



Fraunhofer
PRODUKTION



White Paper »RESYST«

Resiliente Wertschöpfung in der
produzierenden Industrie –
innovativ, erfolgreich, krisenfest

Vorwort

Ziel des White Papers zum Thema Resiliente Wertschöpfung ist es, die Ergebnisse aus dem Fraunhofer-Innovationsprogramm Resiliente Wertschöpfungssysteme (»RESYST«) einer breiten Öffentlichkeit aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik zugänglich zu machen. Im Lichte aktueller Erfahrungen aus der Corona-Pandemie, aber auch der Hochwasserkatastrophe greift das Innovationsprogramm die Anforderungen des Wirtschaftsstandorts Deutschland an resiliente und dynamische Wertschöpfungssysteme bei gleichbleibend hoher Produktivität und Individualisierung auf. Resilienz gegenüber Krisen und Störfällen aller Art entwickelt sich somit zum entscheidenden Wettbewerbsfaktor.

Bereits im März 2021 hatten Fraunhofer-Forschende die Studie »Resilienz – Ein Fraunhofer-Konzept für die Anwendung« vorgelegt. Die Studie über die Resilienz von Organisationen, Infrastrukturen und anderen komplexen Systemen lenkt den Blick zunächst auf die tiefe systemische Betrachtung von Unternehmen und Institutionen. Darauf basierend zeigt sie Strategien auf, wie Unternehmen ihre Resilienz ganz praktisch verbessern und sich auf Krisen optimal vorbereiten können.

Das vorliegende White Paper schließt hier an und untersucht den Aspekt der »Resilienten Wertschöpfung« in Bezug auf Strategie- und Prozessmanagementsysteme, Produktionssysteme sowie Produktionstechnologien bei Unternehmen des produzierenden Gewerbes. Dabei bezieht es ausdrücklich auch die Mitarbeitenden und ihre Kompetenzen mit ein.

Fast alle produzierenden Unternehmen müssen vor dem Hintergrund des immensen volkswirtschaftlichen Schadens der Pandemie ihre Risikomanagementstrategien überdenken und anpassen. Traditionelle Geschäftsmodelle sind den Anforderungen an Krisen oftmals nicht gewachsen. Dabei geht es vor allem um resilientes Verhalten im Bereich des Risikomanagements und die Vermeidung von unkontrollierbaren Produktionsstillständen sowie übermäßigen Mehraufwänden in der Arbeitsorganisation.

Die Analyse der komplexen Wertschöpfungssysteme in der produzierenden Industrie bildet in Kombination mit dem aktualisierten Ansatz des Resilienzkonzepts ein mächtiges Instrument, um auch in Krisenzeiten Risiken zu minimieren, Verluste zu begrenzen und gleichzeitig innovativ und leistungsfähig zu bleiben.

So löst sich auch das Dilemma zwischen Effizienz im Alltagsgeschäft und der Vorbereitung auf Störereignisse und Krisen auf.

Im Innovationsprogramm »RESYST« arbeitet ein interdisziplinäres Konsortium aus 17 Fraunhofer-Instituten und -Einrichtungen an ganz unterschiedlichen Forschungsthemen, wobei der Resilienz-Aspekt sich wie ein roter Faden durch alle Themen zieht.

Zum White Paper gehören sowohl das vorliegende Dokument als auch die Website. Dort sind weitere Beispiele für Sprunginnovationen sowie Prototypen und Demonstratoren hinterlegt.

www.produktion.fraunhofer.de/de/forschung-im-verbund/zukunftsthemen/RESYST.html



Inhalt

Vorwort	2
1 Resilienzmanagement	4
1.1 Externe Störfälle als Krisenauslöser	5
1.2 Auswirkungen	5
1.3 Resilienzphasen	5
2 Aktuelle Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft	6
2.1 Extreme Nachfrageschwankungen	7
2.2 Ungeahnte kritische Prozesse und Infrastrukturen	7
2.3 Gleichzeitigkeit hochdynamischer Ereignisse	8
2.4 Extremer Innovationsdruck	8
2.5 Liquidität	8
2.6 Lieferengpässe	8
2.7 Gesamtwirtschaftliche Effekte	9
2.8 Was wird gefordert	9
3 Rahmenmodell für Resiliente Wertschöpfung	14
3.1 Was – Eigenschaften resilienter Wertschöpfungssysteme	14
3.2 Wie – Optimierungsziele	15
3.3 Wo – Interventionsebenen	16
3.4 Womit – Lösungsbausteine	16
4 Die RESYST-Lösungsbausteine	18
5 Case Studies: Was man heute schon von den Besten lernen kann	28
6 Forschungsbedarf	32
7 Handlungsempfehlungen	36
8 Zusammenfassung	40
Impressum	42



Ein hohes Maß an Innovationskraft ist entscheidend für ein resilientes Wertschöpfungssystem, das unsere technologische Souveränität und unsere Position im internationalen Wettbewerb nachhaltig sichern und ausbauen kann.«

Prof. Dr.-Ing. Reimund Neugebauer
Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft

1 Resilienzmanagement

Dramatische Ereignisse finden seit Jahrhunderten immer wieder statt, aufgrund der weltweiten Vernetzung werden die Auswirkungen jedoch komplexer.

Ausgeprägte und oft auch abrupte Veränderungen gehören für viele Unternehmen, die sich in einem turbulenten Umfeld bewegen, zur Normalität. Extrem kurzfristig auftretende, aber tiefgreifende Veränderungen wie die Corona-Pandemie (ab 2019), die Handelskrise (2018) oder die globale Finanzkrise (2008), aber auch Veränderungen, die sich z. B. aus dem Klimawandel ergeben, stellen eine neue Dimension der Belastung dar. Hierzu kann die Hochwasserkatastrophe im Juli 2021 als Beispiel herangezogen werden. Einige Unternehmen suchen bereits nach Möglichkeiten, ihre Resilienz zu steigern, um schnell auf unvorhergesehene externe Einflüsse reagieren können, und stark genug zu sein, um mit plötzlichen Veränderungen umgehen zu können.

Was ist eigentlich unter Resilienz zu verstehen? »Unternehmerische Resilienz ist die Eigenschaft eines Unternehmens, externen Schocks oder Verwerfungen der sozialen, wirtschaftlichen oder politischen Rahmenbedingungen standzuhalten und sich an neue Bedingungen anzupassen.«¹ Unternehmen

müssen dafür die Fähigkeit besitzen, trotz Einwirkungen von außen ihre Stabilität zu erhalten, zum Ausgangszustand zurückzukehren oder einen neuen Gleichgewichtszustand einzunehmen. Auf diese Weise widerstehen sie externen Einflüssen und können langfristig auf dem Markt bestehen. Im Gegensatz zur Robustheit, bei der Unternehmen den Veränderungen begegnen, ohne ihre Struktur anzupassen, zielt Resilienz darauf ab, die Anpassungen zur Aufrechterhaltung der Handlungsfähigkeit schnell vorzunehmen und, wenn nötig, Strukturen und Prozesse grundlegend umzugestalten. Der Erhalt der Funktionalität ist dabei nur das Minimalziel. Das Idealziel einer erfolgreichen Umgestaltung ist die Fähigkeit, agiler und letztlich innovativer zu agieren als vor dem Eintritt der Krise.

Die Resilienzfähigkeit eines Unternehmens ist an dem maximalen Grad einer Störung zu messen, den es aushält, ohne den Geschäftsbetrieb zu gefährden. Dabei umfasst das Resilienzmanagement alle Aufgaben, die zur Steuerung der erforderlichen Anpassungen im Unternehmen oder der Wertschöpfungsnetze notwendig sind. Dies beinhaltet sowohl die Früherkennung, Planung, Umsetzung und Kontrolle entsprechender Maßnahmen als auch die Zeit zur Erholung nach internen und externen Störfällen. Die ökonomischen Ziele gilt es dabei weiterhin im

Auge zu behalten. Darüber hinaus spielen die Fähigkeit zur Fehlererkennung und das Lernen aus Fehlern eine wichtige Rolle, um mögliche Gefahren und deren Auswirkungen frühzeitig zu erkennen. Resilienz im unternehmerischen Kontext ist eine Kombination der Eigenschaften Antizipation, Agilität, Flexibilität, Adaptivität, Robustheit sowie Regenerations- und Lernfähigkeit (siehe Kapitel 3: Rahmenmodell für Resiliente Wertschöpfung).

1.1 Externe Störfälle als Krisenauslöser

Externe Störungen, die Resilienz verlangen, können vielfältig sein. Im Einzelfall genügt schon ein spontanes Ereignis wie ein festsitzendes Containerschiff im Sueskanal, um internationale Lieferketten zu unterbrechen und auch deutsche Unternehmen in Bedrängnis zu bringen. Zumeist basieren solche Störungen auf kurz- oder mittelfristigen Entwicklungen. Um solche Entwicklungen zu antizipieren, genügt es nicht, nur den nationalen Raum zu beobachten. Eine Vielzahl der Krisen, die das Wirtschaftssystem und Unternehmen in Deutschland in jüngster Zeit herausgefordert haben, hatten ihren Ursprung nicht unmittelbar in Deutschland bzw. Europa. Die Auswirkungen jedoch sind tiefgreifend und es ist davon auszugehen, dass in den nächsten zehn Jahren auch in Deutschland aufgrund externer Störungen weitere Krisen entstehen. Die Ursachen hierfür sind vielfältig: Entwicklungen im globalen Finanzsystem, mögliche Handelskonflikte, Energie- oder Versorgungsengpässe, Klimaveränderungen, soziale Ungleichheiten und demographische Entwicklungen oder auch die drohende Überbevölkerung. Durch die Digitalisierung und globale Vernetzung steigen die Komplexität und die Abhängigkeit der Subsysteme untereinander. Hier drohen gefährliche Kaskadeneffekte. Aber auch eine Vielzahl weniger einschneidender Entwicklungen erfordern unternehmerische Resilienz und müssen aufmerksam verfolgt und analysiert werden.

1.2 Auswirkungen

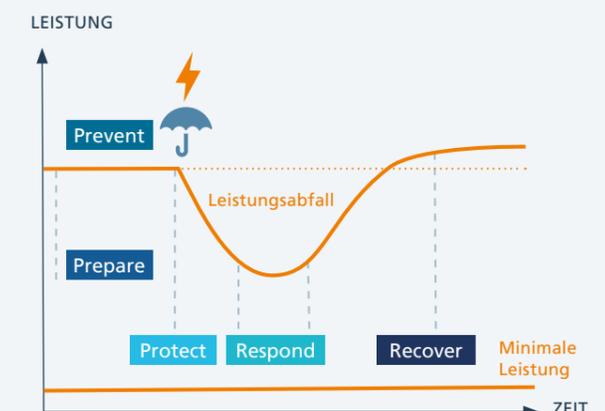
Die Auswirkungen externer Störfälle betreffen zumeist nicht nur einzelne Unternehmen oder Branchen, sondern ganze Wertschöpfungsketten. Temporäre Störungen können dabei nachhaltige Veränderungen in Wirtschafts- und Gesellschaftssystemen auslösen. Lieferschwierigkeiten, Liquiditätsengpässe oder Zahlungsunfähigkeit bis hin zum Konkurs von Unternehmen können die Folge sein. Das Ziel muss sein, Störungen nicht nur zu überstehen, sondern gestärkt aus ihnen hervorzugehen. Dies gilt es durch flexible, leistungsfähige und robuste Wertschöpfungsnetzwerke sowie durch Veränderungsfähigkeit sicherzustellen. Resilienz wird zunehmend zum strategischen Wettbewerbsfaktor – und damit auch zur strategischen Aufgabe für die Unternehmensführung.

