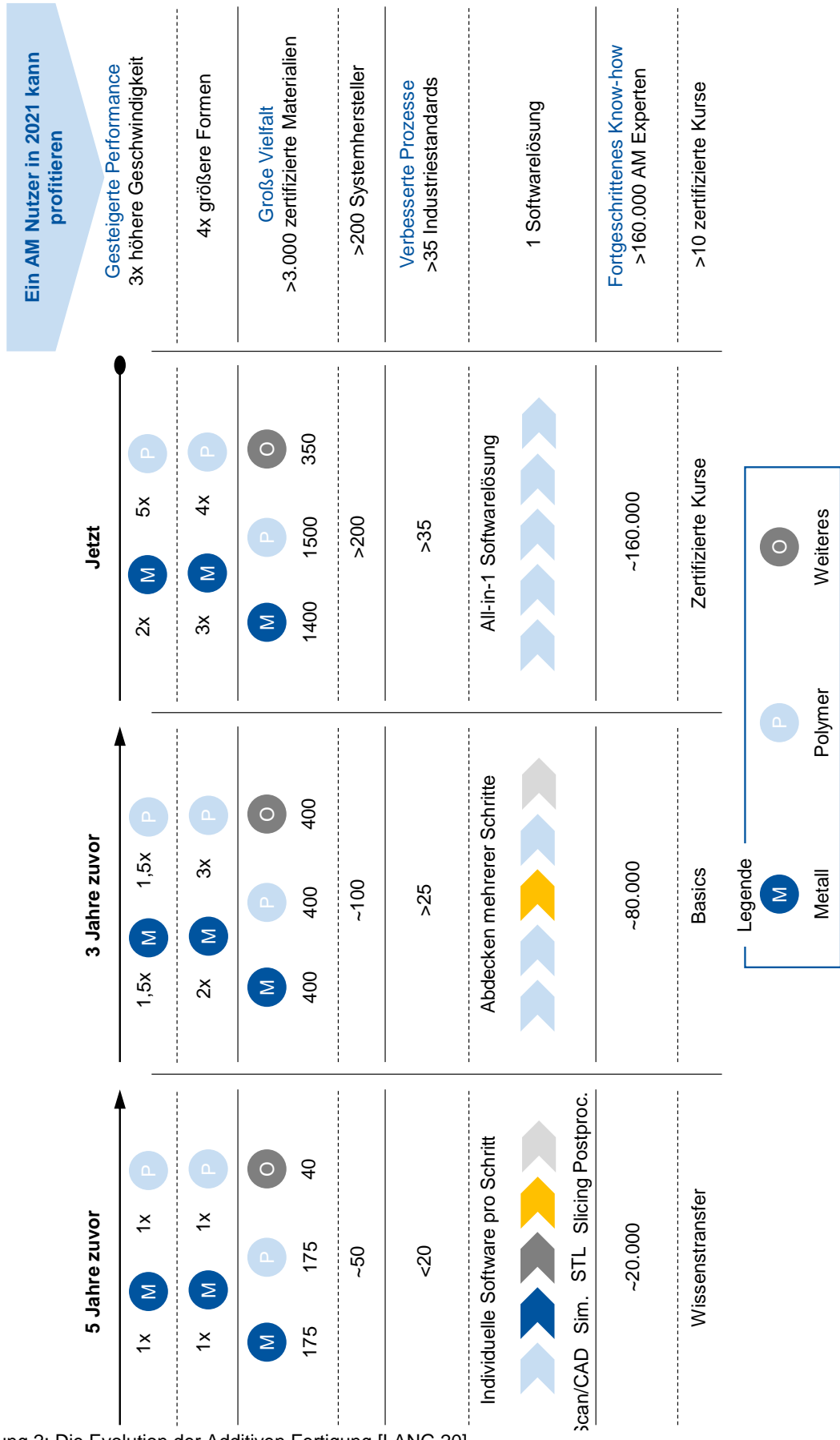


Abbildung 2: Die Evolution der Additiven Fertigung [LANG 20]

Nachteilig hingegen sind die derzeit niedrige Produktionsgeschwindigkeit, der geringe Automatisierungsgrad während der Vor- und Nachbearbeitung sowie die hohen Preise für Maschinen und Materialien [BERG 13]. Technologische Fortschritte der Charakteristika dieser Technologie verändern die Einsatzmöglichkeiten hinsichtlich wirtschaftlicher Nutzung und Resilienzsteigerung. Abbildung 3 zeigt nachfolgend die Prognose zur Kostenentwicklung in der additiven Metallfertigung, weltweit, bis 2023. Dieser ist eine Verringerung der Kosten auf ca. 30 % im Vergleich zum Jahr 2013 zu entnehmen. Bei der Berechnung wurden die Posten mit einbezogen (direkte und indirekte Kosten): Geschwindigkeit des Druckprozesses, Anschaffungskosten der Maschine, Anteil der Maschinenüberwachung, Maschinenauslastung, Kosten für das Ausgangsmaterial [BERG 14].

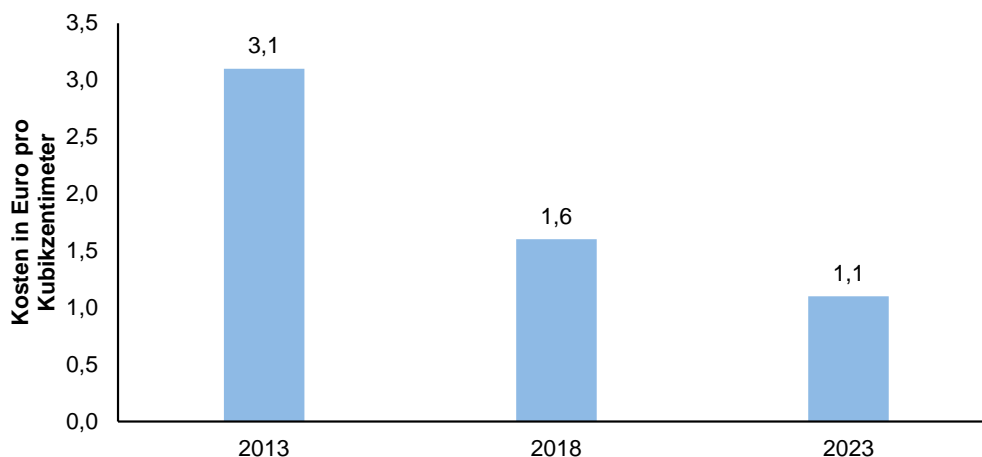


Abbildung 3: Prognose zur Kostenentwicklung in der additiven Metallfertigung weltweit bis zum Jahr 2023 [BERG 14]

Die zunehmend an Bedeutung gewinnende Rolle der AM in der Produktionstechnik und internationalen Wirtschaft, auch aufgrund der steigenden Lieferkettenkomplexität, geringer Lagerhaltung und steigenden Kundenforderungen (B2B und B2C) wird weiterhin in Abbildung 4 deutlich. Diese zeigt das geschätzte Marktvolumen bis 2023, ebenfalls weltweit, auf Basis von Experteninterviews [BERG 13a]. Ebenso steigt die Anzahl der Patente im Bereich AM bzw. 3D-Druck ausgehend vom Jahr 2007 bis zum Jahr 2018 um den Faktor 12 erhöht, davon um den Faktor 5 seit 2013 [IPLY 19].

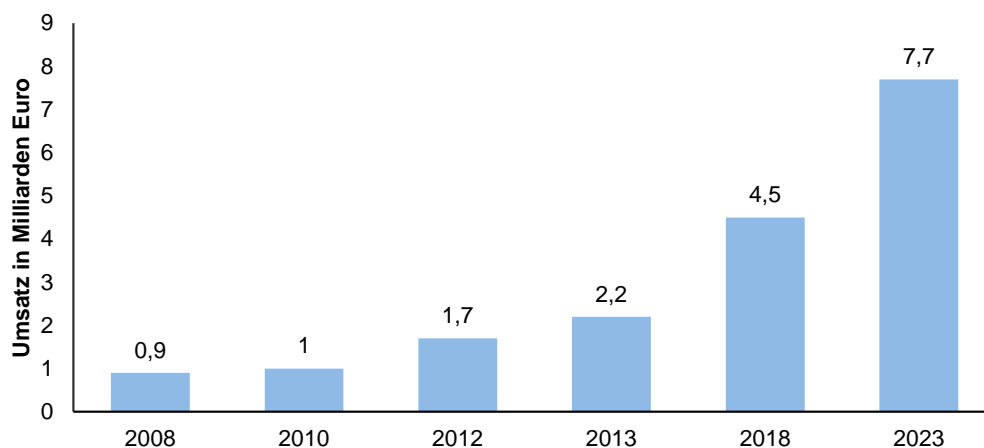


Abbildung 4: Prognose zum Marktvolumen von Additive Manufacturing weltweit bis zum Jahr 2023, davon Werte für 2013, 2018 und 2023 geschätzt [BERG 13a]

In Bezug auf den vollumfänglichen Einsatz in Lieferketten ist anzumerken, dass noch keine Standards vollständig entwickelt sind und additiv gefertigte Produkte in verschiedenen Industrien wie der Kernenergie nicht verwendet werden können. Größere Anbieter von mittels AM hergestellten Zulieferkomponenten spezialisieren sich daher auf bestimmte Märkte (Automobil-, Medizin- oder Luft- und Raumfahrtbereich), deren Zertifizierungsbestimmungen sie erfüllen oder die keine Zertifizierung benötigen. Dennoch kann die Zertifizierung oft eine Hürde sein, besonders für kleinere AM-Dienstleister. Auch wenn heutzutage das Angebot von Schulungen und Beratungsunternehmen den Zugang zu detailliertem Know-how im Bereich der additiven Fertigung ebnen, bleibt die Technologie komplex [LANG 20].

Die additive Fertigung gilt weiterhin als digitale Fertigungstechnologie, deren Software ein wesentlicher Bestandteil der Prozesskette darstellt. Infolge des Einsatzes der Technologie des digitalen Zwillings, der ständigen Datenzugriffe, -modifikationen und -kontrollen sowie der vollständigen ebenso digitalen Dokumentation jedes digitalen Bauteils und seiner Produktion wird die additive Fertigung auch als Treiber der digitalen Wertschöpfungskette bezeichnet. Die Bedeutung von AM im Bereich Kleinstserien besteht zusammengefasst darin, die Fertigung direkt in diese Technologie auszulagern; im Großserienbereich bietet die Nutzung von AM die Chance zu Absicherung der Lieferkette in verschiedenen Dimensionen durch die enorme Flexibilität der Technologie. Aus diesem Grund wird im Folgenden die digitale Prozesskette und die jeweils zum Einsatz kommenden Softwarekomponenten näher beleuchtet.

### 2.3 Die digitale Prozesskette der AM

Die digitale Prozesskette basiert auf sechs aufeinanderfolgenden Schritten, ausgehend von der Entwicklung eines CAD-Modells bis hin zur Definition der Steuerungsparameter und Verfahrenswege der Maschinenachsen für die Bauteilfertigung und zum Qualitätsmanagement für das zu verwendende Pulver (s. Abbildung 5).

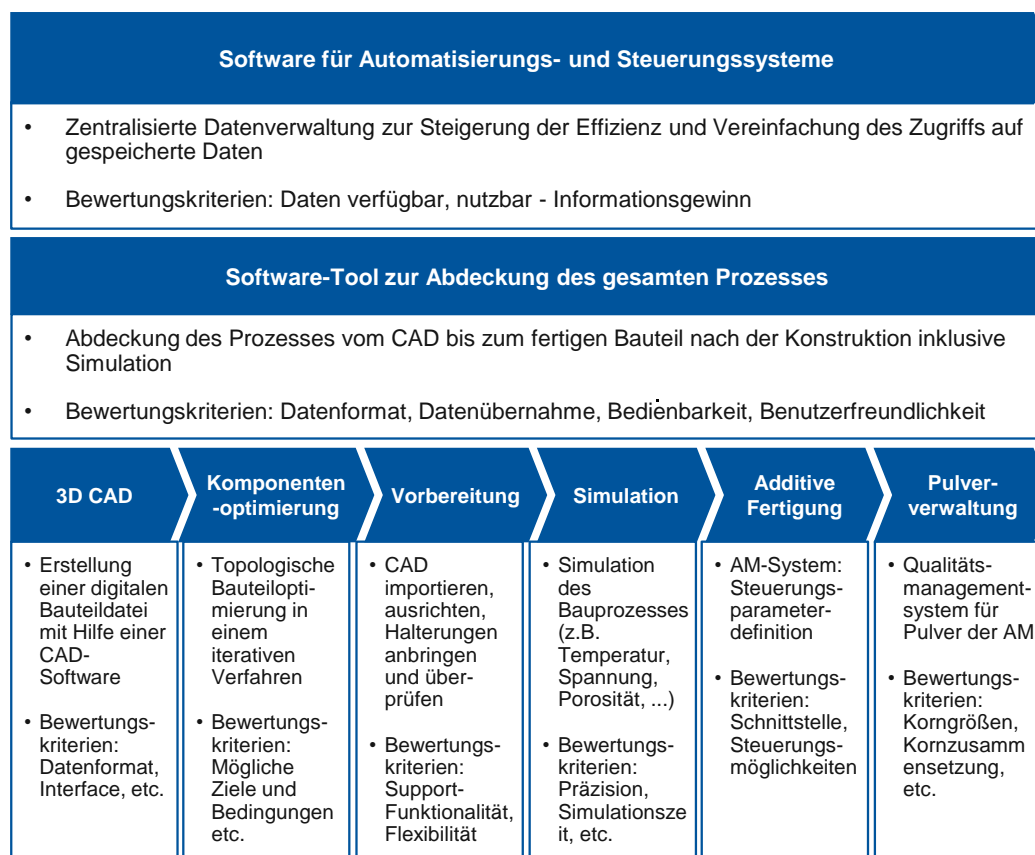


Abbildung 5: Die digitale Prozesskette der additiven Fertigung nach [ACAM 19]



Übergeordnet existiert eine Software zur Systemautomatisierung und -steuerung. Auf Basis einer zentralisierten Datenverwaltung innerhalb des Unternehmens wird die Effizienz gesteigert und der Datenzugriff für die Mitarbeiter vereinfacht.