1.3 Resilienzphasen

Im Resilience Engineering, der Berücksichtigung alternativer Konzepte zur Absicherung technischer Systeme, werden Maßnahmen und Methoden entwickelt, um vor, während und nach einer Krise die besten Entscheidungen zu fällen. Ein Schadensereignis wird dabei in fünf Phasen eingeteilt. Zuerst gilt es, sich bestmöglich vorzubereiten (**Prepare**) und vorbeugende Maßnahmen (**Prevent**) zu treffen. Tritt die Katastrophe ein, geht es darum, sich zu schützen (**Protect**), Konsequenzen abzumildern und kritische Versorgungsfunktionen aufrechtzuerhalten (**Respond**). Nach der Krise müssen alle Geschäftsprozesse wieder stabilisiert (**Recover**) und durch systematisches Lernen Lehren aus der Krise gezogen werden.

Wird die Leistung eines Unternehmens über einen Zeitverlauf betrachtet, wird deutlich, wie gut es auf externe Störungen oder Krisen reagiert und in welcher Phase noch Verbesserungsbedarf besteht.

Die fünf Phasen der Resilienz



¹ Definition in Gabler Wirtschaftslexikon online, siehe: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/resilienz-52429/version-275567> (zuletzt abgerufen am 13.10.2021).



**Wer gegen Krisen gut gewappnet sein will,
muss flexibel und kooperativ sein.«**

Prof. Dr. Julia C. Arlinghaus
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF



2 Aktuelle Herausforderungen für die deutsche Wirtschaft

»Wir hatten im März und April 2020 40–50 Prozent weniger und im Juni 2020 10 Prozent mehr Auftragseingang als 2019. Diese extremen Schwankungen weisen sowohl auf das Risiko als auch auf die Chancen von Krisen wie SARS-CoV-2 hin.«

Dr. Christian Neuner
Flex GmbH

Die deutsche Wirtschaft musste auch in der jüngeren Vergangenheit zahlreiche Krisen bewältigen. Diese reichen von den großen Einschnitten wie dem Dotcom-Sterben 2001/02 oder der Finanzkrise 2009 bis zu Herausforderungen, die einzelne Industriezweige treffen, wie beispielsweise die Luftfahrt mit dem Vulkanausbruch des Eyjafjallajökull 2010 oder die Energieversorger mit den Nuklearkatastrophen von Tschernobyl 1986 und Fukushima 2011. Die Novellierung der DIN ISO 9001:2015 trug diesen Herausforderungen Rechnung, indem sie das Risikomanagement zu einem Bestandteil des integrierten Qualitätsmanagementsystems von Unternehmen machte.

Sicherlich haben solche Systeme dazu beigetragen, dass Unternehmen auch die Corona-Pandemie bisher recht gut gemeistert haben. So wies beispielsweise das Risikomanagementsystem des weltweit agierenden pfälzischen Pumpenbauers KSB Vorkehrungen auf, die das Unternehmen in weitgehend ruhigem Fahrwasser ließen. Dennoch bringt die Pandemie weitere extreme Herausforderungen für Unternehmen und ganze Wertschöpfungsketten mit sich.

2.1 Extreme Nachfrageschwankungen

Dr. Christian Neuner, Geschäftsführer des schwäbischen Profigeräteherstellers Flex GmbH, demonstrierte die extrem hohe Schwankungsbreite bei der Nachfrage mit Zahlen: »Wir hatten im Vergleich zu 2019 im März und April 40–50 Prozent weniger Nachfrage, verzeichneten im Juni 2019 jedoch ein Plus von 10 Prozent Auftragseingang.« Einerseits funktioniert die Vorproduktion in dem individualisierten Geschäft nur sehr eingeschränkt. Andererseits würden hohe Bestände die Kosten treiben, die in dem hoch preissensitiven Markt Wettbewerbsvorteile schmelzen lassen. Der vergleichsweise starke Anstieg im Juni zeigt Nachholeffekte auf, die typischerweise um Krisen herum auftreten. Hier sind Unternehmen mit einer hohen Mengenflexibilität im Vorteil. Wichtig dabei ist die gleichzeitige Adaptivität bei den Kosten.

Einer der weltweit größten Automobilzulieferer gibt bereits heute in seinem global gültigen ganzheitlichen Produktionssystem den Werken folgende Kriterien für die Kostenflexibilität vor: Für ein optimal ausgerichtetes Werk müssen die operativen Kosten in dem Maße zurückgehen, wie der Umsatz sinkt, während bei einer Umsatzsteigerung die Kosten nur zur Hälfte im Vergleich zum Umsatz steigen dürfen. Wie schwierig das in

der Umsetzung ist, zeigt das Beispiel Volkswagen, wo die Produktion kurz nach ihrem Wiederanlaufen im April 2020 im Mai aufgrund der zu geringen Nachfrage wieder heruntergefahren werden musste.¹ Wieder andere Unternehmen, die viel stärker prozessorientiert sind, kämpfen mit den großen Marktschwankungen und den damit verbundenen Effizienzproblemen.

2.2 Ungeahnte kritische Prozesse und Infrastrukturen

Übergreifende Krisen wie die gegenwärtige zeigen auch, dass die Absicherung sogenannter kritischer Prozesse allein nicht mehr ausreicht. So rückte während der Pandemie beispielsweise die soziale Situation der Mitarbeiter in den Fokus. Durch die verschiedenen Schließungen von Schulen und Kindertagesstätten wurden plötzlich die jeweiligen häuslichen Gegebenheiten relevant für die Leistungsfähigkeit der Belegschaften. Ähnliches gilt für Prozesse zur Klärung der Zahlungsfähigkeit von Kunden. Noch viel schwerwiegender waren Prozesse, die in der direkten Wertschöpfungskette vom Rohmaterial bis zum Kundennutzen eingebunden sind. So waren Hersteller von Geräten für den Anlagenbau bei der Schließung von Verkaufs- und Servicestellen von heute auf morgen von ihren Kunden abgeschnitten.

¹ Gregor Hebermehl: »VW drosselt Produktion schon wieder«, in: auto motor sport, 13. Mai 2020. Online unter: www.auto-motor-und-sport.de/suv/vw-drosselt-produktion-2020/ (zuletzt abgerufen am 13.10.2021).

2.3 Gleichzeitigkeit hochdynamischer Ereignisse

Gerade in der Anfangszeit der Pandemie standen Manager vor vielen neuen und vor allem zeitkritischen Aufgaben. So mussten die Herausforderungen durch einbrechende Märkte mit administrativen Aufgaben wie der Umsetzung der Kurzarbeiterregelungen oder die Absicherung der Liquidität in Zusammenarbeit mit Banken und nicht zuletzt mit der Erarbeitung der Hygienekonzepte koordiniert werden – und dies alles gleichzeitig. Viele Unternehmen konnten die Wertschöpfung trotz vorhandener Marktbedarfe lediglich auf einem geringen Niveau aufrechterhalten. Den Maschinen- und Anlagenbau treffen besonders die Pläne, 5–15 Prozent des Personals abzubauen – so von 75 Prozent der Betriebe vorgesehen –, sowohl auf Arbeitgeber- als auch Arbeitnehmerseite extrem hart.

2.4 Extremer Innovationsdruck

Einzelne Unternehmen initiierten Innovationsprojekte und machten vor, wie in kurzer Zeit Anlagen zur Maskenproduktion entwickelt und realisiert werden können. Beispielsweise hat ein Unternehmen, das vor der Pandemie auf die Herstellung großformatiger Textildrucke für Werbezwecke spezialisiert war, in nur vier Wochen auf die Herstellung von Anlagen zur Maskenproduktion umgestellt und konnte sogar durch die Produktion und den Verkauf von Masken Umsatzeinbußen kompensieren.¹ Dieses Beispiel verdeutlicht, welcher immenser Innovationsdruck auf vermeintlich stabile Branchen und Unternehmen gewirkt hat. Die kurzfristige Entwicklung und Produktion neuer Technologien stellt weitere Herausforderungen dar. Produkte müssen entwickelt und angepasst, neue Technologien eingeführt, Zertifizierungen erlangt und vor allem der Marktzugang muss in kurzer Zeit realisiert werden. Der Innovationsdruck kann aber auch als Chance genutzt werden, um scheinbar unerrückbare Hemmnisse zu überwinden. Der Microsoft-Vorstandsvorsitzende Satya Nadella brachte es auf den Punkt: »Wir haben zwei Jahre digitale Transformation nun innerhalb von zwei Monaten erlebt.«¹

2.5 Liquidität

Die derzeitige Krise traf Deutschland nach einer fast beispiellos lang anhaltenden wirtschaftlichen Konjunkturphase und einer stabilen Haushaltslage. Zur Vorbereitung auf mögliche zukünftige Krisen sollten bezüglich vernetzter Wertschöpfung drei wichtige Aspekte berücksichtigt werden:

1. Die Bewältigung von Krisen erfordert die Solidarität mit allen Partnern. Nur so können stabile Netzwerke funktionieren und kann das Gemeinwesen aufrechterhalten werden.
2. Das Funktionieren von Ende-zu-Ende-Wertschöpfungsketten ist durch das Netzwerk selbst sicherzustellen. Dabei ist eine Erhöhung der Eigenfertigung aufgrund von Effizienz- und Liquiditätsproblemen zu vermeiden.
3. Entsprechend möglicher hochdynamischer Umfeldveränderungen muss das Liquiditätsmanagement vorausschauend gestaltet werden.

Geschäftliche Entscheidungen zur Annahme von Aufträgen, zur Investition in Technologien oder zum Aufbau neuer Vertriebswege in volatilen Umfeldern sind besonders risikoreich. Fehler oder Fehleinschätzungen wirken hier tiefgreifend. Einerseits können unvorhergesehene Kosten beim Aufbau neuer Geschäftsfelder auftreten. Andererseits führen geringere Liefermengen oder gar Verzögerungen beim Marktstart dringend benötigter Produkte im Vergleich zum Wettbewerb oft zu immensen Umsatzeinbußen, was z. B. bei Herstellern von Vakzinen in der aktuellen Krise besonders deutlich wurde.