In der **3D-CAD Software** wird die digitale Designdatei der Komponente oder Baugruppe entwickelt, um darauf aufbauend das zu fertigende Bauteil topologisch zu optimieren. Dieser Optimierungsprozess innerhalb der **Komponentenoptimierungssoftware** ist iterativ, kommt jedoch bereits in dieser frühen Phase des Entwurfsprozesses zum Einsatz, um eine geeignete Materialverteilung zu ermitteln. Der mehrstufige Iterationsprozess ist erforderlich, da die oft stark zerklüfteten Ergebnisstrukturen nur als Vorschlag für die ersten Entwürfe eines Bauteils dienen können. Die Feinauslegung der strukturbestimmenden Bauteilgrenzen, z. B. durch Optimierung der Form von Spannungskerben, folgen im Anschluss. Die Bemessung geht bereits tiefer ins Detail. Hier werden Topologie und Form eines Bauteils festgelegt. Das Vorgehen dieses Prozessschritts ist nicht standardisiert. Zunächst definiert der Anwender, welcher Bauraum für das betrachtete Bauteil zur Verfügung steht. Im Anschluss wird eruiert, welche Lasten an welcher Stelle auf das Bauteil in der Nutzungsphase wirken werden und wo die Form nicht verändert werden soll (z. B. an Bohrungen). An dieser Stelle erhält die Optimierungssoftware die entsprechenden Daten bspw. aus einer Finite-Elemente-Analyse. Die erste Iterationsschleife endet mit der Anpassung der Bauteilstruktur mithilfe der Variation des Elastizitätsmoduls der finiten Elemente. Der iterative Prozess gewährleistet u. a. maximale Festigkeit und Steifigkeit bei geringem Gewicht und Materialeinsatz, geringeren Energieaufwand bei der Herstellung des Produkts sowie reduzierten Aufwand im Entwicklungsprozess. Die Rechenzeiten sind jedoch hoch. Dies resultiert häufig auch in den hohen Kosten.

In der **Vorbereitungssoftware** wird das CAD-Modell importiert, ausgerichtet, die notwendigen Halterungen angebracht und das Ergebnis geprüft. Mithilfe einer **Simulationssoftware** können etwaige Einflüsse von z. B. der Temperatur, Spannung und Porosität untersucht werden. Die Definition der geeigneten Parameter zur additiven Fertigung erfolgt innerhalb einer eigens dafür vorgesehenen **Systemsoftware**. Das für den Einsatz auszuwählende Pulver wird ebenfalls innerhalb einer separaten Software (**Pulververwaltung**) hinsichtlich Qualität und Eignung geprüft. Dieser Schritt bildet den Abschluss der digitalen Prozesskette der additiven Fertigungsverfahren.

Mittlerweile verfügt die Prozesskette über maßgeschneiderte Softwarelösungen diverser Anbieter, die einen reibungslosen, stärker integrierten Arbeitsablauf ermöglichen, von der Datenaufbereitung bis hin zu Fertigungssteuerungssystemen und digitaler Lagerverwaltung. Spezielle Design- und Simulationsmodule haben die Druckdatenaufbereitung in die Designlandschaft gebracht, sodass die Technologie nun vollständig in die Produktionsumgebung integriert ist.

# 3

## Resilienzmanagement



## Resilienzmanagement

Das unternehmerische Ziel der Steigerung der Resilienz beruht auf einer zunehmend dynamischeren Entwicklung und Internationalisierung der Produktionstechnik sowie steigenden Kundenanforderungen. Aus diesem Grund wird eine systematische Herangehensweise zum Umgang mit Krisen, Störungen und Schwankungen innerhalb von Unternehmen und Lieferketten benötigt. Das gängigste Konzept dazu ist das Risikomanagement, welches normativ durch die deutsche ISO-Norm ISO 31000 standardisiert ist [DIN 18]. Zentrales Element darin ist das proaktive Handeln eines Unternehmens der Lieferkette, vor dem Eintritt einer Störung potenzielle Risikofaktoren zu identifizieren, zu analysieren und zu bewerten, um sie anschließend in Form der Akzeptanz, Verminderung oder Vermeidung zu bewältigen. In die Bewertung der Risikofaktoren fließen das sog. potenzielle Schadensausmaß, die Fehlerschwere, und die erwartete Eintrittswahrscheinlichkeit ein. Die Maßnahmen der Risikobewältigung orientieren sich an den beiden Bewertungsgrößen und minimieren entweder die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Krise oder deren Auswirkung. Trotz der überwiegenden Mehrheit der deutschen Unternehmen, welche im Jahr 2020 ihr eigenes Risikomanagement als gut bis sehr gut bewerteten, beläuft sich z. B. der Schaden infolge der COVID-19-Pandemie nach ca. einem Jahr auf ca. 250 Mrd. Euro Wohlfahrtsverlust [ULRI 21]. Dies führt zu der Annahme, dass die Etablierung eines guten bis sehr guten Risikomanagements nicht ausreichend ist, um den Schaden innerhalb von Lieferketten infolge von Störungen zu minimieren oder aber, dass die Bewertungskriterien für das eigene Risikomanagement nicht mehr aktuell sind.

Ein etabliertes Resilienzmanagement ermöglicht im Vergleich zum Risikomanagement die Belastbarkeit von bspw. Lieferketten gegenüber äußeren Einflüssen nach Eintreten einer Störung zu stärken. Jede Störung kann als Chance betrachtet werden, eine Lieferkette optimal auf veränderte Marktbedingungen auszurichten und weitere Wettbewerbsvorteile abzuleiten. Dabei gilt: Je geringer der Schaden infolge einer Störung, desto resilienter ist die Lieferkette. Im Fokus stehen die Fähigkeit zur kurzfristigen Rückkehr zu der als Standard definierten Funktionsfähigkeit einer Lieferkette und die innovative Nutzung von Vorteilen, die sich aus Veränderungen der Umweltbedingungen ergeben. Weiterhin zeichnet eine hohe Resilienz aus, dass das System bei Eintreten einer Störung oder dem Teilausfall von Komponenten nicht einem Totalausfall unterliegt und die Funktionalität wichtiger Bereiche aufrechterhalten wird. Eine Koexistenz von Risiko- und Resilienzmanagement ist für den wirkungsvollen Umgang mit Krisen für Lieferketten demzufolge essenziell [EURO 18].

### 3.1 Treiber der Resilienz in der Produktion und entlang der Lieferkette

Funktionierende Lieferketten haben aufgrund der zentralen Rolle der deutschen Außenwirtschaft unter dem Stichwort *Exportweltmeister Deutschland* eine große Bedeutung für die Industrie. Die Exportquote des deutschen Maschinenbaus, eine der umsatzstärksten Branchen Deutschlands, lag bspw. 2020 bei 80,9 % [STAT 21]. Trotz dieser hohen Relevanz unterliegen Lieferketten diversen Störungen unterschiedlicher Ursache oder Vorhersehbarkeit (z. B. Pandemien, Handelsstreitigkeiten, Produktionsausfälle etc.) und gelten als sehr fragil.

Abbildung 6 zeigt die nach Dassault Systèmes 2020 als wichtigste deklarierten Bereiche der sog. Last-Mile Lieferung in den nächsten drei Jahren. Neben der Geschwindigkeit und Nachhaltigkeit zählt dazu vor allem die steigende Anzahl der Lieferoptionen, sowohl für Endkunden als auch für Unternehmen innerhalb der Lieferkette, mit 65 %. Dazu wurden 314 Führungskräfte weltweit aus dem Bereich Supply Chain befragt [DASS 20].



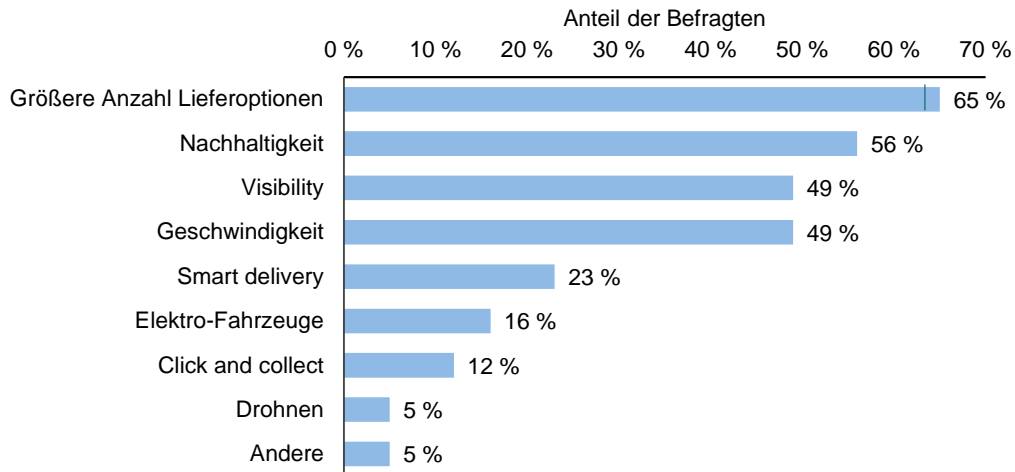


Abbildung 6: Entwicklung der Last-Mile-Lieferung bis 2023 [DASS 20]

Jede fünfte Lieferkettenunterbrechung verursacht Schäden zwischen einer Viertel und einer ganzen Million Euro [BME 20]. Gemäß einer Studie von Deloitte waren 74 % der befragten Unternehmen mit Störungen einer Drittpartei innerhalb der letzten drei Jahre ausgesetzt [YAUC 17]. 20 % der Unternehmen gaben bzgl. der Störungen an, dass die Zulieferer ausfielen oder sie zu großen Konsequenzen führten. Lieferkettenausfälle mit einer Störungsdauer werden laut einer McKinsey Studie in einem zeitlichen Intervall von zwei Jahren erwartet [LUND 20], langfristige Störungen (> 2 Monate) hingegen ca. alle fünf Jahre. Lieferketten im Segment des Kommunikationsequipments sind etwaigen Störungen am stärksten ausgesetzt, gefolgt von der Bekleidungsindustrie und Petroleumprodukten. Lieferketten für medizinische Geräte und Nahrungsmittel hingegen verfügen über das geringste Störpotenzial (s. Abbildung 7).

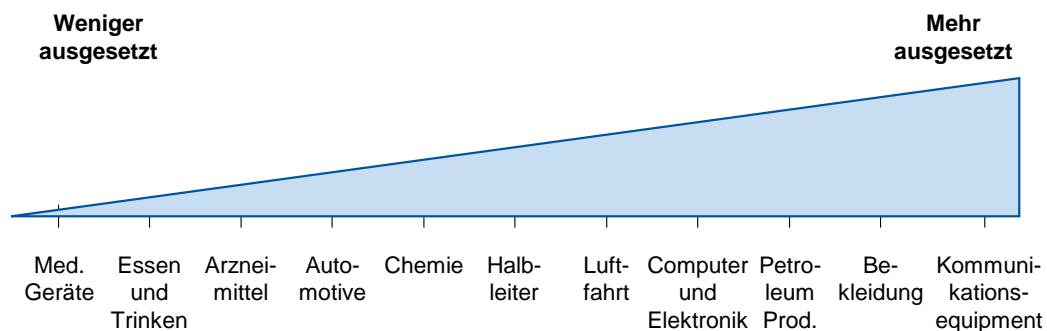


Abbildung 7: Ausprägung von Störungen in Abhängigkeit der Lieferkettenbranche [LUND 20]

Die Verteilung aus Abbildung 7 betrifft jedoch ausschließlich die Anfälligkeit für Störungen. Die wirtschaftlichen Konsequenzen einer kollabierten Lieferkette wiegen im Bereich Luftfahrt und Automotive am höchsten. Der Kapitalwert der erwarteten Verluste innerhalb der nächsten zehn Jahre wird auf über 50 % der jährlichen EBITDA geschätzt. Dies bedeutet für den Automobilsektor ein Verlust von 6,4 Mrd. USD (s. Abbildung 8).

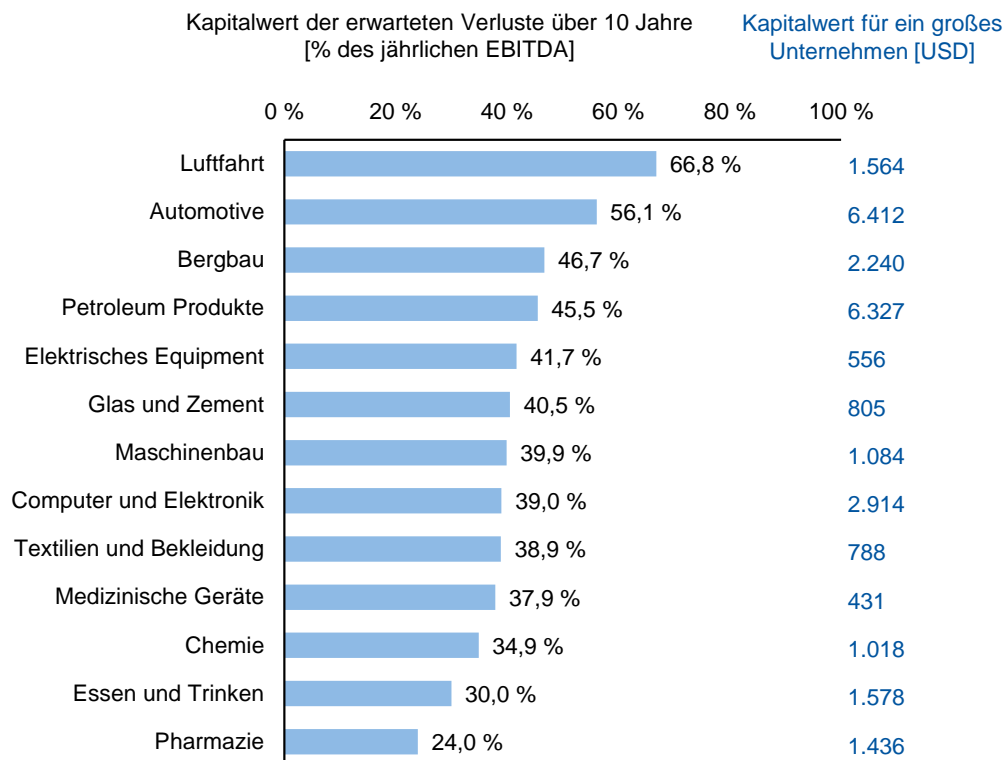


Abbildung 8: Die wirtschaftlichen Konsequenzen von Lieferkettenstörungen für die entsprechende Branche [LUND 20]

Um die Bedeutung des AM zur Steigerung der Resilienz in Lieferketten zu diskutieren und im späteren Verlauf zu quantifizieren, ist es notwendig den generellen Aufbau einer Lieferkette in der allgemeinen Produktionstechnik aufzuzeigen. Ferner können betrachtete Störungen, deren Eintrittswahrscheinlichkeit und das verursachte Schadensausmaß dann zielgerichtet eingeordnet werden. Lieferketten bestehen aus mehreren Ebenen, welche eng miteinander verzahnt sind. An der Spitze steht meist ein OEM. Auf die direkten Modul- und Systemlieferanten (Tier-1-Supplier) folgen die Ebenen der Komponentenlieferanten (Tier-2) und Teilelieferanten (Tier-3). Die Verzweigung ist nach unten hin offen (Tier-n). Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Unternehmen insgesamt sieben- bis 17-mal so viele Lieferanten haben können wie in der ersten Ebene. Die meisten Unternehmen haben einen gewissen Überblick über die potenziellen Risiken bei ihren direkten Zulieferern. Diese Transparenz sinkt jedoch deutlich in Abhängigkeit der untergeordneten Ebenen des Lieferantennetzwerks und machen ein ganzheitliches Risiko- und Resilienzmanagement so schwierig. Dennoch ist eine Umsetzung erforderlich. Deloitte zufolge erwarten OEM und Tier-1-Supplier bei ihren A-Lieferanten eine globale Standortstrategie bei gleichbleibender Qualität [BUTZ 14]. 93 % der globalen Supply-Chain-Leader planen aus diesem Grund ihre Resilienz strategisch zu verbessern [LUND 20].