2.6 Lieferengpässe

Wertschöpfung profitiert von strukturierten und geregelten Liefernetzen, die mit großen Warenströmen auch über große Distanzen hocheffizient sind. Diese sind im Falle von Störeinflüssen aus drei Gründen besonders anfällig:

1. Die Mehrstufigkeit von Lieferketten macht es für Abnehmer nicht einfach, Friktionen in den Vorstufen des eigenen Zulieferers zu erkennen. Beim Ausfall eines Subzulieferers, der eventuell eine Schlüsselrolle am Markt einnimmt, kann weder der direkte noch der Zweitzulieferer auf Alternativen zugreifen. In der Folge können Produkte wegen eines fehlenden Bauteils nicht produziert werden.
2. Trotz multimodaler Transportwege (Bahn, Schiff, Straße) sind Lieferketten mit langen Transportwegen besonders anfällig, beispielsweise wenn alternative Transportwege den geplanten Takt nicht einhalten oder wenn der internationale Verkehr im Fall von Handelskrisen eingeschränkt oder gar gestoppt wird.
3. Die vermeintlich naheliegende Lösung, mehr Eigenfertigung einzuplanen, wird in vielen Fällen zum Bumerang, da etablierte Zuliefermärkte oft effizienter und günstiger sind und folglich die eigene Wettbewerbsfähigkeit bedroht sein könnte.

2.7 Gesamtwirtschaftliche Effekte

Die Auswirkungen externer Schocks wie die COVID-19-Pandemie oder das katastrophale Hochwasser im Sommer 2021 auf Unternehmen und die gesamte Volkswirtschaft machen deutlich, dass ein professionelles Resilienzmanagement auch oder sogar gerade für produzierende Unternehmen unerlässlich ist. Kurzfristig verursachen derartige Schocks konjunkturelle Effekte wie Nachfrageeinbrüche oder unterbrochene Lieferketten. Langfristig sind negative Auswirkungen durch ausbleibende oder zurückgestellte Investitionen zu erwarten. Das wiederum schadet der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen und dem volkswirtschaftlichen Produktionspotenzial. Dies gilt insbesondere angesichts einer weiterhin stark wachsenden internationalen Konkurrenz im produzierenden Sektor. Bei krisenbedingten Insolvenzen in der Industrie ist darüber hinaus zu befürchten, dass Teile der Kapazitäten zukünftig durch ausländische Konkurrenz ersetzt werden. Daher ist es sehr wichtig, die Erholungsphase der Industrie effektiv zu unterstützen und möglichst kurz zu halten. Insbesondere die Auswirkungen eines stärkeren Abschwungs der Wirtschaft in der Krise »multiplizieren« sich langfristig durch eine verlängerte Erholungsphase (in der Eurozone sank das Bruttoinlandsprodukt 2020 um ca. 7 Prozent, in Deutschland um ca. 5 Prozent, weltweit um ca. 3,5 Prozent)¹.

2.8 Was wird gefordert

Generische Verfahren decken eine Vielzahl von Krisen ab

Die COVID-19-Pandemie hat die Wertschöpfung von Unternehmen stark beeinträchtigt. Zudem kommen 2021 und 2022 auf einige Unternehmen Lieferengpässe bei Halbleitern zu.² Für kleine und mittelständische Unternehmen sind der Aufbau sowie die regelmäßige Aktualisierung von Verfahren und das Training der Mitarbeiter für die Bekämpfung einer Vielzahl unterschiedlicher Disruptionen mit besonders großem Aufwand verbunden. Firmen wie die Flex GmbH benötigen Resilienzmanagementsysteme, die mit möglichst wenigen Methoden und Prozessen die wichtigsten Disruptionen so abdecken, dass sie auch außerhalb von Krisenphasen angewendet werden können. Dadurch wird der Managementaufwand handhabbar und Vorbereitungsmaßnahmen sowie das Training im Rahmen des Standardgeschäfts umsetzbar. So wie eine Feuerschutzübung gleichzeitig sowohl für das Auftreten von Bränden als auch für die Evakuierung bei einer Explosionsgefahr beispielsweise trainiert, muss die Unternehmensleitung generische Verfahren auch für eine Reihe anderer Disruptionen

»Wir erwarten auch in naher Zukunft tiefgreifende Ereignisse. Ich würde insbesondere von möglichst generischen Methoden und Verfahren profitieren, die unabhängig vom Anlass funktionieren und einfach trainiert werden können.«

Dr. Christian Neuner
Flex GmbH

anwenden. Dieser Engineering-Ansatz hilft auch bei den sogenannten Black Swan Events, also bei Ereignissen, die nicht vorausgesehen werden können. Mit diesem Ansatz können bereits bestehende Lösungen ein auftretendes Problem mit geringem Adaptionsaufwand besser bekämpfen, als es bei Spezialverfahren der Fall wäre.

Datenverfügbarkeit und Datenverlässlichkeit

Richtig verstandene Resilienz zielt auf die flexible oder gar antizipative Umgestaltung unternehmerischer Strukturen oder auch ganzer Wertschöpfungsnetze ab. Entscheidende Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung ist ein tiefgehendes Verständnis des eigenen Systems. Dazu gehören die Geschäftsprozesse, die kritische Rolle einzelner Komponenten innerhalb des Systems sowie deren wechselseitige Abhängigkeiten gegenüber externen Stakeholdern und anderen Faktoren.

Damit Unternehmen auf dieser Basis nachhaltig sinnvolle Entscheidungen treffen können, benötigen sie frühzeitig verlässliche Daten. Dementsprechend erfordert die Realisierung resilienter Systeme hohe Datenverfügbarkeit und anforderungsgerechte Datenqualität. Die zur Verfügung stehenden Daten müssen korrekt, vollständig, konsistent, aktuell und jederzeit verfügbar sein. Gefordert werden daher Strukturen und Technologien, die diese Anforderungen erfüllen. Es sind

¹ Mandy Bartel: »Krise & Chance. Aufbruch in eine resiliente Gesellschaft«, in: Fraunhofer. Das Magazin, 2/20, S. 18–31. Auch online verfügbar unter: www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/publikationen/Magazin/2020/weiter-vorn-2-2020.pdf

¹ Sachverständigenrat zur Begutachtung der gesamtwirtschaftlichen Entwicklung – Statistisches Bundesamt, »Konjunkturprognose 2021 und 2020«, Wiesbaden 2021. Auch online verfügbar unter: www.sachverstaendigenrat-wirtschaft.de/fileadmin/dateiablage/Konjunkturprognosen/2021/KJ2021_Gesamtausgabe.pdf

² Richard Barnett: »Lieferengpässe in der Halbleiterindustrie«, 22. Februar 2021. Online unter: <https://beschaffung-aktuell.industrie.de/news/halbleiter-lieferengpaesse-in-der-automobilindustrie/> (zuletzt abgerufen am 13.10.2021).

Datenbasen zu schaffen, die es dem Management ermöglichen, möglichst frühzeitig sowohl auf verlässliche Daten zuzugreifen und die veränderten (Markt-)Situationen valide zu bewerten. Unverzichtbar dabei sind manipulationssichere Datenaustauschtechnologien. Diese müssen den Anforderungen an Datensouveränität, also größtmögliche Kontrolle und proaktiver Einfluss auf die Nutzung der (eigenen) Daten, gerecht werden. Nur so können die Verantwortlichen flexibel, schnell und vorausschauend auf sich anbahnende Ereignisse reagieren. Gerade die durch COVID-19 entstandenen Herausforderungen machen den Bedarf an verlässlich zur Verfügung stehenden Daten deutlich.

Wie oben ausgeführt, sind Unternehmen oftmals mit hoch heterogenen und teilweise auch konträren ökonomischen, ökologischen und/oder politischen Veränderungen konfrontiert, die zudem häufig ad hoc auftreten. In diesem Kontext soll die Notwendigkeit verlässlich verfügbarer Daten anhand eines Beispiels verdeutlicht werden:

Bei einem plötzlichen starken Nachfrageanstieg, etwa unter dem Eindruck einer drohenden Verknappung bestimmter Güter und zeitgleicher Lieferengpässe wegen Beschränkungen im länderübergreifenden Transport, ist eine Anpassung der Versorgungsketten unabdingbar. Im Sinne eines antizipativen Handelns benötigen Unternehmen daher frühzeitig belastbare Informationen sowohl über die zu erwartenden Marktentwicklungen als auch über die komplette Supply Chain – möglichst über viele Lieferanten hinweg. Damit nun der Entscheidungsprozess, welche Reaktion in dieser Situation sinnvoll ist, möglichst dynamisch und weitestgehend autonom ablaufen kann, müssen verlässliche Daten und Informationen zur Verfügung stehen.

Gemeinsame Planung von Produktion und Instandhaltung

Der Zusammenarbeit zwischen Produktion und Instandhaltung kommt bei der Gestaltung resilienter Produktionsprozesse und insbesondere bei der Flexibilisierung der Fertigung eine wesentlich stärkere Bedeutung zu. Ein aufschlussreiches Beispiel für die Flexibilisierung der Fertigung stellt die Matrixproduktion dar. Hier erfolgt ein Wechsel von der getakteten Fließbandfertigung zu einer Werkstattfertigung. Das verspricht mehr Flexibilität bei gleichbleibender Produktivität. Um diese erhöhte Flexibilität zu gewährleisten, müssen die Verantwortlichen diejenigen Produktionszellen identifizieren und überwachen, die durch unterschiedliche Störgrößen (z. B. Anlagenstillstände oder Änderungen im Produktionsauftrag) am stärksten beeinträchtigt werden. Hierfür sind im Vorfeld etwaige Wechselbeziehungen zu eruieren, also bei welchen Störungsarten welche Auswirkungen zu erwarten sind. Existieren signifikante Korrelationen, muss das Management diese Zusammenhänge im Rahmen einer integrierten Produktions- und Instandhaltungsplanung berücksichtigen.

Zudem steigt auch die Bedeutung eines schnellen und flexiblen Rüstens der Produktionsanlagen (Zellen), also das Einrichten von Betriebsmitteln für bestimmte Arbeitsvorgänge. Für beide Zielsetzungen – der hochflexiblen Zuordnung von Produkten zu Fertigungseinrichtungen und der Sicherstellung einer instandhaltungsfreien Produktion – ist eine permanente Abstimmung zwischen Produktion und Instandhaltung erforderlich.

Nachhaltige Sicherung von Produktionssystemen durch Integration von Resilienzfaktoren in die Zielsysteme

Die Zielsysteme und die damit verbundenen Kennzahlen heutiger Produktionssysteme sind in der Regel multikriteriell aufgebaut. Die Schwerpunkte liegen dabei oft auf Kundenzufriedenheit und Ressourceneffizienz, etwa mithilfe der Kennzahl für Anlageneffizienz. Faktoren zur Steuerung der Resilienz werden meistens nur unzureichend berücksichtigt. Notwendig ist daher eine ganzheitliche Betrachtung und Synchronisierung dieser zumeist divergierenden Ziele. Dabei müssen die bestehenden Zielsysteme mit den Resilienzzielen ausbalanciert werden. Außerdem muss der erreichte Zustand nachhaltig stabilisiert werden. Dieses ganzheitliche Optimierungsparadigma zwischen Resilienzfähigkeit, Leistungsfähigkeit und Nachhaltigkeit muss sich sowohl auf der strategischen Ebene im Rahmen der Unternehmensziele als auch auf der operativen Ebene – beispielsweise bei der Planung und Steuerung des Produktionssystems – widerspiegeln.

Instandhaltungsfreie Fabrik

Die Zukunftsvision der Arbeit in einer instandhaltungsfreien Fabrik bringt eine Reihe von Herausforderungen mit sich. Dabei verändert sich auch das Berufsbild der Instandhaltung. Es entwickelt sich hin zu »Resilienz-Experten oder -Managern«.