Ein zentraler Treiber dazu stellt die additive Fertigung dar. Bereits 2016 gaben 50 % der Befragten einer Erhebung von EY und Bitkom zufolge an, dass AM zu den wichtigsten Technologietrends in Industrieunternehmen zählt (s. Abbildung 9). Davon erachteten 14 % die Technologie als sehr wichtig, 18 % als überhaupt nicht wichtig. Befragt wurden 700 Unternehmen in Deutschland, davon ca. 500 aus dem verarbeitenden Gewerbe und 150 aus der Informations- und Telekommunikationsbranche [EY 16]. Es kann angenommen werden, dass die Bedeutung der Technologie AM heutzutage bereits wesentlich höher eingestuft wird.

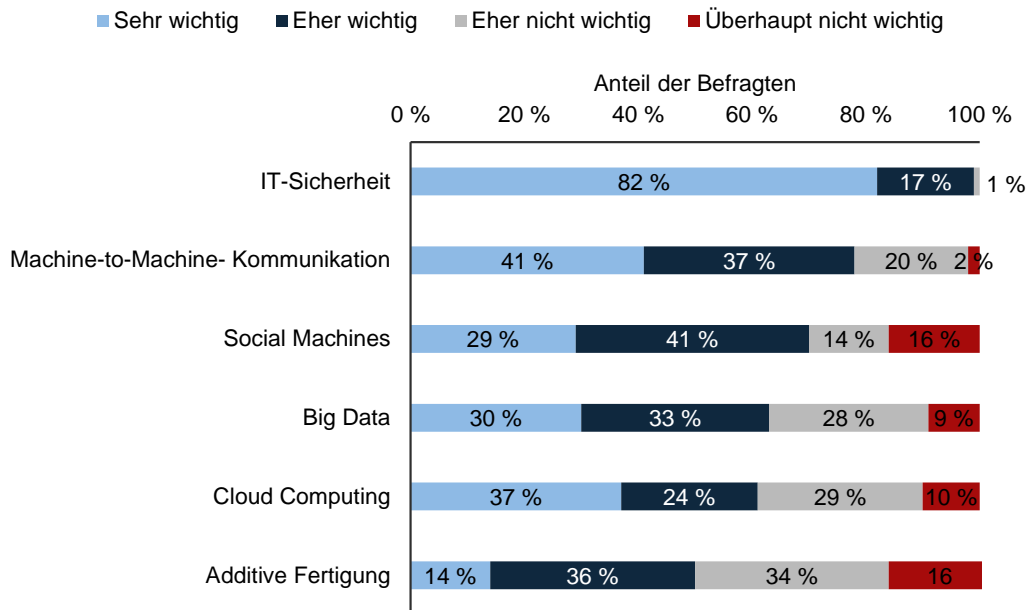


Abbildung 9: Umfrage zu den wichtigsten Technologietrends in Industrieunternehmen in Deutschland, Stand 2016 [EY 16]

Einer Umfrage von Sculpteo (BASF) an 1900 Befragte aus 71 Ländern, 2021, zufolge gaben 14 % der Befragten an, dass das AM im Bereich Lieferkettenmanagement einen Vorteil für Unternehmen mit sich bringt. Den größten Vorteil sahen die Befragten in der Herstellung komplexer Geometrien (69 %), gefolgt von der Möglichkeit der schnellen Iteration (52 %) und auch der generellen Kosteneinsparung (30 %) (s. Abbildung 10) [SCUL 21].

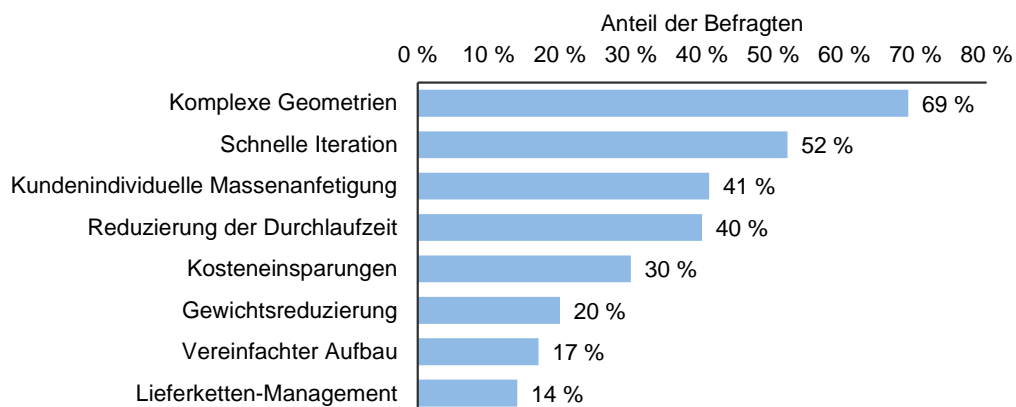


Abbildung 10: Umfrage zu den Vorteilen von AM für Unternehmen, Stand 2021 [SCUL 21]

### 3.2 Dimensionen der Resilienz

Ein ganzheitliches Resilienzmanagement beinhaltet zwei verschiedene Arten eines effektiven Umgangs mit Störungen [HAME 03]. Maßnahmen, um nach einer Störung in den bevorzugten Ausgangszustand einer funktionierenden Lieferkette zurückzugelangen, werden dem reaktiven Resilienzmanagement zugeordnet. Ein derartiges Resilienzverhalten geht jedoch insbesondere bei kurzen Störungsintervallen mit verschwindend geringen Reaktionszeiten einher, sodass potenziell kritische Situationen und neue Ausfälle der Lieferkette verursacht werden können. Nach Behebung von Lieferkettenstörungen mittels des reaktiven

Resilienzmanagements müssen übermäßige Ressourcen auf ein stabileres und wirtschaftlicheres Niveau zurückgeführt werden (bspw. zusätzliches Personal).

Im Vergleich zu einem reaktiven Verhalten zeichnet sich antizipatives Resilienzmanagement durch eine vorausgehende Identifikation von Störungen auf Basis von abgeleiteten Mustern und Trends mithilfe von Analysen und dem Einsatz datengetriebener Methoden aus. Auf Basis einer robusten, verständlichen und qualitativ wertigen Prognose sowie mithilfe des frühzeitigen Erkennens von Störungsmustern aus Lieferketten- und Produktionsdaten können Lieferrouten, Lieferanten und Fertigungsprozesse neu geplant und optimiert werden. Die Erwartungen an die Nutzenpotenziale einer datenbasierten Vorhersage von Störungen entlang der Lieferketten weisen eine deutlich größere Vielfalt als die reaktive Variante auf. Dennoch sind beide Typen des Resilienzmanagements eng miteinander verknüpft und liefern für die Lieferkettenplanung und -steuerung eine differenzierte Wissensbasis. Die Erkenntnisgewinne aus reaktiven Verhaltensmaßnahmen legen die Basis für das Ableiten von Resilienzwissen und eine höhere Antizipationsfähigkeit.

Resilienzmanagement wird innerhalb eines produzierenden Unternehmens hinsichtlich der Schutz- und Belastungsfaktoren in drei systematische Ebenen strukturiert [PRÜM 20]: Auf der sog. Makro-Ebene sind die Planungshorizonte netzwerkbezogen (s. Abbildung 11), auf der Meso-Ebene unternehmensweit und auf der Mikro-Ebene lokal orientiert. Das unternehmensübergreifende Planen und Steuern einer Lieferkette ist durch das Resilienzmanagement auf Makro-Ebene charakterisiert.

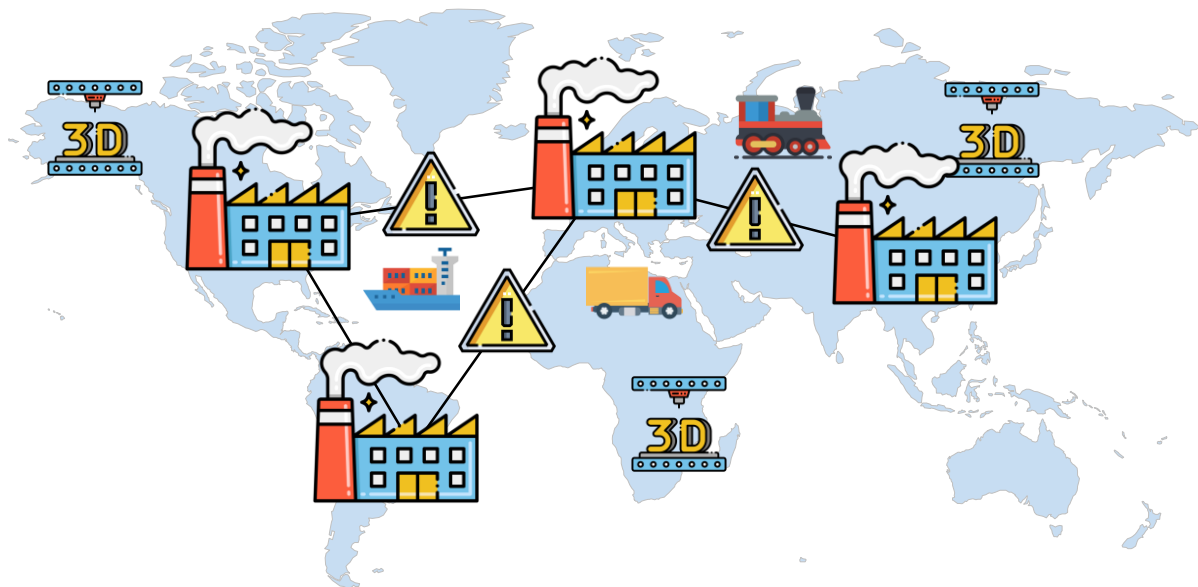


Abbildung 11: Lieferketten-Resilienz auf Makro-Ebene i. A. a. [PRÜM 20]

Das Resilienzmanagement auf Makro-Ebene betrifft das gesamte Netzwerk von Unternehmen (Ökosystem) einer Lieferkette, ausgehend von der ersten Wertschöpfungsstufe bis hin zum Endprodukt an verschiedenen Prozessen und Tätigkeiten zur Erbringung von Produkten und Dienstleistungen für den Endkunden. Politische Störungen wie Strafzölle, EU-Ein- oder Austritte und Veränderungen der Gesetzeslage beeinflussten internationale Lieferketten infolge der zunehmenden internationalen Vernetzung der Unternehmen, der engeren globalen Handelsbeziehungen und deren Abhängigkeiten der letzten Jahre am stärksten [BME 20]. Die Anfälligkeit für Störungen entlang der Lieferkette wird durch Lieferanteninsolvenz- und Cyber-Sicherheitsrisiken sowie Nachhaltigkeit und Compliance zusätzlich erhöht. Zur Steigerung der Flexibilität suchen 47 % der international aktiven Unternehmen mit Logistikproblemen neue oder zusätzliche Lieferanten mit kürzeren Lieferwegen für ihre Produkte, erhöhen ihre



Lagerhaltung (41 %) und die Redundanz der Lieferanten (> 20 %), welche vorzugsweise auf verschiedene Länder und Transportwege (Land, See, Luft) verteilt ansässig sind. Einige Unternehmen verlagern die Fertigung ausgewählter Teile sogar in die eigene Produktion (11 %). In Unternehmen mit bereits implementiertem Resilienzmanagement orientierten sich die Maßnahmen überwiegend auf die Steigerung der Redundanz bei der Beschaffung von Rohmaterialien, Bestandserhöhungen und die Regionalisierung der Lieferkette (s. Abbildung 12) [LUND 20].

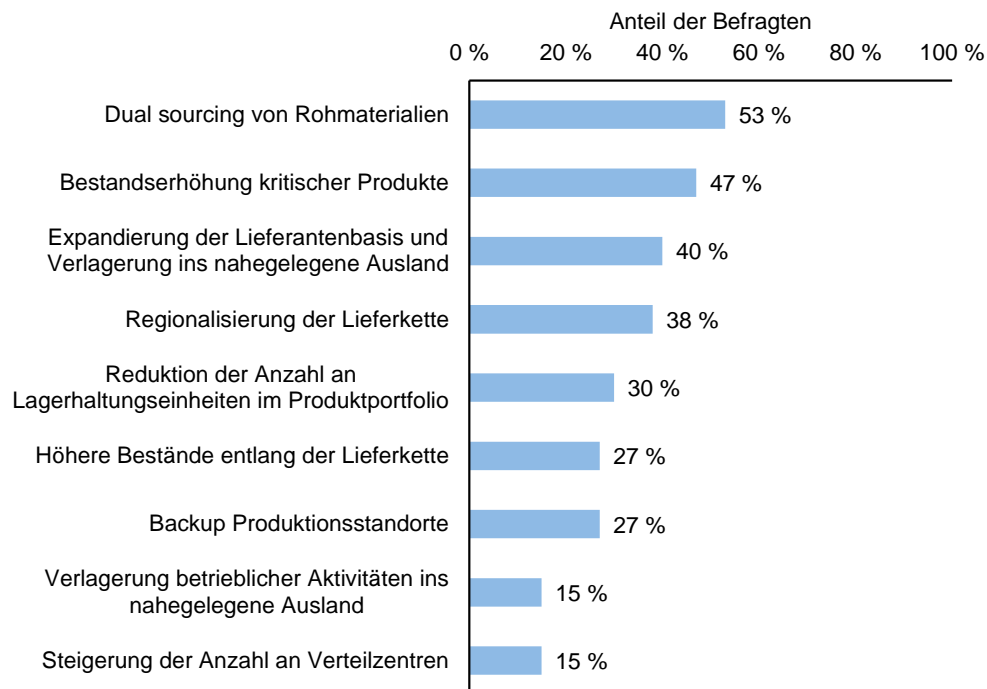


Abbildung 12: Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz einer Lieferkette [LUND 20]

Die beschriebenen reaktiven oder antizipativen Maßnahmen sind z. T. nur wenig wirtschaftlich und lösen nicht das vorherrschende Problem eines fehlenden Datenaustauschs zwischen Unternehmen der Lieferkette als Ursache mangelnder Resilienz. Die Kürze der Informationswege und die vollständige Transparenz eines jeden Lieferanten entscheiden über die Anpassung der Lieferkette. Ein fehlender unternehmensübergreifender Informationsaustausch kann somit Lieferverzögerungen oder -ausfälle zur Konsequenz haben. Insbesondere die Transparenz von Sub-Lieferanten führt immer häufiger zu Unterbrechungen der Lieferketten. Über 75 % der befragten Unternehmen haben keine Einblicke in die tieferen Lieferebenen und können die Störungsursache weder reaktiv identifizieren noch antizipativ prognostizieren. Die Analyse und Trendprädiktion von Daten aus Branchenstatistiken, Social Media, Nachrichtenmeldungen, Verkehr oder Wetterstationen sowie jeglichen Lieferanten unterstützen eine Lieferkette dabei, sich verändernde Vorschriften bei der Ein- und Auslieferung, Engpässe oder Aufschwungsszenarien frühzeitig aufzudecken und rechtzeitig anzupassen. Lieferverzögerungen und -ausfälle können durch die Nutzung verfügbarer Datensätze minimiert werden. Um resilient aufgestellt zu sein, muss eine Lieferkette ausgewählte Anforderungskriterien erfüllen, welche im Folgenden beschrieben werden.





# 4

## Anforderungen an Resilienz innerhalb der Supply Chain



## Anforderungen an Resilienz innerhalb der Supply Chain

Eine resiliente Supply Chain zeichnet sich durch ein geeignetes Design der Lieferkette (z. B. Länge der Lieferkette), der Lieferkettenprozesse (z. B. Entkopplungspunkt) und der Beziehung zwischen den Unternehmen von der Rohstoffgewinnung über die Veredelungsstufen bis hin zum Endverbraucher (z. B. Datenhandel) aus [WICH 12]. In Analogie an die Anforderungen an ein resilientes Produktionssystem kann eine Lieferkette als resilient bezeichnet werden, wenn sie die folgenden Anforderungen erfüllt [THUN 20], siehe Abbildung 13:

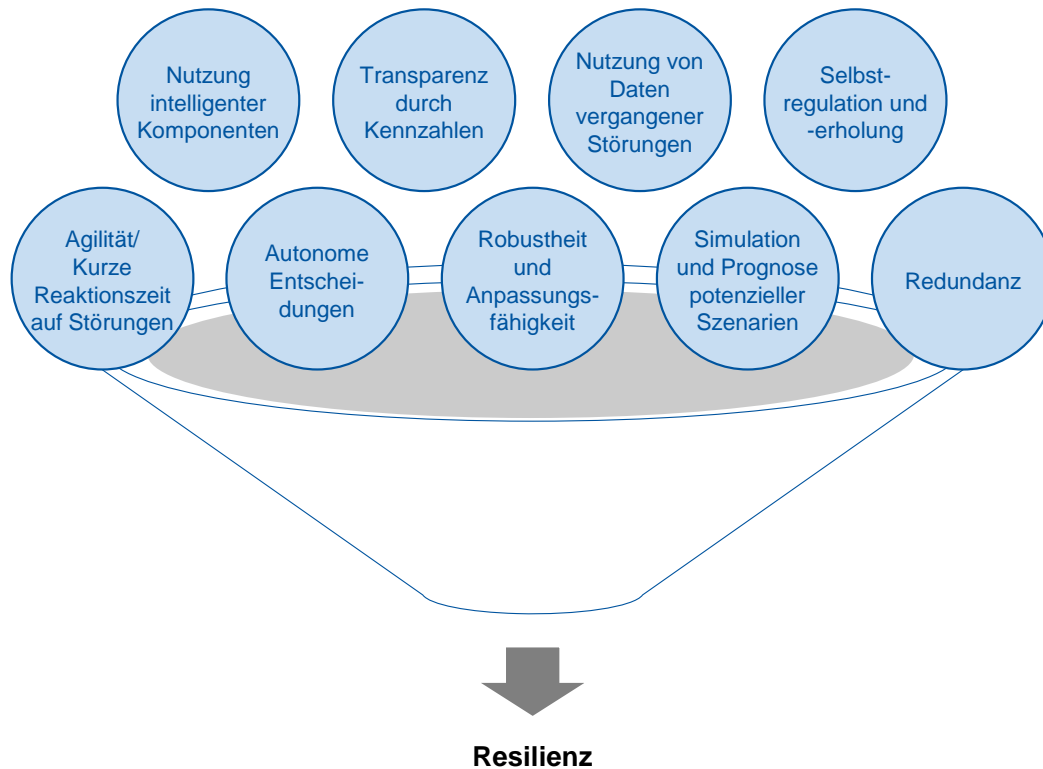


Abbildung 13: Anforderungen an eine resiliente Lieferkette

Zur Bewertung der Makro-Resilienz einer Lieferkette und zum wettbewerbsorientierten Benchmarking können Key Performance Indikatoren (KPI) anhand der beschriebenen Anforderungen definiert werden. Je mehr KPI bzw. je stärker die Ausprägung eines ausgewählten KPI ist, desto resilienter ist die Lieferkette. Ein separater Resilienzindex, welcher durch die Verrechnung der einzelnen KPI gebildet wird, stellt sicher, dass bei einem wettbewerblichen Vergleich keine sensiblen Informationen bzgl. der Lieferkette publik werden.

Im Folgenden werden in Anlehnung an die Anforderungen an eine resiliente Lieferkette zehn KPI zur Messung der Resilienz empfohlen, welche im Anschluss hinsichtlich der Beeinflussbarkeit durch die Technologie der additiven Fertigungsverfahren geprüft werden. Die einzelnen KPI werden hinsichtlich der Art des Resilienzmanagements (reaktiv, antizipativ) klassifiziert. Ein reaktiver Indikator beschreibt die Fähigkeit des Unternehmens, auf Disruptionen schnellstmöglich zu reagieren und ein antizipativer Indikator definiert die Fähigkeit, Störungen und Unregelmäßigkeiten im Betriebsablauf vorherzusehen.





# 5

## Messbarkeit von Resilienz in der Supply Chain



## Messbarkeit von Resilienz in der Supply Chain

Zur Messung der Resilienz sind diejenigen KPI von Bedeutung, die eine Lieferkette bei Störungen zu Robustheit, Agilität, Anpassungsfähigkeit und Integrativität befähigen. Die **Anzahl an Produktionsstätten bzw. Lieferanten, die dasselbe Produkt fertigen/liefern**, stärkt die Forderung nach Redundanz und Robustheit. Je mehr Zulieferer dieselbe Produktkategorie produzieren können, desto resilienter ist die Lieferketten hinsichtlich Lieferausfällen. Eine Lieferkette, welche diese beiden KPI erfüllt, handelt im Sinne des Resilienzmanagements antizipativ. Da die Flexibilität der Supply Chain eine übergeordnete Rolle einnimmt, zeigt Abbildung 14 konkrete Ansatzpunkte zur Erhöhung jener. Die Ergebnisse stammen aus einer Umfrage der PricewaterhouseCoopers (pwc)-PRTM aus 2011, bei der ca. 150 Firmen aus den Branchen Automotive, Maschinenbau, Elektronik, Telekommunikation und Konsumgüter befragt wurden [PRTM 11].

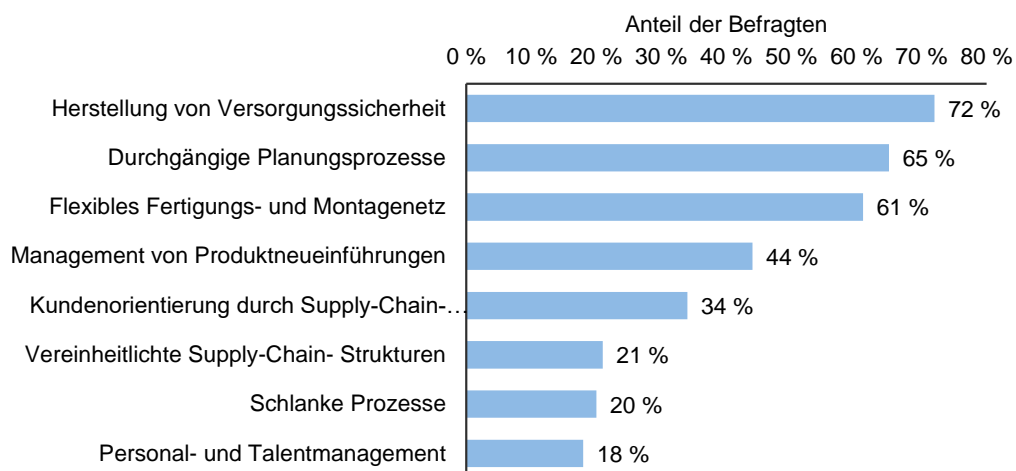


Abbildung 14: Ansatzpunkte zur Erhöhung der Flexibilität von Supply Chains [PRTM 11]

Der sog. **Fragile States Index (FSI)** der Lieferkette ist eine weitere Kennzahl der Resilienz (antizipativ), welche die Robustheit auf Makro-Ebene steigert. Der Fragile State Index misst die Stabilität eines Landes. Je höher der Indexwert, desto weniger stabil wird ein Land eingeschätzt. Um eine Bewertung der Resilienz einer Lieferkette zu messen, werden die Standorte der beteiligten Unternehmen mit dem FSI bemessen. Viele Standorte in fragilen Staaten bedeuten eine wenig resiliente Lieferkette. Abbildung 15 zeigt eine Auflistung der stabilsten Länder gemessen an ihrem FSI im Jahr 2021. Weltweit haben die USA (+6,3 %), Armenien (+5,6 %) und Spanien (+4,4 %), gefolgt von Rumänien (+4,1 %), Belgien (+3,9 %) und Tschechien (+3,5 %) ihren FSI-Wert erheblich verschlechtert, wohingegen Timor-Leste (-1,8 %) und Usbekistan (-1,1 %) ihren FSI mitunter verbessern konnten [FUND 21].

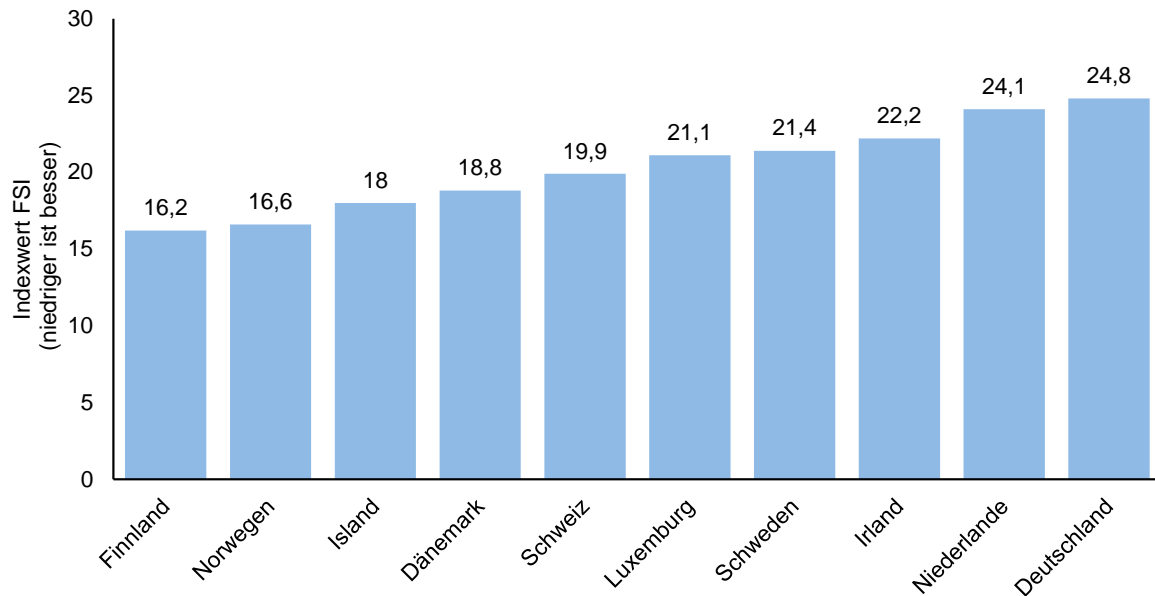


Abbildung 15: Europa: Ranking der 10 stabilsten Staaten nach dem Fragile States Index 2021 auf einer Skala von 0 bis 120 [FUND 21]

Die Kennzahl der **Branchendiversität** gibt in absoluten Zahlen die Anzahl der Branchen der Endverbraucher an, die die Lieferkette beliefert. Je höher die Diversität ist, desto höher die Robustheit und dementsprechend die antizipative Resilienz der Lieferkette gegenüber Störungen einzelner Absatzwege.