In der instandhaltungsfreien Fabrik sind sämtliche Instandhaltungsprozesse, Instandhaltungskompetenzen und die Arbeitsorganisation so ausgerichtet, dass unproduktive und nicht geplante Wartungs- und Instandhaltungsaufgaben annähernd auf null sinken. Damit verändert auch die Arbeit ihr Gesicht. Neue Wissensbestände und Kompetenzen verbinden sich miteinander. Die Instandhaltungsarbeit gewinnt dabei zunehmend den Charakter von Wissens- und Informationsarbeit.

Einen entscheidenden Beitrag dazu müssen Berufsschulen, Fachhochschulen und Universitäten leisten. Heute können Studierende die notwendigen Kompetenzen nur unvollständig an öffentlichen Bildungseinrichtungen erwerben. Deshalb müssen neue Qualifikationswege geschaffen werden. Dazu gehören Berufsabschlüsse wie Service-Techniker/-in, Instandhaltungs-Ingenieur/-in, Instandhaltungs-Techniker/-in oder Instandhaltungs- oder Service-Techniker/-in sowie Resilienz-Manager/-in. Dabei ist es wichtig, diese Ausbildungen entsprechend ihrer

Bedeutung und Vielseitigkeit so zu bewerben, dass das Berufsbild Instandhalter an Attraktivität gewinnt und damit auch einen größeren Kreis von Auszubildenden und Studierenden anspricht.

Aufgrund der fortschreitenden Digitalisierung müssen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sich kontinuierlich mit neuen Technologien vertraut machen. Während produzierende Unternehmen und Instandhaltungs-Dienstleister häufig mit »klassischen« Formen der Qualifizierung ihr Personal entwickeln, gilt es hierbei, künftig das gesamte Ökosystem der Instandhaltung in den Blick zu nehmen. Das bezieht auch angrenzende Bereiche und Funktionen, beispielsweise Personalentwicklung, aber auch Bildungsträger, Gewerkschaften und Sozialpartner, mit ein.

Das Ziel muss darüber hinaus sein, Lernorte zu etablieren und zu fördern. Unternehmen müssen die Bedeutung der Rolle der Resilienz-Experten/-Expertinnen vermitteln und zeigen, wie diese die Wettbewerbsfähigkeit stärken können.

Routine in der Ausnahme

Für eine möglichst hohe Flexibilität bei gleichbleibender Produktivität dürfen Störungen die Planung und Steuerung der Produktion nicht beeinträchtigen. Unternehmen müssen durch einen hohen Grad an Transparenz und Wandlungsfähigkeit in der Lage sein, auch auf außer- und innerbetriebliche Änderungen schnell und effektiv zu reagieren. So müssen etwa Ersatztechnologien sowohl intern als auch extern einsatzbereit sein. Auf diese Weise werden die Konsequenzen für die Wertschöpfung im Sinne der Resilienz möglichst gering gehalten.

Reversibilität

Für Unternehmen ist die Fähigkeit essenziell, schnell zu handeln. So galt es bereits im März 2020, viele unterschiedliche Aufgaben wie Sicherung der Wertschöpfungskette zum Kunden, Aufstellen und Umsetzen von Hygienekonzepten und Sicherstellung der Liquidität – bei gleichzeitigem, zum Teil schockartigem Nachfrageschwund – zügig anzugehen und zu bewältigen. Im Juni 2020 erfolgten zumeist bereits Nachholeffekte beim Kunden und ab November 2020 die Umsetzung erneuter Lockdown-Bestimmungen. Ein Neuaufbau von Wertschöpfungsstrukturen wäre zu aufwendig, zu langwierig und zu risikoreich. Das bedeutet, dass eine schnelle und aufwandsarme Umkehrbarkeit bei der Umgestaltung zu gewährleisten ist.

Mobilität der Fertigung ermöglichen

Eine Matrixproduktion führt durch ihre Wandlungsfähigkeit zu mehr Flexibilität und Mobilität in der Fertigung. Ein Produktionssystem wird dadurch skalierbar und die Prozesse werden flexibel anpassbar, indem einzelne Fertigungs- und

Montagemittel, aber auch ganze Prozessmodule (hoch spezialisierte Technologiemodule) hinzugefügt, verschoben oder entfernt werden können. Die freie Verkettung und die Mobilität der Prozessmodule führen zur Auflösung fester Strukturen und ermöglichen ein dynamisches Layout sowie eine ortsflexible Produktion.

Ausweichtechnologien befähigen

Ein längerer Produktionsstillstand aufgrund von Unterbrechungen in der gewohnten Lieferkette ist für die meisten Unternehmen ein großes Problem. Bisher wird zumeist versucht, Störungen in der Lieferkette über den Wechsel von Lieferanten in den Griff zu bekommen. Eine andere Möglichkeit stellt der Technologiewechsel dar, der Vorteile in der Gesamtkostenbetrachtung mit sich bringen kann. Aufgrund fehlender Prozesskompetenz oder mangelnder Vergleichbarkeit zum Serienprozess/-produkt greifen Unternehmen aber kaum auf diese Variante zurück. Eine Befähigung von Ausweichtechnologien (z. B. der Einsatz additiver Fertigungstechnologien gegenüber konventioneller Fertigung), die vom Kunden separat freizugeben sind, wäre eine alternative, probate Grundlage für die Nutzung eines größeren Portfolios bei der Überwindung des Krisenfalls.

Beispiel 1: Additive Fertigung

Die Additive Fertigung ist ein wesentlicher Baustein möglicher Ausweichtechnologien. Erste Erfahrungen mit der Verwendung von additiv gefertigten Bauteilen hat die Industrie bereits gemacht. Sie decken jedoch in den wenigsten Fällen die Vielfalt der Möglichkeiten Additiver Fertigung ab. Mit erweiterten Kenntnissen über diese Verfahren und dem Vorhandensein notwendiger, gebrauchsfertiger Daten eröffnen sich neue Chancen, um im Krisenfall Ausfallzeiten zu minimieren. Deshalb ist es notwendig, Daten aus unterschiedlichen Quellen und mit unterschiedlichen Dateiformaten verlustfrei in einen vollständigen Maschinencode für den jeweiligen Prozess umwandeln zu können. Das ist die Grundlage für einen schnellen Wechsel der Fertigungstechnologie. Darüber hinaus ist es mittels mobiler Fertigungskapazitäten bei einigen additiven Fertigungsverfahren bereits möglich, eine schnelle Vor-Ort-Reparatur durchzuführen, um die Ausfallzeit in infrastrukturschwachen Gegenden zu reduzieren. Die damit verbundene Verkürzung der Unterbrechungszeit spielt bereits heute in der Öl- und Gasindustrie eine entscheidende Rolle.

Beispiel 2: Nutzung von Sekundärhalbzeugen

Um einem Krisenfall vorzubeugen, muss die Industrie auch bei den Werkstoffen mehr Flexibilität anstreben. Diese kann zunächst durch viele Lieferanten abgedeckt werden. Doch der Wunsch nach Flexibilisierung stößt bei Spezialisierungen schnell an seine Grenzen. Gerade im Bereich der verarbeitenden Industrie stehen oft nur wenige Produzenten zur Verfügung. Eine Flexibilisierung bietet aber die Nutzung von Sekundärhalbzeugen. Als Sekundärhalbzeuge werden Halbzeuge bezeichnet, die aus gebrauchten Produkten gewonnen werden können. Beispielsweise lassen sich aus Pkw-Dächern und Außenhautteilen »gebrauchte« Bleche gewinnen und direkt weiterverarbeiten. Die Schwierigkeit besteht darin, notwendige Werkstoffkennwerte wie z. B. Festigkeitskennwerte oder Umformvermögen kurzfristig verfügbar zu machen, und in der Bauteilfreigabe beim Kunden. Eine Beschleunigung dieser Prozesse wäre durch entsprechende Werkstoffdatenbanken, Prozess- und Bauteilsimulationen möglich. Auf dieser Basis könnte eine Bauteilfreigabe durch den Endkunden zügig erfolgen.

Beispiel 3: Resilienz durch Versorgungsvielfalt

Rohstoffintensive Betriebe sind durch einen krisenhaften Zwischenfall stark von der Lieferversorgung ihrer Einsatzstoffe abhängig – vor allem, wenn es sich um Importware handelt. Um die Produktion nicht unterbrechen zu müssen, sind Alternativen gefragt. Eine temporäre Rohstoffherzeugung im eigenen Land kann hier sehr hilfreich sein. Hervorzuheben sei hier beispielsweise die Substitution von fossilem Koks für den Kupolofeneinsatz (Schmelzprozess von Metallen im Schachtofen) durch biogen-stämmiges Karbonisat.

Simultaneous Engineering 2.0

Auf Basis des hohen Innovationsdrucks, neue Funktionalitäten quasi in »Nullzeit« zu erzeugen, ergeben sich auch weitere Anforderungen an das Zusammenspiel von Produkt- und Prozessentwicklung in Krisenfällen. Gefragt sind hier Automatismen sowohl bei der Erzeugung neuer Produkteigenschaften als auch bei der abgestimmten formalen Umsetzung von Prozessen in Abhängigkeit eigener und fremder Fähigkeiten. Das klassische Simultaneous Engineering (SE) mit der schrittweisen Feasibility – eine Vorgehensweise in der Produktentwicklung, bei der eine Überlappung von Arbeitsabläufen erfolgt – muss zu automatisiert erzeugten Varianten von Produkt und Prozess führen, zu einer Art SE 2.0. Dabei führen die SE-Teams die Auswahl und, soweit erforderlich, die Optimierung gemeinsam durch.



An vielen Stellen der Produktion stoßen wir mit herkömmlichen Methoden, Technologien und Prozessen an die Grenzen unserer Erkenntnis. Je besser wir jedoch unsere komplexen Prozesse und ihre Randbedingungen kennen, desto fundierter und schneller können wir bei Störungen reagieren.«

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs MBA
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

3 Rahmenmodell für Resiliente Wertschöpfung

Das Rahmenmodell des Fraunhofer-Verbunds Produktion löst das Dilemma zwischen Effizienz im Tagesgeschäft und der Vorbereitung auf krisenhafte Ereignisse auf.

Die Resilienz von Wertschöpfungssystemen ist nur so wirksam wie das schwächste Glied. Das Rahmenmodell des Fraunhofer-Verbunds Produktion stellt ein durchgängiges Gerüst bereit, das die relevanten Aspekte vollständig und vernetzt adressiert. Das Modell enthält in einem morphologischen Kasten das »Was« – die erforderlichen Eigenschaften von Partnern und Prozessen entlang der Resilienzphasen, das »Wie« – die wesentlichen Optimierungsziele für Resiliente Wertschöpfung, das »Wo« – die Interventionsebenen zur Gestaltung sowie das »Womit« – die Lösungsbausteine zur Umsetzung und zum Betrieb eines resilienten Unternehmens.

3.1 Was – Eigenschaften entlang der Resilienzphasen

Was für Individuen gilt, ist für Organisationen, die Wertschöpfung realisieren, genauso relevant. Die besten Technologien helfen nur sehr eingeschränkt, wenn Resilienz nicht im Tagesgeschäft »by Design« gelebt wird. Neben den technischen Systemen und der IT-Infrastruktur sind auch die Kompetenzen und die Motivation der Mitarbeitenden von großer Bedeutung. Um das zu erreichen, sind **Grundeinstellungen**, die auch dem einzelnen Menschen helfen, unabhängig von den Resilienzphasen zu etablieren, zu trainieren und zu pflegen. Diese sind: Optimismus, Akzeptanz von Problemlagen, Lösungsorientierung und Unternehmertum, Verantwortungsübernahme, Vernetzung sowie die Nutzung von Niederlagen und Fehlern als Motiv für die Weiterentwicklung.

Was Eigenschaften entlang der Resilienzphasen	Schaffung von resilienzförderlichen Grundeinstellungen				
	Vorbereiten	Verhindern / Reagieren	Schützen	Wiederherstellen	
	Antizipation	Agilität, Flexibilität, Adaptivität	Robustheit	Regenerations-/ Lernfähigkeit	
Wie Optimierungsziele für Resiliente Wertschöpfung	In jeder Situation systematisch handlungsfähig bleiben				
	»Erkenne Ereignisse und Auswirkungen, bevor sie auftreten«	»Schaffe die erforderlichen Anpassungen in der Änderungsfrequenz«	»Kompensiere die Ereignisse möglichst ohne Redundanz«	»Sieh schnelle und reversible Transformationen vor«	
Wo Interventionsebenen	Resilienz vom Produkt bis zum vernetzten Wertschöpfungssystem				
	Markt & Wettbewerb	Produkte & Designleistungen	Wertschöpfung & Prozesse	Ressourcen & Infrastruktur	Mitarbeiter & Kultur
Womit Lösungsbausteine	Das benutzen, was am besten geeignet erscheint				
	Prinzipien	Strategien	Methoden	Technologien	Werkzeuge

Die **technologisch zu gestaltenden Eigenschaften** von Wertschöpfungssystemen werden hinsichtlich ihrer Anwendung den Resilienzphasen Prepare, Prevent, Protect, Respond und Recover zugeordnet. Für die Prepare-Phase (Vorbereiten) ist dies insbesondere die **Antizipationsfähigkeit**, wobei der Zeitvorteil zur Umsetzung einer Neugestaltung, zu Änderungen oder Anpassungen genutzt wird. Die Phasen Prevent (Verhindern) und Respond (Reagieren) sind jeweils reziprok hinsichtlich des Aufbaus und des Abbaus von Leistungsfähigkeiten. Deshalb stehen hier **Agilität, Adaptivität und Flexibilität** im Vordergrund. In der Protect-Phase (Schützen), der Phase mit dem höchsten Geschwindigkeitsgradienten der Veränderung, schützt vor allem **Robustheit** vor Schäden und dem damit zumeist einhergehenden Leistungsabfall. Im Bereich des Recover (Wiederherstellen) sind die schnelle **Regeneration** und die Verbesserung der eigenen Fähigkeiten sowie das **Lernen** für die Bewältigung und zum Teil sogar zur Verhinderung kommender Krisen maßgeblich. Der Aufbau aller beschriebenen Fähigkeiten erfolgt jedoch vorrangig in den Phasen von Prepare und Recover. Somit stehen die Fähigkeiten und Phasen in einer Wechselbeziehung zueinander.

3.2 Wie – Optimierungsziele für Resiliente Wertschöpfung

Optimierungsziele adressieren die Aufrechterhaltung der Handlungsfähigkeit entlang aller Resilienzphasen. **Handlungsfähigkeiten in vernetzten Wertschöpfungssystemen** sind auf die Bereiche der Rechtsfähigkeit, des »Dürfens«, der Prozessfähigkeit, des »Könnens« sowie auf das ausreichende Vorhandensein von Material- und Finanzmitteln, vom Eingangs- bis zum Ausgangspunkt, verteilt. Es gilt sowohl im Normalmodus als auch im Krisenmodus, die Liquidität entlang der Ende-zu-Ende-Wertschöpfungsketten aufrechtzuerhalten. Die Zielsetzungen zur Optimierung kombinieren daher grundsätzliche Gestaltungsziele mit Aufwands- und Zeitkomponenten. So verknüpft die Optimierung der



Antizipationsfähigkeiten im Normalfall in der Prepare-Phase den Zeitpunkt der Erkennung mit dem Aufwand, der routinemäßig betrieben darauf verwendet wird. Für die **Agilität** gilt sowohl in der Prevent- als auch in der Respond-Phase die Anpassungsgeschwindigkeit als wesentlich. Diese ist jedoch gerade wegen ihres Bezugs zum resultierenden Aufwand stets im angemessenen Verhältnis zu den Änderungen zu sehen. Hier hilft die Analogie zum Shannon'schen Abtasttheorem. Es besagt, dass eine Abtastrate, die der doppelten Frequenz des zu betrachtenden Eingangssignals entspricht, für die Nachbildung oder hinreichende Messung, ausreicht.¹ Dementsprechend lässt sich sagen, dass eine doppelte Anpassungsfrequenz im Verhältnis zu den äußeren Änderungen eine hinreichende Handlungsfähigkeit gewährleistet. Die Zielsetzung der **Robustheit** wird vorrangig in den Phasen von Prepare und Prevent geschaffen, jedoch in Protect genutzt. Wegen der zeitlichen Diskrepanz entsteht hier ein Zielkonflikt zwischen Aufwand im Normalfall und Nutzen in der Krise. **Redundanzen** helfen vordergründig bei der Robustheit von Systemen in der Protect-Phase, sie machen jedoch unter Umständen erhebliche Investitionen nötig. Darüber hinaus führen sie zu Komplexität und Trägheit in allen anderen Phasen und stehen so der Forderung der Liquidität entgegen. Daher ist die Robustheit mit so wenig Redundanz wie möglich anzustreben.

Die **Regenerationsfähigkeit** adressiert zwei Optimierungsparameter: die Reduzierung der einzusetzenden Kräfte sowie die Schaffung von reversiblen Transformationen vom Normalmodus zum Krisenmodus. Auf diese Weise müssen möglichst wenig irreparable Änderungen kompensiert werden. Andererseits ist eine hohe Geschwindigkeit bei der Regeneration zur Wiedererlangung der Leistungsfähigkeit wünschenswert.

¹ C. E. Shannon: »Communication in the Presence of Noise«, in: Proceedings of the IRE, Vol. 37, No. 1, Jan. 1949, pp. 10–21. DOI: 10.1109/JRPROC.1949.232969.

3.3 Wo – Interventionsebenen

Die Optimierung der Eigenschaften zur Resilienz erfolgt an den Entscheidungsdimensionen direkt. Diese sind: Markt & Wettbewerb, Produkte & Dienstleistungen, Wertschöpfung & Prozesse, Ressourcen & Infrastruktur, Mitarbeiter & Kultur sowie Kollaboration & Partner. Beispielsweise ist im Gestaltungsfeld Markt & Wettbewerb die Entscheidung darüber zu treffen, ob die Wertschöpfung durch ausgeprägte Kenntnisse/Erfahrungen (Lernfähigkeit) der etablierten Märkte noch robuster gestaltet werden kann. Das begrenzt im Falle mangelnder Flexibilität bei Veränderungen der Marktnachfrage oftmals das Wachstumspotenzial. Eine Alternative wäre die Verbesserung der Antizipationsfähigkeit bei der Früherkennung von Marktveränderungen sowie die Erhöhung von Flexibilität und Adaptivität durch eine nachfragebasierte Lernfähigkeit. Dies wiederum könnte jedoch mit einem erhöhten Investitionsrisiko einhergehen, das für das Adressieren neuer Märkte aufgebracht wurde.

3.4 Womit – Lösungsbausteine

Durch das Lernen, wie Krisen effektiv gemanagt oder sogar komplett vermieden werden können, eröffnen sich für Unternehmen vollkommen neue Marktchancen für die Zukunft. Resiliente Unternehmen können in Krisen ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit stärken und als Gewinner daraus hervorgehen.

Das Resilienzmodell des Fraunhofer-Verbunds Produktion liefert Lösungsbausteine auf folgenden Ebenen der Unternehmensgestaltung:

- Resilienzprinzipien
- Resilienzmanagement
- Resilienzmethoden
- Technologien
- Resilienzwerkzeuge

Resilienzprinzipien stellen in Analogie zu den Prinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme die grundlegenden Regeln zur Gestaltung resilienter Wertschöpfungssysteme dar. Die folgenden neun Resilienzprinzipien sind dabei zu berücksichtigen:

- **Früherkennung/Prädiktion** ist das Identifizieren von charakteristischen Merkmalen, anhand derer Krisen so früh und gleichzeitig so relevant wie möglich erkannt werden können. Dazu gehört z. B. die Multi-Indikatorenanalyse, bei der das Muster mehrerer unterschiedlicher Merkmalsausprägungen frühzeitig auf ein kommendes oder schon erfolgtes Ereignis hinweist.

- **Redundanz** entsteht durch funktional gleiche oder vergleichbare Ressourcen eines technischen Systems. Mit Redundanz sind vorgeplante Fallbacks in »abgesicherten« Prozessen möglich.
- **Vernetzung** ermöglicht Organisationen, untereinander schnell Informationen, Wissen und materielle Güter auszutauschen. Dies baut auf Vertrauen und gemeinsamen Erfahrungen auf.
- **Asynchronität** bedeutet im Sinne der Resilienz die zeitlich versetzte Interaktion in Material- und Informationsflüssen mit dem Ziel, die Kopplung verschiedener Systeme so lose und damit so unabhängig wie möglich zu gestalten. Beispielsweise kann sich durch die Zwischenspeicherung von Informationen von zwei miteinander kommunizierenden Systemen der Ausfall eines Systems nicht direkt auf das andere System auswirken.
- **Modularität** dient zur wirtschaftlichen Schaffung flexibler und damit weniger anfälliger Systeme. Die Standardisierung im Rahmen der Modularisierung hilft insbesondere bei der Umsetzung möglichst gleichartiger Vorgehensweisen zur Bekämpfung unterschiedlichster Krisen.
- **Isolation** ist die Fähigkeit, Unvollkommenheiten in einem System so zeitnah wie möglich vom Rest des Systems zu isolieren, damit keine Fehlerkaskade entstehen kann.
- **Bricolage** ist die Fähigkeit von Individuen und Organisationen, mit vorhandenen Ressourcen Lösungen zu schaffen, sodass Krisen schnell überwunden werden können, ohne auf bestmögliche Mittel warten zu müssen.
- **Reversibilität** ist das Prinzip, mit dem von einer Leistungsstufe zu einer niedrigeren oder höheren Leistungsstufe ohne Verlust rückkehrbar umgeschaltet werden kann.
- **Duktilität** bedeutet die Ausrichtung von Prozessen und Infrastrukturen auf die Widerstandsfähigkeit gegenüber Krisen und Ausnahmesituationen.

Die neun Resilienzprinzipien sind nicht isoliert von den Prinzipien ganzheitlicher Produktionssysteme zu sehen. So steht beispielsweise die Redundanz oder die Asynchronität zum Teil dem Prinzip der Vermeidung von Verschwendung gegenüber.