Die **Lieferflexibilität** beschreibt die reaktive Fähigkeit einer Lieferkette, auf sich kurzfristig verändernde Bedürfnisse des Empfängers (Produktart, -menge, Lieferzeitpunkt) einzugehen. Je höher die Anzahl erfüllter „Sonderwünsche“ desto höher die Flexibilität und demzufolge die Resilienz der Lieferkette. Kleine Lieferumfänge und agile Fertigungsverfahren zur Fertigung individueller, innovativer Kundenwünsche unterstützen diese Kennzahl. Wesentliche Ansatzpunkte aus einer Befragung an zur Steigerung der Flexibilität in der Lieferkette zeigt Abbildung 16.

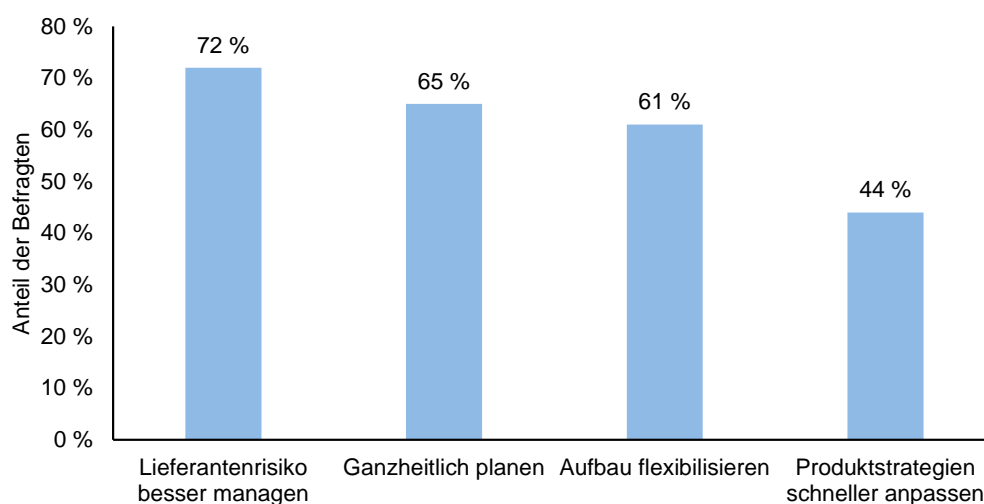


Abbildung 16: Ansatzpunkte für eine höhere Flexibilität in der Lieferkette von Unternehmen [PRTM 11]

Ein weiteres Element des reaktiven Resilienzmanagements ist die **kumulierte Liefertreue**. Einer der führenden Plattformen für B2B-Lieferanten *Wer liefert was* (WLW) zufolge bestehen die Vorteile einer hohen Liefertreue für den Kunden insbesondere in [WLW 21]:

- Einer besseren Planbarkeit der Produktion und betrieblicher Abläufe
- Geringen Mindestbeständen und somit Einsparungen bei Lagerkosten
- Einer größeren Kundenzufriedenheit und höheren Kundenbindung
- Einer gesteigerten Wahrscheinlichkeit für höhere Auftragsvolumina
- Einer ggfs. besseren Positionierung von Lieferant und Kunde im Wettbewerb

Verfehlte Liefertermine haben nicht nur mögliche Produktionsstillstände, sondern oftmals auch Vertragsstrafen zur Folge. Je geringer die Anzahl an Sonderfahrten in Abhängigkeit an die Gesamtanzahl an Auslieferungen an die Kunden ist, desto höher ist die Robustheit der Lieferkette. Weiterhin wirkt sich eine geringe Liefertreue stark auf die Kundenzufriedenheit aus [FISC 21].

Ebenfalls reaktiv wirkt sich die **Lieferqualität** auf die Resilienz der Lieferkette aus. Eine geringere Anzahl reklamierter Auslieferungen an die Kunden repräsentiert eine robuste Supply Chain. Als Orientierung von erwarteten Produkteigenschaften an mit dem Label *Made in Germany* in Verbindung gebrachte Eigenschaften nach dem Made-In-Country-Index zeigt Abbildung 17. Dazu zählen insbesondere eine hohe Qualität, die Erfüllung von hohen Sicherheitsstandards und eine Fortschrittliche Technologie, aber auch die Eigenschaften Nachhaltig, Design und Statussymbol [DALI 17].

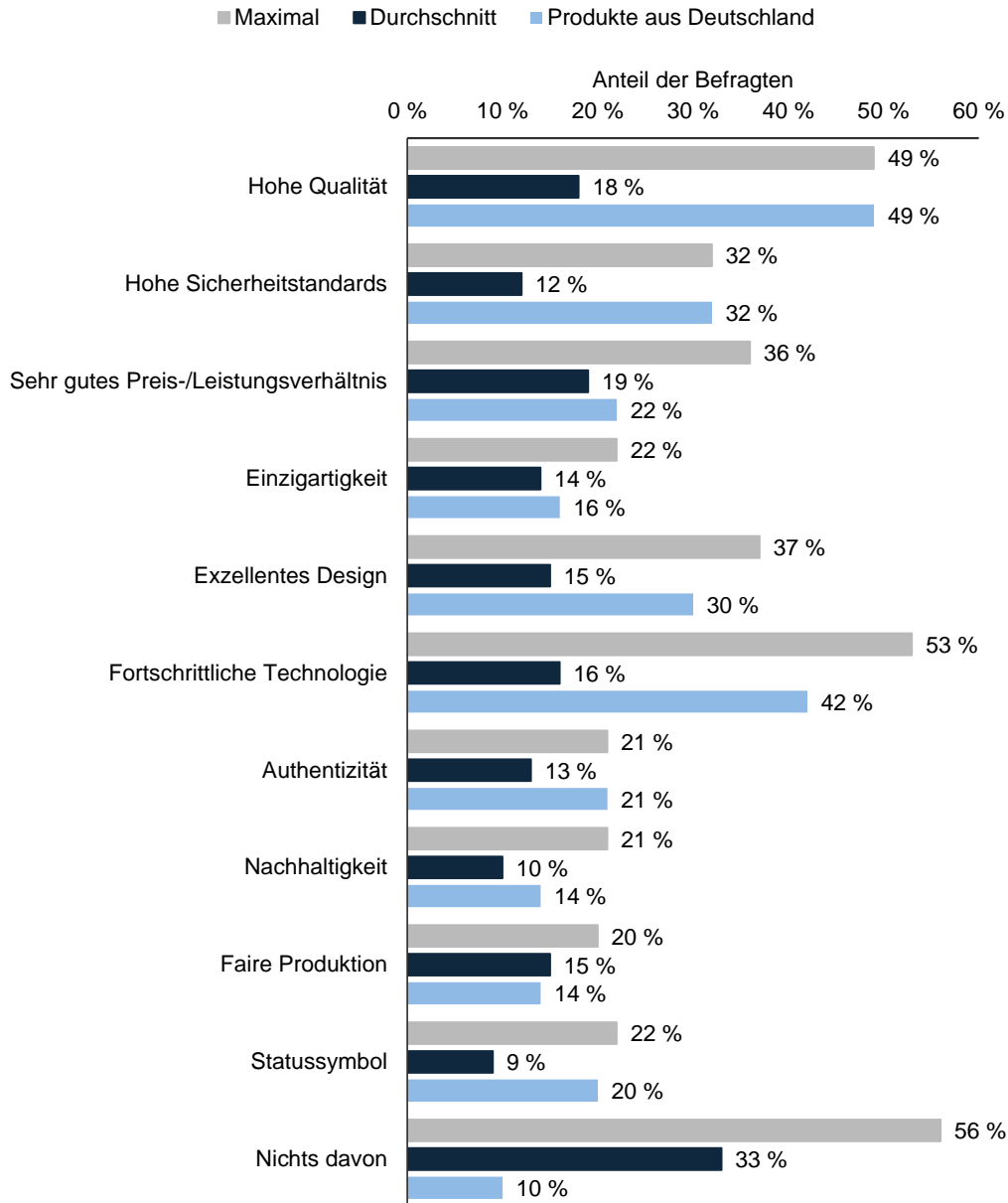


Abbildung 17: Mit dem Label Made in Germany verbundene Eigenschaften nach dem Made-In-Country-Index: Wahrgenommene Eigenschaften von Produkten aus Deutschland 2017 [DALI 17]

Die **Zuliefererdiversität** auf Basis des Herfindahl-Hirschman-Index (HHI) repräsentiert die Unterschiedlichkeit der beteiligten Stakeholder einer Lieferkette. Lieferverzögerungen, Rohstoffmangel oder andere Störungen auf Zuliefererseite können bei erhöhter Diversität der Zulieferer infolge mangelnder Abhängigkeit z. B. durch Umplanung der Rohstoffimporte besser abgefangen werden und die Resilienz auf antizipative Weise steigern. Daher setzt die Vielzahl der Fortune-500-Unternehmen bereits Initiativen zur Lieferantenvielfalt ein. Nach ADOBOR und MCMULLEN kann die Zuliefererdiversität zu Wettbewerbsvorteilen für Unternehmen führen, sofern sie in die Gesamtstrategie des Unternehmens integriert wird [ADOB 07].

Die **Redundanz von Warenlagern** erhöht die Resilienz einer Lieferkette antizipativ. Teile/Rohstoffe, welche in mehreren Lagern gehalten werden, reduzieren die Abhängigkeiten entlang der Lieferkette und reduzieren die Auswirkungen von Störungen bei einer zentralen Lagerung.



Aus dem Gebiet der IT und Datenverarbeitung legt eine **unternehmensübergreifende Datenverarbeitung** (reaktiv) die Basis für eine **unternehmensübergreifende Vernetzung** (reaktiv und antizipativ) und somit für kurze Reaktionszeiten und datenbasierte Störungsprognosen auf Basis von Mustern und Trends. Nach einer Studie der pwc GmbH an Führungskräfte aus bundesweit 210 Großunternehmen und KMU tauschen 2017 etwa 75 % der Unternehmen bereits Daten mit Kunden, Lieferanten oder anderen Unternehmen aus [FEDK 17], ca. 63 % regelmäßig bis flächendeckend (Abbildung 18 & Abbildung 19).

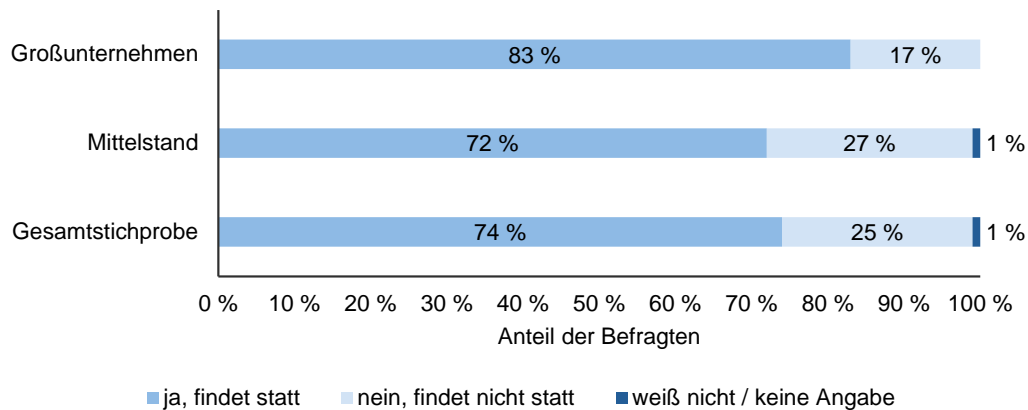


Abbildung 18: Aktuell stattfindender Datenaustausch von Unternehmen mit anderen Unternehmen, Kunden und Zulieferern [FEDK 17]

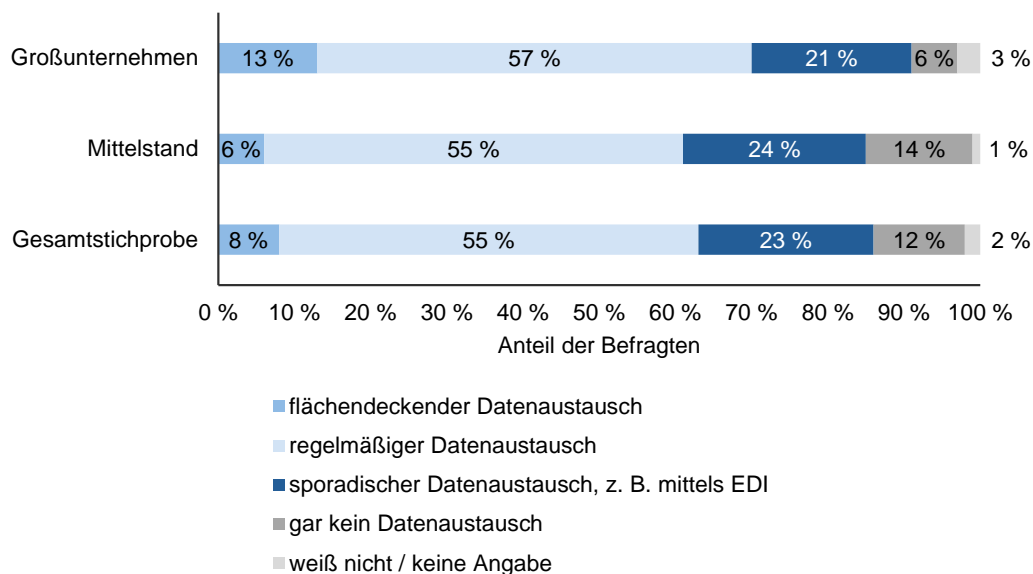


Abbildung 19: Regelmäßigkeit des Datenaustauschs mit anderen Unternehmen nach Betriebsgröße [FEDK 17]

Dazu zählen Daten innerhalb der Supply Chain zur Lagerhaltung und zum Bestand, zu Produktionsabläufen und zum Lieferstatus von Produkten und Gütern [FEDK 17]. Adressaten des Datenaustauschs sind zu 83 % Kunden und zu 53 % Lieferanten, aber auch zu 15 % Wettbewerber und auch zu 21 % andere brancheneigene sowie branchenfremde Unternehmen. Die Stichprobe der befragten Unternehmen betrug n = 156 befragte innerhalb Deutschlands (s. Abbildung 20).

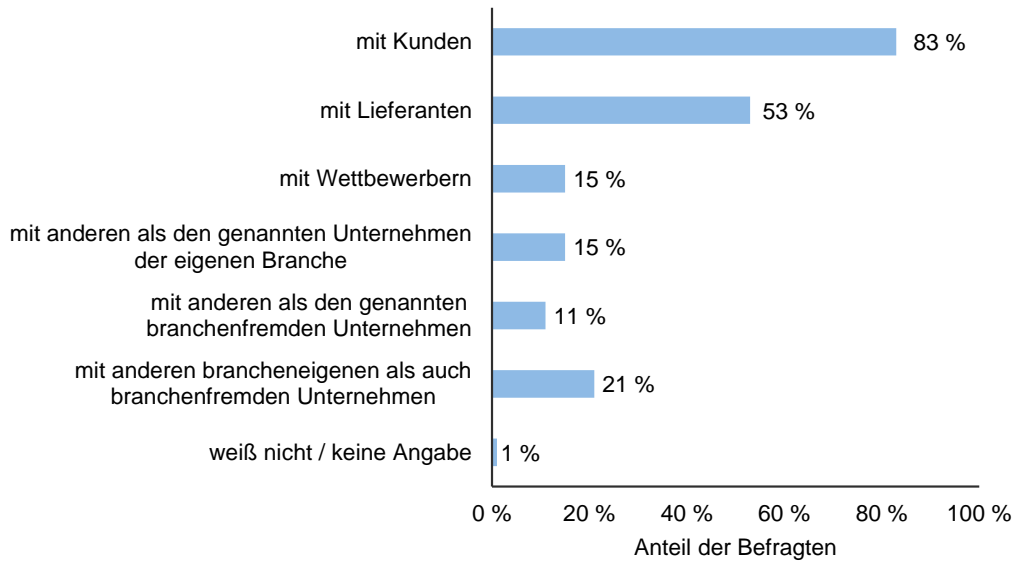


Abbildung 20: Art der Unternehmen, mit denen aktuell Daten ausgetauscht werden [FEDK 17]

29 % der Befragten gaben an, dass sie Sicherheitsrisiken und den Kontrollverlust über ihre Daten als Hindernis für den Datenaustausch sehen [FEDK 17]. Lösungen wie ein DSGVO-konformer Datenmarktplatz, welcher z. B. auf Distributed-Ledger-Technologien basiert, schafft in dieser Hinsicht Vertrauen und Sicherheit. 69 % gaben unternehmensübergreifendem Datenaustausch eher große Chancen für mehr Effizienz und eine bessere Koordinierung in der Lieferantenkette (Abbildung 21). Zusätzlich sehen 75 % der Befragten sehr große Chancen (Mittelwert 4,1 auf einer Skala von 0 bis 5) für die Verbesserung der Kundenbeziehung und eine präzise Bedienung/Belieferung der Kunden durch einen Datenaustausch [FEDK 17].

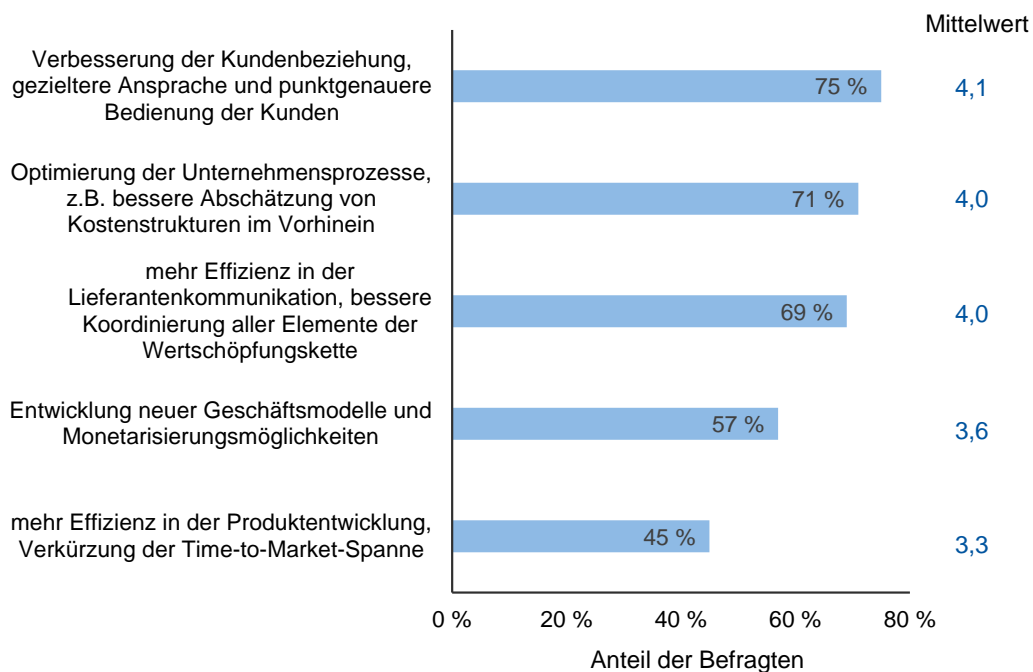


Abbildung 21: Anteile der befragten Personen, die den genannten Kategorien große und sehr große Chancen zur Verbesserung durch einen Datenaustausch zurechnen (Skala 0-5) [FEDK 17]

Die Ausprägung der Datenverarbeitung kann anhand von fünf Stufen bewertet werden (Abbildung 22, oben). Stufe 0 repräsentiert den Status einer fehlenden Datenaufbereitung, Stufe 4 hingegen repräsentiert die Vernetzung aller Datenquellen durch echtzeitfähige Edge Komponenten. Die unternehmensübergreifende Vernetzung kann ebenfalls anhand von fünf Stufen taxiert werden, ausgehend von keiner Vernetzung (Stufe 0) bis hin zur zentralen/dezentralen Lieferkettenüberwachung/-steuerung (Stufe 4), siehe Abbildung 22, unten.











	Stufe 0 	Stufe 1 	Stufe 2 	Stufe 3 	Stufe 4 
<b>Grad der DV in der Lieferkette</b>	Keine Datenaufnahme in Systemen	Syst. Datenerhebung/ Speicherung zur Dokumentation	Daten-visualisierung und stat. Analyse	DV durch Online- Tools, Unterstützung bei der Produktion	Vernetzung aller Datenquellen zur echtzeitfähigen Optimierung der Lieferketten
	Stufe 0 	Stufe 1 	Stufe 2 	Stufe 3 	Stufe 4 
<b>Vernetzungs-grad</b>	Keine Vernetzung der Produktion mit anderen Lieferketteninstanzen	Informationsaustausch über Mail/Telekommunikation	Einheitliche Datenformate/ Regeln zum Datenaustausch	Automatisierter, u.-übergreifender Informationsaustausch	(de)zentrale Lieferkettenüberwachung/-steuerung

Abbildung 22: Die Stufen der KPI „Unternehmensübergreifende Datenverarbeitung“ und „Unternehmensübergreifende Vernetzung“

Der Einsatz von additiven Fertigungsverfahren verspricht aufgrund der Charakteristika wie die großen Individualisierungs- und Designmöglichkeiten, geringen Anlaufzeiten und den Verzicht auf Werk-, Halbzeuge und Formen das Potenzial als Enabler für eine resiliente Lieferkette. Aus diesem Grund wird im Folgenden untersucht, ob und in welcher Ausprägung die additive Fertigung die Resilienz von globalen Lieferketten beeinflusst.





**6**

**Additive Fertigung in  
der Lieferkette zur  
Steigerung der Resilienz**



## Additive Fertigung in der Lieferkette zur Steigerung der Resilienz

Bereits während der COVID-19-Pandemie verhalf die additive Fertigung der Mehrheit der befragten Unternehmen (50,6 %) zu einem Zeitpuffer [SARA 20]. Durch ihre Fähigkeiten der Flexibilität, Anpassungsfähigkeit, Agilität und Nutzung von intelligenten Komponenten erfüllen die Verfahren dieser Technologie ausgewählte Anforderungen der Resilienz und eignen sich daher als Werkzeug des Resilienzmanagements entlang einer Lieferkette. Eine tiefere Analyse auf Kennzahlenebene ist hilfreich, um die Ausprägung der Resilienz zu erörtern und zu quantifizieren.

Der Aspekt der Redundanz wird durch die additive Fertigung auf indirekte Art und Weise beeinflusst und legt die Basis für eine resiliente Lieferkette. Die **Anzahl an Produktionsstätten bzw. Lieferanten, die dasselbe Produkt fertigen/liefern**, sowie die **Redundanz von Warenlagern** wird zwar im Sinne einer Resilienz nicht erhöht, dennoch bieten die Fertigungsverfahren durch eine datenbasierte, qualitativ hochwertige Fertigung eine Redundanz und Option für Teile, welche aufgrund von Störungen nicht geliefert werden können. Der Einsatz dieser digitalen Fertigungstechnologie macht beide Faktoren obsolet und erhält dennoch die Resilienz der Lieferkette. Es ist an dieser Stelle anzumerken, dass die additiven Fertigungsverfahren (ausschließlich) kostengünstig und reaktionsschnell in der Produktion von Kleinstserien ist. Daher gilt, dass Ausfälle großer Liefermengen besser durch redundante Lieferanten und/oder Warenlager aufgefangen werden können als durch die additive Fertigung. Ein Beispiel für die Wirkung der additiven Fertigung auf die Resilienz ist das sog. Ersatzteilmanagement. Die Anpassung von Serviceteilen bspw. wird mithilfe der Verfahren der additiven Fertigung in kürzester Zeit realisiert. Redundante Produkte aus Warenlagern werden ohne Resilienzverlust eliminiert und Kosten eingespart [NAGH 20].

Ein sicherer **Fragile States Index** kann durch den Einsatz von additiven Fertigungsverfahren ebenfalls nicht direkt sichergestellt werden, allerdings können durch einen Datentransfer spezifischer Produkte aus kritischen Bezugsländern die benötigten Güter detailgetreu nachgebildet werden. Störungen infolge von Zulieferern aus FSI-kritischen Ländern stellen somit keine Gefahr für die Funktionalität der Lieferkette dar. Alternativ kann die Produktion weg von etablierten traditionellen Fertigungsstandorten mit hohem FSI und näher an den Ort des Bedarfs verlagert werden. Eine zu berücksichtigende Voraussetzung ist u. a. die Anpassung der Transportnetzwerke, Struktur der Lieferkette und Zusammensetzung der Arbeitskräfte. Eine Verlagerung an den Ort des Bedarfs senkt ebenfalls (Sonder)Transportkosten und die CO<sub>2</sub>-Emissionen für lange Transportwege.

Im Sinne der **Diversität der Absatzbranchen** und **Zulieferer** kann die additive Fertigung nur begrenzt resilienzsteigernd Einfluss nehmen. Zwar ist die Agilität hoch, um neue Produkte für neue Absatzbranchen datenbasiert zu entwickeln und zu produzieren, jedoch wirkt der fehlende Reifegrad der Standards für ausgewählte Branchen (z. B. Kernenergie) hindernd. Auf die Zuliefererdiversität hat die additive Fertigung keinen Einfluss. Externe Anbieter von additiv verfahrenstechnisch hergestellten Erzeugnissen erhöhen höchstens die Anzahl der potenziellen Zulieferer (mehr hierzu im Kapitel Neue Geschäftsmodelle).

Die **kumulierte Liefertreue** kann zwar bei Störungen entlang der Lieferkette durch die additive Fertigung gewahrt werden, jedoch nur im Falle von Kleinstserien. Die Fertigungsflexibilität, Geschwindigkeit und Agilität gilt seit Jahren als zentrales Merkmal der additiven Fertigung, da die Produkte Schicht für Schicht direkt aus computergestützten Konstruktionsdateien mit wenig menschlichem Eingriff hergestellt werden [KUNO 20]. Traditionelle Fertigungsanlagen hingegen benötigen viel Zeit, um ihre Produktionslinien umzustellen. Sobald die Prozesse der

traditionellen Fertigungsverfahren hochgelaufen sind, kann die additive Fertigung nicht mit einer Massenfertigung in Bezug auf die Liefertreue in Kombination mit einer hohen Wirtschaftlichkeit konkurrieren.

Die digitale Prozesskette der additiven Fertigung ist durch fortlaufende Datenzugriffe, -modifikationen und -kontrollen sowie vollständige Dokumentation jedes digitalen Teils und seiner Produktion charakterisiert. Auf Grundlage digitaler Datensätze können Produkte mit komplexen Geometrien und bereits integrierten Funktionen hergestellt werden. Die **Lieferqualität** und **-flexibilität** können infolge der datenbasierten Entwicklung und Produktion von den additiven Fertigungsverfahren garantiert werden. Die Technologie erhöht bspw. die Leistung und Flexibilität der Instandhaltungsprozesse innerhalb eines Lieferanten. Durch die schnelle Produktion von Ersatzteilen werden Verzögerungen in der Lieferkette verringert und die schnelle Verfügbarkeit der benötigten Artikel gefördert. Die Resilienz hinsichtlich dieser beiden Kennzahlen wird somit vollends erfüllt.

Die Verfügbarkeit der computergestützten Designdateien schafft letztlich die Grundlage für die beiden Kenngrößen **unternehmensübergreifende Datenverarbeitung** und **Vernetzung**. Die Fähigkeit, Ersatzteile an entlegenen Gebieten zeitnah zu produzieren, die mit konventionellen Liefermethoden nicht bzw. schwer erreichbar sind, wird durch die Vernetzung und einen dezentralen Datenaustausch möglich. Mithilfe von Datenmarktplätzen können innerhalb des Netzwerks aus Lieferanten Designdateien erstellt und online geteilt werden [NAGH 20]. Datenbeziehende Unternehmen werden dadurch befähigt, benötigte Produkte zu mittels AM zu fertigen und ggf. das ursprüngliche Design zu verbessern, welches anschließend erneut geteilt werden kann (s. Kapitel 1 *Neue Geschäftsmodelle*). Die Nachfrage kann am Ort des Bedarfs mit minimaler Zeitverzögerung befriedigt und die Resilienz der Lieferkette gewahrt werden.