Die Bausteine für das **strategische Resilienzmanagement** liefern passend zu den Randbedingungen von Unternehmen und Netzwerken die strategischen Grundsätze aus den Blickwinkeln der Unternehmensstrategie, der Technologie- und Innovationsstrategie sowie der Operationsstrategie. Dabei wird die Resilienz, die bisher überwiegend nur in Teilbereichen berücksichtigt wurde, als integraler Bestandteil des gesamten

Strategiesystems anwendungsnah verortet. Dadurch werden die damit einhergehenden Konflikte in Strukturen, Prozessen und Geschäftsmodellen transparent.

- Die **Unternehmensstrategie** beinhaltet den langfristigen Plan, mit dem Unternehmensziele erreicht werden sollen und um den wirtschaftlichen Erfolg sicherzustellen. Im Rahmen der Resilienzstrategien erfolgt beispielsweise die Bestimmung der Balance zwischen Autarkie und Vernetzung aus Resilienz-sicht im vorhandenen Geschäftsrahmen.
- Die **Technologiestrategie** definiert, wie ein Unternehmen mit Technologien verfahren möchte, um Wettbewerbsvorteile zu erzielen. Sie definiert die technologischen Ziele und zeigt den grundsätzlichen Weg dahin auf. Sie gibt an, welche Technologien zu welchem Zweck eingesetzt werden sollen.
- Die **Innovationsstrategie** legt langfristige Ziele der Innovationstätigkeit fest, stellt die dafür erforderlichen Innovationsprojekte auf und bewertet sie. Sie identifiziert Technologien und Märkte, die ein Unternehmen entwickeln und erschließen sollte. Außerdem stellt sie eine Handlungsorientierung dar, mit deren Hilfe Ideen generiert und Ressourcen verteilt werden. Zur Optimierung der Resilienz sind hierbei z. B. Entscheidungen zur Architektur von Produkten und Prozessen zu treffen. So ermöglichen beispielsweise modulare Architekturen eine bessere Flexibilität und Dynamik in der Produktentwicklung, führen jedoch zu erhöhten initialen Entwicklungsaufwänden und zu einem Komplexitätszuwachs. Dies kann einen Zielkonflikt mit der kurzfristigen Effizienz verursachen.
- Die **Operationsstrategie** bestimmt, wie die oben genannten Strategien im Tagesgeschäft umzusetzen sind. Sie legt fest, welche Prozesse wo und mit welcher Ausprägung realisiert und überwacht sowie welche Ressourcen dazu zur Verfügung gestellt werden. Aus Sicht einer integrierten Resilienz-betrachtung sind dabei z. B. Standorte in Bezug auf Kompensation und Redundanz genauso zu berücksichtigen wie die Fertigungstiefe oder die Lieferantenstruktur.

Resilienzmethoden sind bewährte Vorgehensweisen und Techniken, mit denen die Resilienzprinzipien sowie Unternehmensstrategien realisiert und umgesetzt werden. Dazu gehört z. B. die Krisensimulation, die real, virtuell oder hybrid erfolgen kann. Unternehmen überprüfen damit den Vorbereitungsstand auf spezifische Krisen und trainieren zusätzlich Vorgehensweisen für die Prepare-Phase. Im Fall der Simulation kommt beispielsweise häufig die ereignisdiskrete Simulation zum Einsatz. Andere können Fragebogenmethoden sein wie der Resilienzcheck des Fraunhofer-Instituts für Kurzzeitmechanik, Ernst-Mach-Institut, EMI.

Technologien bilden die Basis von Produktionsprozessen. In diesem Rahmen spiegeln sie eine Reihe von Lösungsvarianten für unterschiedliche Problemstellungen wider. Aus Kostengründen entscheiden sich Unternehmen meistens nur für eine Methode zur Erreichung ihres Ziels. Für die Resilienz ist es aber notwendig, kurzfristig auf verschiedene **flexible Technologien** zurückgreifen zu können. Dieses setzt in den Unternehmen voraus, dass aus dem vielfältigen Technologieportfolio die optimale Methode erkannt und in kurzer Zeit bzw. am besten bereits im Vorfeld als qualifizierte Ausweichtechnologie freigegeben wird. Neben den Produktionsprozessen sind auch Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe hinsichtlich ihrer Austauschbarkeit zu betrachten. Großes Potenzial bieten z. B. Sekundärmetalle, Sekundärhalbzeuge oder auch Substitutionsprodukte, also solche Produkte, die dieselben oder ähnliche Bedürfnisse befriedigen und vom Kunden als gleichwertig angesehen werden. Durch die Kenntnis und die Qualifizierung dieser Produkte sowie die ggf. darauf angepasste Technologie können Produktionsprozesse hinsichtlich möglicher Schwachstellen widerstandsfähiger gemacht werden.

Resilienzwerkzeuge werden angewendet, um die Umsetzung der Methoden und Technologien, auch in Kombination, für die Bewältigung von Aufgaben in den einzelnen Resilienzphasen zu unterstützen. Werkzeuge müssen dabei unter Umständen mehrere Phasen gleichzeitig abdecken können. Ein solches Werkzeug wäre beispielsweise ein interaktives modellbasiertes Lagebild, das die Unternehmensführung von der Prepare- bis zur Recover-Phase bei Entscheidungs-, Planungs- und Überwachungsprozessen durchgängig unterstützt.



Wir brauchen nach innen Strukturen, die robust sind und die ich aktiv beeinflussen kann. Gleichzeitig muss ich nach außen reaktiv und agil sein, um auch während einer Krise die Wertschöpfung erfolgreich aufrechtzuerhalten.«

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bauernhansl
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA



4 Die RESYST-Lösungsbausteine

Die Lösungsbausteine des Fraunhofer-Verbunds Produktion für eine Resiliente Wertschöpfung unterstützen Unternehmen in diesen drei Anwendungsbereichen:

- Strategie- und Prozessmanagementsysteme
- Produktionssysteme
- Produktionstechnologien

Strategie- und Prozessmanagementsysteme

Resiliente Wertschöpfung beginnt mit der richtigen Strategie. In einem sogenannten Systems Dynamic Model, dem **Interpedenzmodell**, werden die Bereiche Markt & Wettbewerb, Produkte & Dienstleistungen, Wertschöpfung & Prozesse, Ressourcen & Infrastruktur, Mitarbeiter & Kultur sowie Kollaboration & Partner so zusammengefasst, dass Wechselbeziehungen zwischen Effizienz und Resilienz fassbar gemacht werden. Damit kann das Unternehmen die Grundlage für Resiliente

Wertschöpfung schaffen. Sie bildet die Basis für die Ausgestaltung von im Managementsystem integrierten **Resilienzmanagementprozessen** vom **Prepare bis zum Recover**. Diese wiederum unterstützen sowohl die effizienten Vorbereitungen im Normalmodus als auch die Reversibilität von Änderungen in der Krise, etwa beim Aufbau und Betrieb eines Krisenstabs. Das integrierte Modell des Resilienzmanagements konfiguriert automatisiert das **interaktive Lagebild**, mit dem schon im Normalbetrieb Resilienzfunktionen wahrgenommen werden.

Die Resilienzfunktionen beinhalten einerseits die Überwachung externer Einflüsse sowie die simulative Bewertung möglicher Auswirkungen, insbesondere auf End-to-End-Prozesse. Letztere reichen von den Sub-Zulieferern bis zu den Kunden der Kunden. Andererseits werden die Leistungen und Anomalien der internen Prozesse und Ressourcen visualisiert. Im Krisenmodus hilft das Lagebild darüber hinaus beim Aufbau des Krisenstabs und bei der

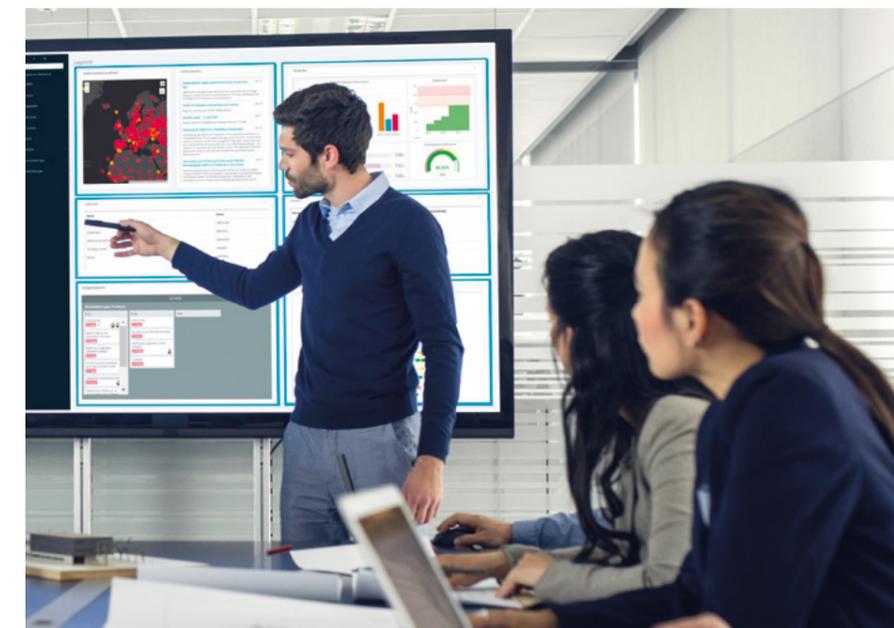
Planung und Überwachung der Maßnahmen, indem es beispielsweise die Auswirkungen der Maßnahmen auf die Liquidität simuliert. So kommen Unternehmen »vor die Lage« und bleiben auch in schwierigen Situationen voll handlungsfähig. Das Lagebild macht z. B. auch das Risiko des Ausfalls von Lieferbeziehungen sichtbar, sodass die Verantwortlichen schnell alternative Beschaffungsquellen oder -wege planen und realisieren können.