Die additive Fertigung gilt aufgrund ihrer digitalen Prozesskette als Treiber für Resilienz und digitale Wertschöpfung (s. Abbildung 23). Der Fokus infolge der Verfügbarkeit der Designdaten liegt auf den Potenzialen des antizipativen Resilienzmanagements. Dies schafft die Grundlage für Änderungen in bestehenden bzw. die Entwicklung von neuen, datengetriebenen Geschäftsmodellen für Anbieter dieser Fertigungstechnologie.

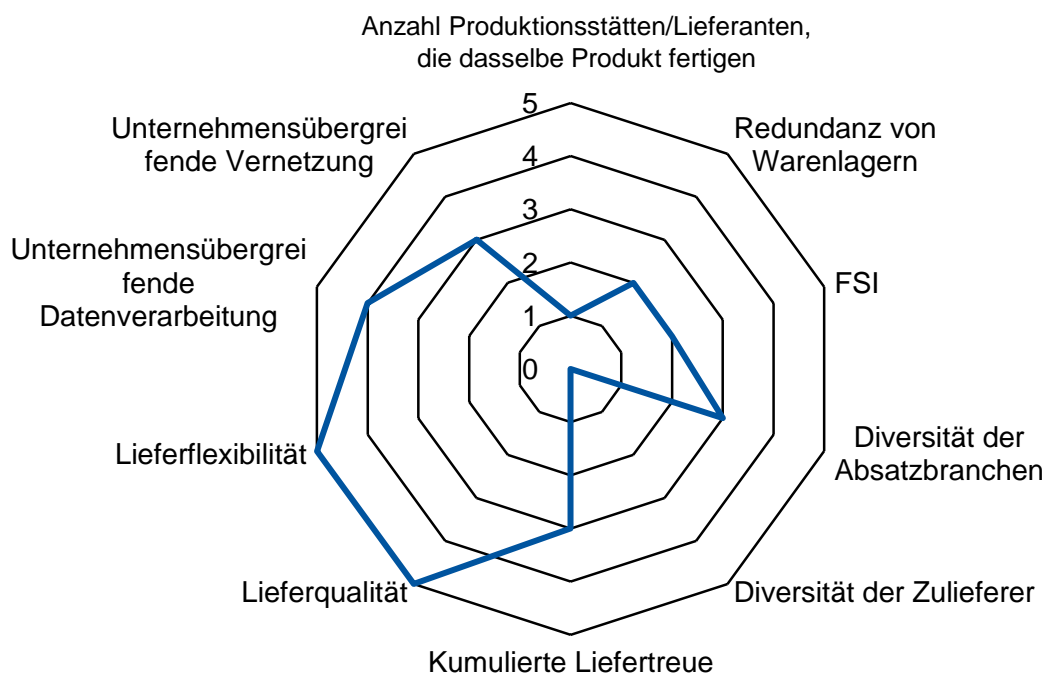


Abbildung 23: Die Auswirkungen eines Einsatzes additiver Fertigungsverfahren auf die Resilienz einer Lieferkette



# 7

---

**Neue Geschäftsmodelle  
„Turning Data into  
Sustainable Resilience“**





## Neue Geschäftsmodelle „Turning Data into Sustainable Resilience“

Anhand der vorangegangenen Analyse wird ersichtlich, dass die additive Fertigung die Resilienz positiv beeinflusst. Die Anwendungsbereiche sind aufgrund des breiten Spektrums an potenziell nutzbaren Maschinen, Prozessen, Software und Materialien groß. Dennoch ist es aufgrund der hohen Anschaffungskosten für viele Unternehmen nicht wirtschaftlich, eine Maschine dieses Technologiezweiges mitsamt den notwendigen Softwarepaketen für das Teiledesign und die Arbeitsvorbereitung zu erwerben. Zusätzlich wird die Investitionsentscheidung durch den Bedarf an detailliertem Wissen zur Ansteuerung und Bedienung der Maschinen erschwert. Für additiv fertigende Unternehmen und Maschinenhersteller bietet die Verfügbarkeit von hoch nachgefragtem Know-how und computergestützten Designdateien neue, datenbasierte Geschäftsmodelle, welche im Kontext der Resilienz hohen Anklang in diversen Lieferketten unterschiedlicher Branchen finden können und allen Unternehmen einer Lieferkette Zugang zu den Vorteilen der additiven Fertigung bieten.

Alternativ zu Print-on-Demand-Lösungen zur Verkürzung der Lieferzeiten können Anbieter von Lösungen der additiven Fertigung ihre Designdateien, Prozessdaten oder verfügbare Produktionskapazitäten mit Partnern inner- und außerhalb der Lieferkette auf einer Plattform teilen. Dieses neue Geschäftsmodell bietet das Potenzial einer Steigerung der Auslastung der verfügbaren Kapazitäten sowie einer fortlaufenden Anpassung bzw. Optimierung der Designdateien. Zusätzlich wird die Resilienz einer Lieferkette gewahrt ohne die Notwendigkeit einer physischen Lagerung oder computergestützten Simulation. Das Speichern der Produktdaten verkörpert eine Art der digitalen Lagerhaltung. Die Teile können aufgrund der verfügbaren, monetär erwerblichen Designdateien direkt gefertigt werden.

Produzierende und additiv fertigende Unternehmen können ihr bestehendes Geschäftsmodell zusätzlich revolutionieren und bei der Bereitstellung ihrer Maschinen und anderen Produkten unterschiedliche Angebots- und Abrechnungsvarianten abwägen [LANG 20]. Das zukünftige Geschäftsmodell bewegt sich weg von einem Angebot eines Equipments hin zu einem Service (s. Abbildung 24). In Anbetracht des zu erwartenden Nutzens für den Endverbraucher erscheint die Beschaffungsentscheidung zum Kauf bei der Option Pay-per-part als beste Option.

Die Leasing-Optionen können mit zusätzlichen Dienstleistungen/Services kombiniert werden, um den wahrgenommenen Kundenwert zu steigern [LANG 20]. Beispiele für zusätzliche Dienstleistungen sind das Material (Handling), die Konstruktion und das Design, die Software für Fertigungsausführungssysteme einschließlich Auftragsanalyse/-verfolgung, die Unterstützung bei der Teilequalifizierung/-zertifizierung sowie Lösungen zur Auftragsabwicklung.

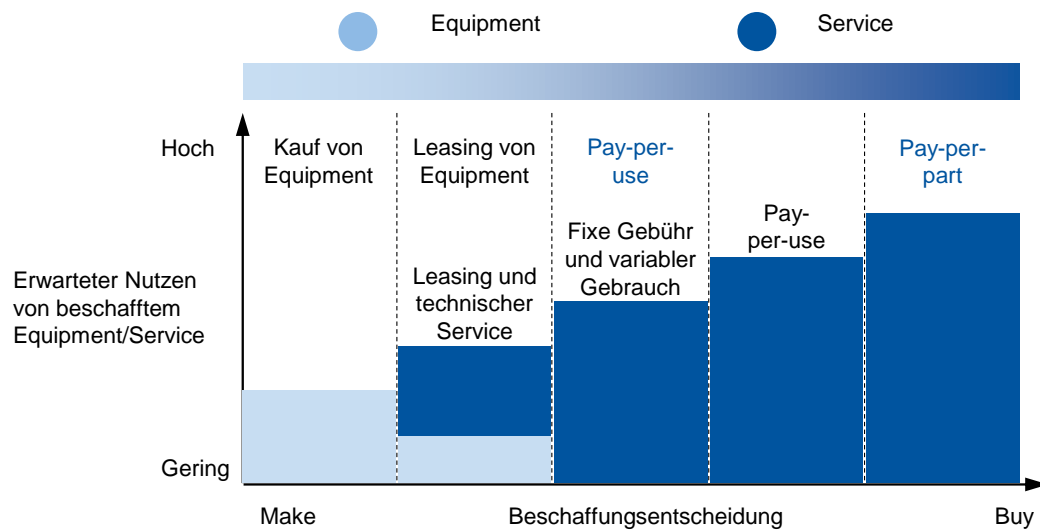


Abbildung 24: Der erwartete Nutzen und die Beschaffungsentscheidung unterschiedlicher Geschäftsmodelle [LANG 20]

In Abhängigkeit der gewählten Geschäftsmodellvariante werden die Gesamtkosten auf verschiedene Positionen zugeteilt (s. Abbildung 25). Diese Umverteilung der Kosten wirkt sich auch auf die Risikosituation in einem Unternehmen aus. Der direkte Kauf einer Maschine geht mit hohen Fixkosten einher. Risiken wie Auftragsschwankungen entlang der Lieferkette beeinflussen die Amortisationszeit eines Maschineninvests. Die einfache Beauftragung und Bezahlung je additiv gefertigten Teils reduziert das wirtschaftliche Risiko eines Unternehmens.

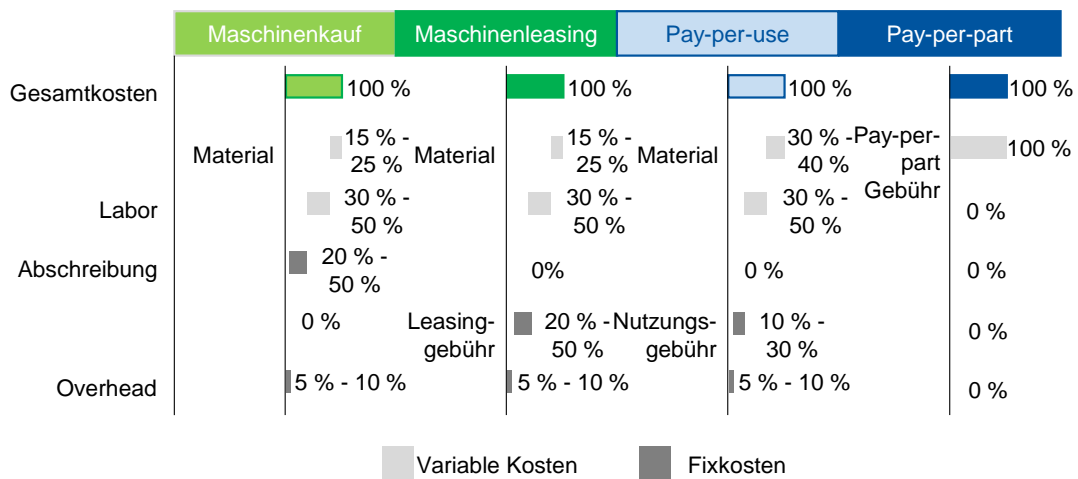


Abbildung 25: Verteilung der Kostenpositionen in Abhängigkeit des gewählten Geschäftsmodells [LANG 20]

Die Abkehr von einem Maschinenkauf flacht die Investitionskurve im Technology-Readiness-Level (TRL) Stage-Gate-Prozess während der Produktentwicklung deutlich ab (s. Abbildung 26). Die Lieferkette kann durch diese Entwicklung zukünftig resilient agieren und benötigt weniger finanzielle Ressourcen.



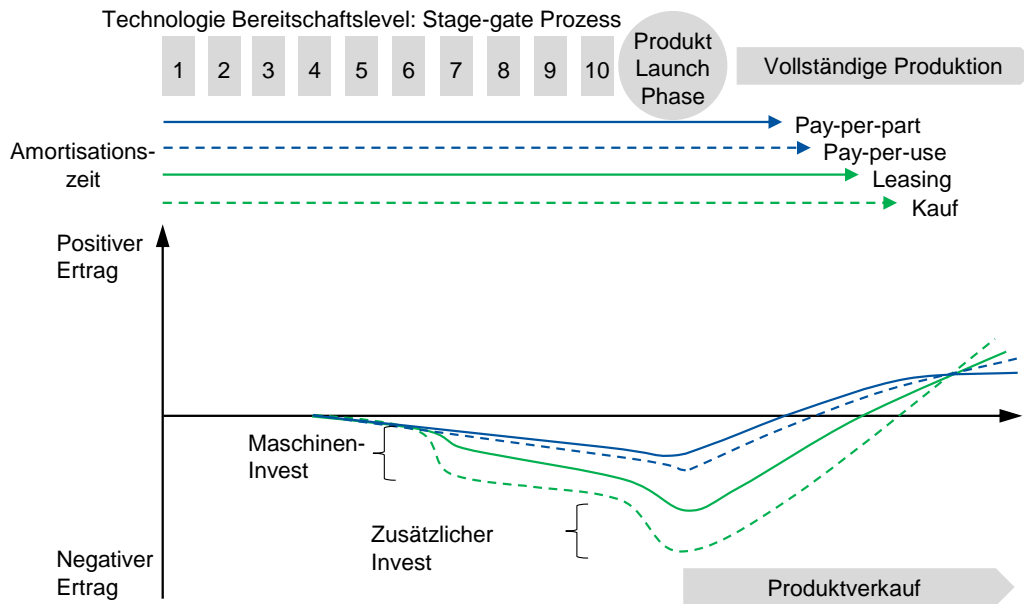


Abbildung 26: Die Ausprägung der Investitionskurve in Abhängigkeit des gewählten Geschäftsmodells [LANG 20]

Das Innovieren des Geschäftsmodells im Kontext der additiven Fertigung nimmt in der Praxis bereits immer mehr zu. Abbildung 27 zeigt diverse Geschäftsmodelle in verschiedenen Wertschöpfungsbereichen. Es ist offensichtlich, dass für große Produktionsmengen das Leasing von Equipment vorzuziehen ist. Kleine Aufträge zur Kompensation von geringen Störungen entlang der Lieferkette hingegen wurden eher durch Pay-per-use-Konzepte aufgefangen.

	Make-to-order	Verkürzen von Durchlaufzeit	Vermeidung von Lagerung	Mass Customization	Scan-to-print	Dezentrale Produktion
Beschreibung	Zahnärztliches Labor	Öl- und Gasunternehmen	Bushersteller	Automobil OEM	Medizintechnische Unternehmen	Orthopädische Unternehmen
AM Technologie	Laser powder bed fusion	Laser powder bed fusion	Selective laser sintering	Selective laser sintering	Laser powder bed fusion	Selective laser sintering
Produktionsmenge						
Passendes Geschäftsmodell	Leasing von Equipment	Kaufen von Equipment	Pay-per-use	Pay-per-use	Kaufen von Equipment	Leasing von Equipment

M Metall     P Polymer

Abbildung 27: Geschäftsmodelle in der Praxis [LANG 20]



8

Zusammenfassung

## Zusammenfassung

Die additive Fertigung bietet als Fertigungstechnologie mit großen Individualisierungs- und Designmöglichkeiten sowie ihrer digitalen „DNA“ ein geeignetes Werkzeug für ein reaktives und antizipatives Resilienzmanagement innerhalb der Lieferkette. Die vorliegende Studie zeigt, dass die dafür notwendigen Anforderungen und die ausgewählten Kennzahlen von dieser Technologie positiv beeinflusst werden. Infolge des geringen Umsetzungsgrads zur Steigerung der Resilienz ist der Einfluss momentan nur bedingt sichtbar.