Für das Auffinden alternativer Beschaffungsquellen oder -wege dient die sogenannte **Matching-Plattform**. Das Matching, also das Suchen und Finden möglicher Alternativen, erfolgt auf Basis eines gemeinsamen Service-Modells mit dynamischen Semantiken, sodass Matching-Algorithmen zur Vernetzung mit und zur Nutzung von alternativen Wertschöpfungsprozessen erzeugt werden. Bereits bestehende teilautomatisierte Verhandlungsmechanismen werden so integriert, dass eine Neukonfiguration von Wertschöpfungsketten – unter Wahrung der Datenautonomie – sowohl im Rahmen der Krisenvorbereitung (Prepare) als auch in der Reaktion in Protect und Respond schnell erfolgen kann. Die Matching-Plattform hilft beim Ausfall von Prozessen für bestehende Produkte und

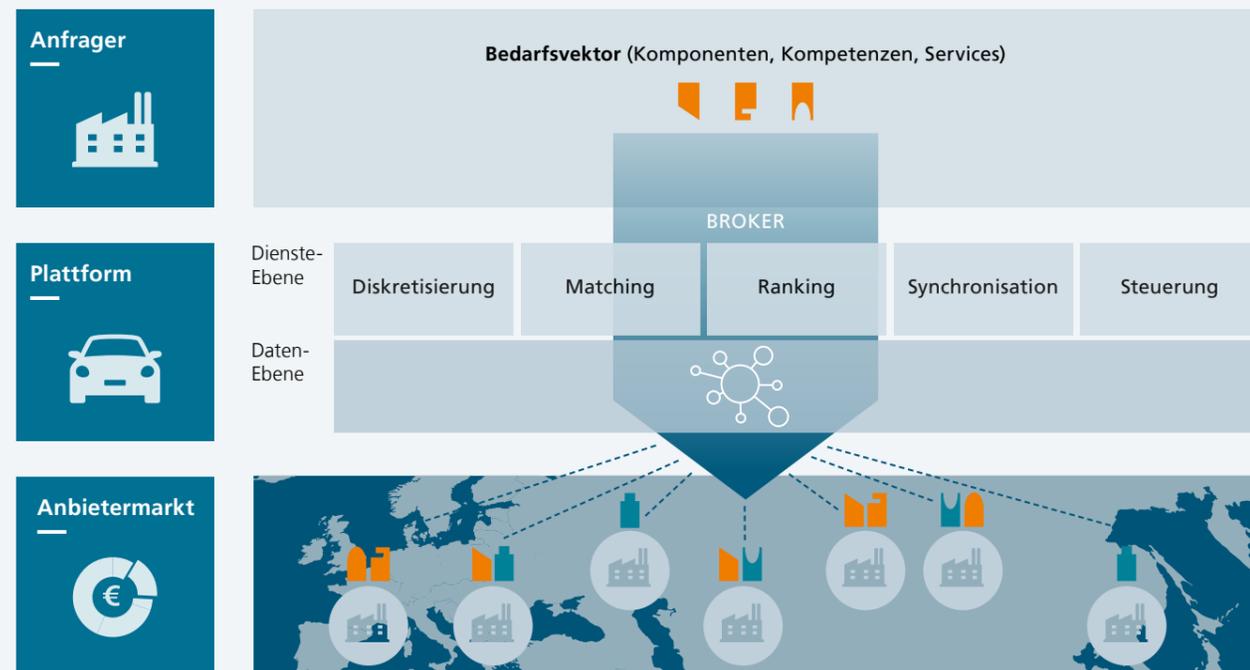
Geschäftsmodelle und auch bei der Neuorientierung. Die automatisierte Erzeugung von alternativen Prozessen unterstützt bei der Umsetzung geschlossener Wertschöpfungsketten auf allen Ebenen – beispielsweise der Geschäftsprozess- oder der Materialflussebene.

oben: Integrierte Prozess-Services und Infrastruktur-Architektur für resiliente Wertschöpfungsnetze.

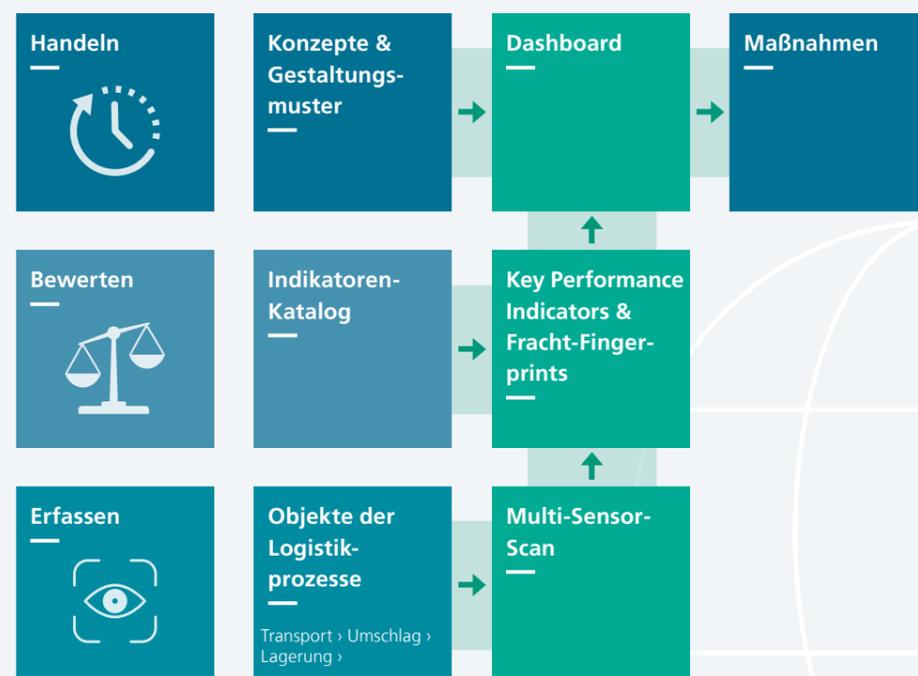
unten: Mit dem interaktiven Lagebild können schon im Normalbetrieb Resilienzfunktionen wahrgenommen werden.



Matching-Plattform



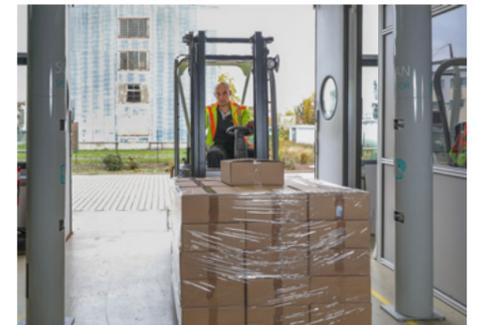
Lieferlogistik-Plattform



Mithilfe der Matching-Plattform können auch Optionen der **Umstellung auf autonomes Sourcing mithilfe von Recyclaten** aufgriffen werden, also die Beschaffung alternativer Rohstoffe durch autonome Systeme. Auf Basis einer Referenzdatenbank werden Recycling- und Produktionsprozesse mit Blick auf die Lieferkette sowie die Substituierbarkeit und Qualitätssicherung miteinander verknüpft. Das gewährleistet, dass die Qualität von Sekundärrohstoffen äquivalent zu der von Primärrohstoffen ist und auch eine Nachverfolgbarkeit möglich wird.

Das Lagebild ist mit einer robusten **Lieferlogistik-Plattform** verbunden. Kern der Lösung ist eine Multi-Sensor-Plattform. Diese sorgt für die automatisierte Erfassung resilienzrelevanter Frachtinformationen im Warenübergang und generiert einen robusten Fracht-Fingerprint. Dieser ist für die revisions-sichere Kennzeichnung und Überprüfung von Frachten erforderlich. Damit wird eine umfassende und rechtzeitige Datenverfügbarkeit über die Fracht und deren Zustand auf operativer Ebene realisierbar. Diese Transparenz ist für Logistikdienstleister unabdingbar. Sie ermöglicht darüber hinaus die Identifikation, Einplanung und Umsetzung sogenannter Bricolage-Maßnahmen für den sicheren Warentransport durch Rekonstruktion bzw. Wiederherstellung der zugrunde liegenden Datenbasis. Das verringert Zusatzmaßnahmen in Form redundanter oder erneuter Lieferungen gerade von Engpassgütern.

Aufgrund der durchgängigen Digitalisierung des Resilienzmanagements sind auch Verfügbarkeit und Leistung der zugrunde liegenden **IT-Funktionen** essenziell. Das Risikobewertungssystem dient dazu, Schwachstellen vor dem Hintergrund der Auswirkungen auf die Wertschöpfung in konkrete Handlungsfelder zu überführen. Mithilfe von Szenarioanalysen werden z. B. mit Lieferausfällen gekoppelte Angriffsszenarien und Schutzziele sowie Maßnahmen definiert, deren Status im interaktiven Lagebild schon im Normalmodus überwacht werden können. Somit lassen sich im Krisenfall, etwa bei einem Cyberangriff, das hinterlegte Modell und die spezifischen Prozesse zur Abwehr hochfahren und im Lagebild überwachen.



oben: Der »ScanSpector« als Simulation.

Mitte: Der »ScanSpector«, ein automatisierter Frachtscanner, kann manuelle Stückguterfassung ablösen.

unten: Das Dashboard zur Überwachung temperaturempfindlicher Waren entlang weltweiter Lieferketten.



Produktionssysteme

Zur resilienten Gestaltung einer Produktion müssen die einzelnen Systemelemente flexibel sein und sich an wechselnde Anforderungen anpassen. Im Gegensatz zum vorherrschenden Paradigma, dass Komplexität in Produktionssystemen durch beispielsweise Standardisierung oder Taktfertigung reduziert wird, bietet Komplexität in einem resilienten Produktionssystem großes Potenzial hinsichtlich Flexibilität, Agilität und Adaptivität. Diese Potenziale können auf den Ebenen der Produktionssteuerung, der Anlagenrekonfiguration und der Prozesskette gezielt adressiert und genutzt werden. Die maximale Ausbaustufe in einem resilienten Produktionssystem stellt dabei die Verknüpfung aller drei Ebenen dar.



Montage ohne Band und Takt: Das Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA gestaltet seine Matrixmontage produktiv und wandlungsfähig.

Innerhalb der Produktionssteuerung ist die **Matrixproduktion** ein solches flexibles und wandlungsfähiges System. Im Gegensatz zu klassischen Produktionssystemen wie einer Transferstraße oder einer Linienfertigung ist sie nicht nur für Produkte mit niedriger Varianz ausgelegt, sondern auch für eine hohe Produkt- und Variantenvielfalt. Ein flexibles Routing zwischen den Produktionszellen ermöglicht es, im Falle einer Panne oder Störung Ausfälle zu kompensieren und schneller zu reagieren. Für die Fertigung von hochvariantenreichen Produkten wird somit eine starre nivellierende Taktung vermieden

und genügend Agilität im Produktspektrum ermöglicht.

Die Matrixproduktion fokussiert sich auf benötigte Prozesse über alle Varianten hinweg. Gleiche und ähnliche Prozesse bündeln sich dabei in einem Prozessmodul. Diese Prozessmodule können je nach Kapazitätsbedarf vervielfältigt im System vorkommen. Die Summe der unterschiedlichen Module ergibt das System. Durch eine flexible Logistik und Steuerung lassen sich die Module auftragspezifisch ansteuern und nutzen. Somit denkt die Matrixproduktion ein Produktionssystem in seiner Struktur vollständig neu und eröffnet neue Freiheitsgrade. Unternehmen sind so in der Lage, auch Portfolios in einem volatilen Marktumfeld eine flexible und effiziente Wertschöpfung von variantenreichen Produkten zu betreiben. Dass diese komplexen Systeme heutzutage möglich sind, ist teilweise durch die Digitalisierung sowie durch KI-Assistenzsysteme bedingt. Mittels Maschinellen Lernens kann so bedarfsgerecht ein globales Maximum (z. B. Anlagenauslastung, Produktdurchlaufzeit, Kostenminimierung) in der Matrixproduktion definiert und die aktuelle Unternehmenssituation direkt im Produktionssystem gespiegelt werden.