Schon während der COVID-19-Pandemie lies die additive Fertigung das Potenzial eines resilienzsteigernden Instruments vermuten [KUNO 20]. Einerseits konnten mithilfe der additiven Fertigung die Nachfrage-Lieferlücke nach Teststufen zur Entnahme von Virusproben geschlossen werden. Andererseits wurden Designdateien für den Gebrauch Dritter erstellt und online geteilt, um die Nachfrage am Ort des Bedarfs mit geringer Zeitverzögerung zu befriedigen. Einziges Problem waren die ungeklärten Fragen nach dem Eigentum und den Nutzungsrechten.

Der rechtliche Kontext ist für den Handel und das Nutzen von (Design-)Daten von besonderer Bedeutung. Trotz einer internationalen Etablierung bis 2030 wird der Datenhandel insbesondere in Europa nicht auf einheitlicher Grundlage ausgeführt werden. Bei der Gesetzgebung zur ePrivacy-Verordnung Anfang der 2020er zeigte sich, dass viele Staaten hinsichtlich des Umgangs mit Daten kontroverse Ansichten vertreten, um ein geschlossenes politisches Handeln zu ermöglichen. Ein Datenhandel in einem IoT-Datenraum für datengestützte Wertschöpfung unterliegt daher unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten in Bezug auf das gehandelte Rechtsgut und den zeitlichen Horizont der Nutzung. Additiv fertigende Unternehmen könnten bspw. entweder das a) inhaltlich definierte Nutzungsrecht für Daten, b) den Datensatz selbst oder c) eine Kopie der Daten für eine i) dauerhafte Nutzung, ii) einen dauerhaften Besitz oder iii) eine zeitlich beschränkte Nutzung erwerben. Je nach Gestaltung des Datenhandels variieren die zu betrachtenden Rechtsgrundlagen und beeinflussen die Rechtsbeziehungen der Unternehmen.

Zur allgemeinen Etablierung eines Datenaustauschnetzwerks soll abschließend für diese Studie neben den rechtlichen Gesichtspunkten auf die wesentlichen technischen Kernaspekte bzgl. der Handelsplattform verwiesen werden, welche unabdingbar sind, um der aktuellen Skepsis von Unternehmen im Bereich Datenhandel zu begegnen. Die Datensouveränität, -integrität und -sicherheit muss für die Netzwerkteilnehmer gewährleistet sein, sodass die Daten transparent erhoben und vertrauenswürdig gespeichert werden. Die Datenhoheit muss stets beim Eigentümer liegen und die Eigentumsrechte dürfen nicht an zentrale Entitäten oder Dritte übertragen werden (Data-Governance). Eine Plattform, die diese Eigenschaften erfüllt, verhilft zur Resilienzsteigerung innerhalb der Lieferkette und unternehmensindividuell zu neuen Geschäftsmodellen.

## Literaturverzeichnis

- [ACAM 19] Horstkotte, R.; Jakumeit, J.: Software Tools for AM: Classification of the software systems in the process chain. Studie des Aachen Center for Additive Manufacturing des RWTH Aachen Campus, 2019
- [ADOB 07] Adobor, H.; McMullen, R. Supplier diversity and supply chain management: A strategic approach. In: Business Horizons. 50. Jg., 2007, 3, S. 219–229
- [BERG 13] Berger, U.; Hartmann, A.; Schmid, D.: Additive Fertigungsverfahren: Rapid Prototyping, Rapid Tooling, Rapid Manufacturing. Europa-Lehrmittel, Gruitzen, 2013
- [BERG 13a] Roland Berger; VDW; Wohlers Ass. Additive Manufacturing 2013. Prognose zum Marktvolumen von „Additive Manufacturing“ weltweit bis zum Jahr 2023, 2013. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/445066/umfrage/prognose-zum-umsatz-mit-additiver-fertigung-weltweit/>. [Stand: 13.09.2021]
- [BERG 14] Roland Berger; VDMA. Marktchancen und Potenziale des Additive Manufacturing 2014. Prognose zur Kostenentwicklung in der additiven Metallfertigung weltweit bis zum Jahr 2023, 2014. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/445058/umfrage/prognose-zur-kostenentwicklung-additiver-fertigung-weltweit/>. [Stand: 13.09.2021]
- [BME 20] Bundesverband Materialwirtschaft, Einkauf und Logistik e.V. (BME). Mehr Störungen in der Lieferkette: Schwachstelle Risikoprävention, 2020. URL: <https://www.bme.de/mehr-stoerungen-in-der-lieferkette-schwachstelle-risikopraevention-3688/>. [Stand: 14.09.2021]
- [BUTZ 14] Butz, M.; Schmidt, A.; Tillmann, G. Butz, M.; Schmidt, A.; Tillmann, G.: Umbruch in der Automobilzulieferindustrie – Standortoptimierung und Sourcing, 2014. URL: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/finance/CF-Umbruch-in-der-Automobilzuliefererindustrie-2014.pdf>. [Stand: 14.09.2021]
- [DALI 17] Dalia Research. Umfrage zu wahrgenommenen Eigenschaften von Produkten aus Deutschland, 2017. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/676724/umfrage/umfrage-zu-wahrgenommenen-eigenschaften-von-produkten-aus-deutschland>. [Stand: 13.09.2021]
- [DASS 20] Dassault Systèmes; eft. Welche Bereiche der Last Mile-Lieferung werden Ihrer Ansicht nach in den nächsten drei Jahren am wichtigsten sein? Supply Chain Last Mile Report 2020, 2020. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1125764/umfrage/entwicklung-der-last-mile-lieferung-in-den-naechsten-drei-jahren/>. [Stand: 13.09.2021]
- [DIN 18] DIN ISO 31000 (2018-10). Risikomanagement - Leitlinien
- [EURO 18] Europäische Kommission - CORDIS. Horizon 2020 - Crisis management topic 7: Crises and disaster resilience – operationalizing resilience concepts. Project DARWIN Expecting the unexpected and know how to respond, 2018. URL: <https://cordis.europa.eu/project/id/653289>. [Stand: 14.09.2021]

- [EY 16] EY; Bitkom Research. Umfrage zu den wichtigsten Technologietrends in Industrieunternehmen in Deutschland im Jahr 2015, 2016. URL: <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/516909/umfrage/wichtigste-technologietrends-in-industrieunternehmen-in-deutschland>. [Stand: 13.09.2021]
- [FEDK 17] Fedkenhauer, T.; Fritzsche-Sterr, Y.; Nagel, L.; Pauer, A.; Resetko, A. Datenaustausch als wesentlicher Bestandteil der Digitalisierung, 2017. Hrsg. PricewaterhouseCoopers GmbH. URL: <https://www.pwc.de/de/newsletter/it-security/studie-datenaustausch-digitalisierung.pdf#%5B%7B%22num%22%3A38%2C%22gen%22%3A0%7D%2C%7B%22name%22%3A%22Fit%22%7D%5D>. [Stand: 13.09.2021]
- [FISC 21] Fischer; R. Logistikkennzahlen: Effizienz in Beschaffung und Lager. Liefertreue - Wichtigste Kennzahl der Distributionslogistik, 2021. URL: [https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/logistikkennzahlen-effizienz-in-beschaffung-lager-und-344-liefertreue\\_idesk\\_PI20354\\_HI7397816.html](https://www.haufe.de/finance/haufe-finance-office-premium/logistikkennzahlen-effizienz-in-beschaffung-lager-und-344-liefertreue_idesk_PI20354_HI7397816.html). [Stand: 13.09.2021]
- [FUND 21] Fund for Peace. Fragile States Index 2021 – Annual Report, 2021. URL: <https://fragilestatesindex.org/2021/05/20/fragile-states-index-2021-annual-report/>. [Stand: 13.09.2021]
- [GIBS 21] Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. Introduction and Basic Principles. In: Gibson, I.; Rosen, D.; Stucker, B.; Khorasani, M. (Hrsg.): Additive Manufacturing Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 1–21
- [HAME 03] Hamel, G.; Välikangas, L. The Quest for Resilience, 2003. URL: <https://hbr.org/2003/09/the-quest-for-resilience>. [Stand: 14.09.2021]
- [IPLY 19] IPlytics GmbH. Anzahl der Patente im Bereich 3D-Druck weltweit in den Jahren von 2007 bis 2019 (Erhebung), 2019. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/989479/umfrage/anzahl-der-3d-druck-patente-weltweit/>. [Stand: 13.09.2021]
- [IVAN 10] Ivanov, D.; Sokolov, B. Adaptive Supply Chain Management. London: Springer London, 2010
- [KUNO 20] Kunovjanek, M.; Wankmüller, C. An analysis of the global additive manufacturing response to the COVID-19 pandemic. In: Journal of Manufacturing Technology Management. 32. Jg., 2020, 9, S. 75–100
- [LANG 20] Langefeld, B.; Femmer, T.; Schaukellis, M.; Weitlaner, T.; Scholz, D.; Lissan, F. Additive Manufacturing. A new AM customer journey. New business models and comprehensive product innovation, 2020.
- [LUND 20] Lund, S.; Manyika, J.; Woetzel, J. B. E.; Krishnan, M.; Aliche, K.; Birshan, M.; George, K.; Smit, S.; Swan, D.; Hutzler, K. Risk, resilience, and rebalancing in global value chains, 2020. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/risk-resilience-and-rebalancing-in-global-value-chains>. [Stand: 14.09.2021]
- [NAGH 20] Naghshineh, B.; Carvalho, H. The Impact of Additive Manufacturing on Supply Chain Resilience. In: Camarinha-Matos, L. M.; Farhadi, N.; Lopes, F.; Pereira, H. (Hrsg.): Technological Innovation for Life Improvement. (Reihe: IFIP



- Advances in Information and Communication Technology). Cham: Springer International Publishing, 2020, S. 214–221
- [PLAC 07] Placzek, T. S. Optimal Shelf Availability. Analyse und Gestaltung integrativer Logistikkonzepte in Konsumgüter-Supply Chains. (Reihe: Supply Chain Management). 1. Aufl.: DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 2007
- [PRTM 11] PricewaterhouseCoopers (pwc) - PRTM. Ansatzpunkte zur Erhöhung der Flexibilität von Supply Chains im Jahr 2011, 2011. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/192685/umfrage/massnahmen-zur-erhoehung-der-flexibilitaet-von-supply-chains/>. [Stand: 13.09.2021]
- [PRÜM 20] Prümmer, M. Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem der Leistungsfähigkeit verketteter Fertigungssysteme in der mechanischen Fertigung des Werkzeugbaus. Dissertation RWTH Aachen University Aachen, 2020
- [SARA 20] Saratech GmbH. COVID-19 Impact on Supply Chains: Global Additive Manufacturing Industry Report, 2020. URL: [https://saratech.com/wp-content/uploads/2020/12/MF\\_Supply\\_Chain\\_Global\\_AM\\_Industry\\_Report\\_SARATECH.pdf](https://saratech.com/wp-content/uploads/2020/12/MF_Supply_Chain_Global_AM_Industry_Report_SARATECH.pdf). [Stand: 14.09.2021]
- [SCUL 21] Sculpteo. The State of 3D Printing - 2021 Edition. The data you need to understand the 3D printing world and build your 3D printing strategy. S. 9, 2021. URL: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/102475/dokument/studie-ueber-den-3d-druck-markt-2021/>. [Stand: 13.09.2021]
- [STAT 21] Statistisches Bundesamt; VDMA; Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft; ifo Institut. Exportquote im Maschinenbau in Deutschland in den Jahren 2010 bis 2020, 2021. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/235617/umfrage/exportquote-im-maschinenbau-in-deutschland/>. [Stand: 14.09.2021]
- [THUN 20] Thun-Hohenstein, L.; Lampert, K.; Altendorfer-Kling, U. Resilienz – Geschichte, Modelle und Anwendung. In: Zeitschrift für Psychodrama und Soziometrie. 19. Jg., 2020, 1, S. 7–20
- [TRAU 19] Trauth, D.; Bergs, T.; Feuerhack, A.; Gülpen, C.; Janzen, S.; Maass, W.; Mattfeld, P.; Niemietz, P.; Piller, F. #SPACER — The Vision: AI-based Resilience Management in Production Engineering, 2019. URL: <https://medium.com/spaicer-resilient-manufacturing/spaicer-ai-based-resilience-management-in-production-engineering-1d0c39588a2f>. [Stand: 13.09.2021]
- [ULRI 21] Ulrich, K. IW: Corona-Verlust in Höhe von 250 Milliarden Euro, 2021. URL: <https://www.dw.com/de/iw-corona-verlust-in-h%C3%B6he-von-250-milliarden-euro/a-56878447>. [Stand: 13.09.2021]
- [VDIW 21] VDI-Wissensforum. Resilienz und Handlungsfähigkeit in technischen Projekten. Seminar, 2021. URL: <https://www.vdi-wissensforum.de/management-fuer-ingenieure/resilienz-in-technischen-projekten/>. [Stand: 14.09.2021]
- [WICH 12] Wicher, P.; Lenort, R. The ways of creating resilient supply chains. In: Carpathian Logistics Congress, 2012, S. 688–694
- [WLW 21] Wer Liefert Was (wlw). Liefertreue: Herausforderungen und Lösungen im B2B, 2021. URL: <https://www.wlw.de/de/inside->

business/praxiswissen/lieferantenmanagement/liefertreue-herausforderungen-und-loesungen-im-b2b. [Stand: 13.09.2021]

- [YAUC 17] Yauch, G.; Goshorn, B.; Brown, J. Trend Report: Supply chain resilience, 2017. URL:  
<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/risk/us-risk-trend-report-supply-chain-resilience.pdf>. [Stand: 14.09.2021]