Die **intelligente Instandhaltungsplanung** ist ein integraler Bestandteil der Produktionssteuerung, um resilient auf Störungen der

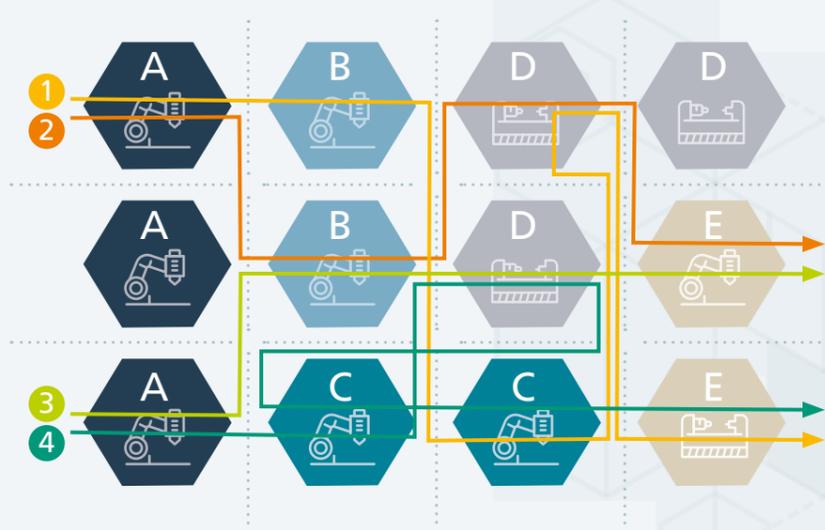
Produktion reagieren zu können. Dazu müssen die Instandhaltungsaktivitäten zu jeder Zeit kurzfristig mit der Produktionssteuerung abgestimmt sein. Mithilfe von Maschinen- und Komponentenüberwachung sowie durch spontane Eingriffe der Instandhaltung können die zuständigen Mitarbeitenden ungeplante Produktionsausfälle abwehren. Auch kurzfristiges Umplanen von Instandhaltungsaktivitäten kann bei unerwarteten Produktionsunterbrechungen die Produktion wieder steigern. Um diese auf den ersten Blick teilweise konträren Praktiken umzusetzen, müssen mehrere Informationen innerhalb weniger Minuten bekannt sein und verarbeitet werden: Zustände der betrachteten Maschinen, Verkettungen des Produktionssystems, Füllstände der Zwischenspeicher, aber auch die Verfügbarkeit von qualifiziertem Instandhaltungspersonal sowie von Werkzeugen und Ersatzteilen. Für diese kurzfristigen Instandhaltungsplanungen wurde ein System auf Basis des Maschinellen Lernens entwickelt. Das System trainiert anhand von Modelldatensätzen die Entscheidungsfindung und erarbeitet selbstständig eine Strategie für die optimale Instandhaltungsplanung. Das System optimiert die Entscheidungen basierend auf verschiedenen Dateninputs sowie einer hinterlegten Gewinnfunktion, um möglichst hohe Produktionserträge zu erzielen. Dieser Ansatz ermöglicht es, sowohl kurzfristige Unterbrechungen zur Vorbeugung von Maschinenschäden als auch das spontane Vor- und Verschieben von Instandhaltungsaufträgen zu minimieren.

Auf der Ebene **rekonfigurierbarer Produktionszellen** wird die Matrixproduktion auch um die Flexibilität innerhalb der jeweiligen Matrixzellen auf Anlagenebene erweitert. Die Matrixproduktion kann somit auf eine höhere Vielfalt an Prozessmodulen verschiedenster Fertigungstechnologien zurückgreifen. Für eine intelligente Steuerung sind diese

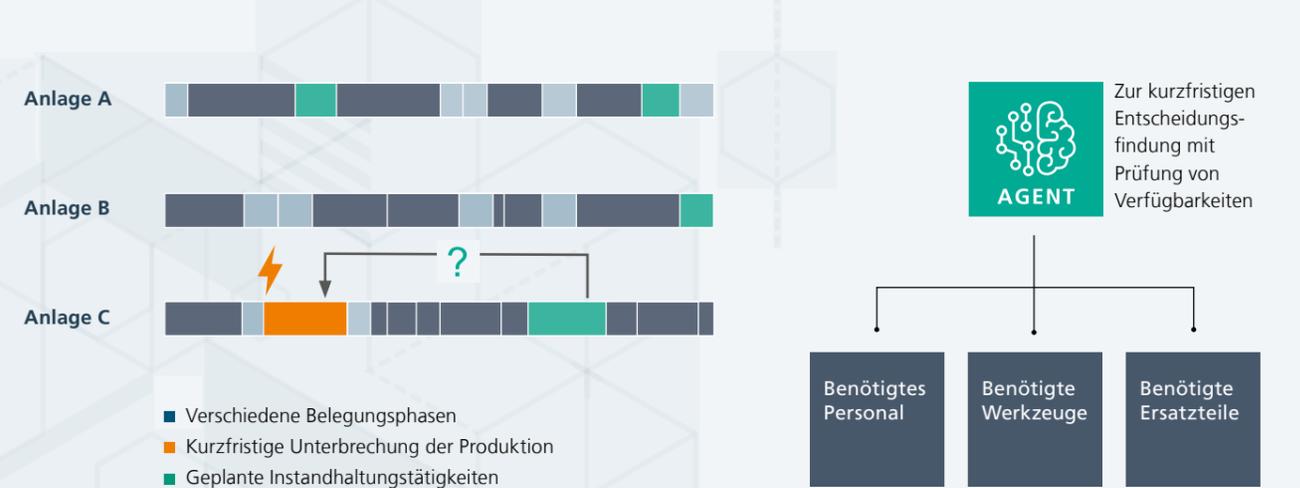
Prozessmodule darüber hinaus definiert durch Prozess-, Produkt-, Ressourcen- und Technologiefähigkeits-Eigenschaften. Je nach Konfigurierbarkeit erhält die Matrix sowie die intelligente Instandhaltung eine begrenzte Anzahl an möglichen Alternativen zur Auswahl. Die dadurch erreichte Flexibilität der Produktionszellen ermöglicht es zudem, auf kleinstem Raum eine Vielzahl an technologischen Fähigkeiten abzubilden. Bei Pannen oder Unterbrechungen beschleunigen solche rekonfigurierbaren Produktionszellen den Anlauf neuer, alternativer Produkte. Darüber hinaus ist eine Skalierbarkeit auf andere Losgrößen mit vergleichsweise kurzer Anlaufzeit möglich. Bei der Auslegung solcher rekonfigurierbaren Produktionszellen unterstützen Simulationssysteme dabei, Auswirkungen der Produktionszellen auf das Gesamtsystem zu antizipieren und in einer frühen Produktionsphase zu bewerten.

Adaptive Prozessketten erweitern die Flexibilität resilienter Produktionssysteme um eine weitere Dimension auf Technologieebene. Fallen eine Anlage oder ein Prozessmodul aus, dann ermittelt das Management auf Technologiebasis eine Alternative. Hierfür sind ausgehend vom Bauteil und dessen Anforderungen alternative Prozesskettenvarianten abzuleiten und zu bewerten. Ähnlich wie in der Matrixproduktion wählen die Verantwortlichen auch hier die Optimierungsziele. Voraussetzung für den Einsatz von adaptiven Prozessketten sind ein hohes Prozessverständnis und zu Prognosen fähige Technologien, um diese im Kontext von Adaptivität und Agilität als Werkzeuge für ein resilientes Produktionssystem zur Verfügung stellen zu können. Durch die Kopplung von modell- mit datenbasierten Methoden ist es möglich, eine Prognosefähigkeit der Technologien so zu erhöhen, dass valide Aussagen für die Prozesskettenplanung ableitbar werden.

Skizzierung auftragspezifischer Routen durch eine Matrixproduktion



Skizzierung des Agenten für kurzfristige Instandhaltungsentscheidungen



Der Weg zur notwendigen Datenbasis

Für eine resiliente Instandhaltungsplanung von Anlagen müssen aussagefähige Daten über den aktuellen Zustand vorliegen. Zunächst müssen die Verantwortlichen vorhandene Daten erfassen und auf ihre Eignung als resilienzrelevante Zustandsparameter evaluieren. Oftmals sind nicht genug Daten für aussagefähige Prognosen vorhanden. Geeignete kognitive Sensorsysteme schließen diese Lücke. Sie werden nicht mehr nur manuell von Fachpersonal eingerichtet und justiert, sondern vielmehr selbst aus ihren hochdimensionalen Datenströmen, also Datenströmen mit mehr als 100 Dimensionen, beispielsweise bezüglich Mensch, Produkt, Ort und Zeit. Auf diese Weise passen sie sich autonom an sich ändernde Zustände an. Das Generieren höherwertiger Zustandskenngrößen zur Klassifizierung von Betriebszuständen aus diffusen Eingangsmesswerten erfolgt dabei in zwei Stufen. Neben der ersten direkten und schnellen Analyse der Daten im Sensorsystem (Edge-Computing) liefern analytische sowie kognitive Auswertungen auf hoch performanten Servern weitere höherwertige Zustandskenngrößen. Die so gewonnenen aktuellen Zustandsinformationen bilden die Grundlage der Maschinen- und Komponentenüberwachung der Instandhaltungsplanung.

Methode für ein resilientes Risikomanagement

Um die Realität sukzessiv an die Vision einer instandhaltungsfreien Fabrik anzunähern, führt das Management im Rahmen der entwickelten Risikomanagementmethode eine Bewertung der Resilienz von Produktionsanlagen und Produktionssystemen durch und kann so mithilfe eines Methodenbaukastens gezielt Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz treffen. Dies wird durch verminderte Ausfallzeiten und eine erhöhte Robustheit gegen interne sowie externe Schock- und Stressfaktoren ermöglicht. Dadurch ergibt sich neben einer Erhöhung der Resilienz parallel eine verbesserte Effizienz.

Die Resilienzbewertung erfolgt zunächst mittels eines auf unterschiedliche Bereiche (Anlagenbetreiber, -hersteller oder externe Service-Techniker) angepassten Fragebogens. Dabei werden verschiedene potenzielle Gefahrenquellen hinsichtlich ihrer Bedeutung für das Produktionssystem, der Art der Stressfaktoren sowie der Art des Auftretens bewertet. Daneben fließen unterschiedliche Dimensionen wie Mensch, Maschine, Anlagendesign, Umwelt, Inbetriebnahme, Konnektivität oder Ersatzteilversorgung ein. Im Anschluss werden die Resilienz-Schlüsselfähigkeiten mittels einer Resilienzmatrix identifiziert.

Die Quadranten dieser Matrix teilen sich in »Widerstandsfähigkeit«, »Improvisationsfähigkeit«, »Anpassungsfähigkeit« sowie »Innovationsfähigkeit«. In den kritischen Quadranten können nun mittels eines an die individuellen Anforderungen des Produktionssystems angepassten Methodenbaukastens die Fähigkeiten zur Resilienzsteigerung aktiv gefördert werden. Die Methoden umfassen dabei beispielsweise die Risikobewertung auf Basis von Wahrscheinlichkeiten oder das Risikomanagement sowie risikosenkende Maßnahmen zur Erfüllung der Anforderungen der Resilienz.

Der Mehrwert der entwickelten Methoden spiegelt sich in der Steigerung der Resilienz von Produktionsanlagen und Produktionssystemen im Bereich der Instandhaltung wider, basierend auf einer transparenten Bewertungslogik sowie einem fundierten Methodenkasten.

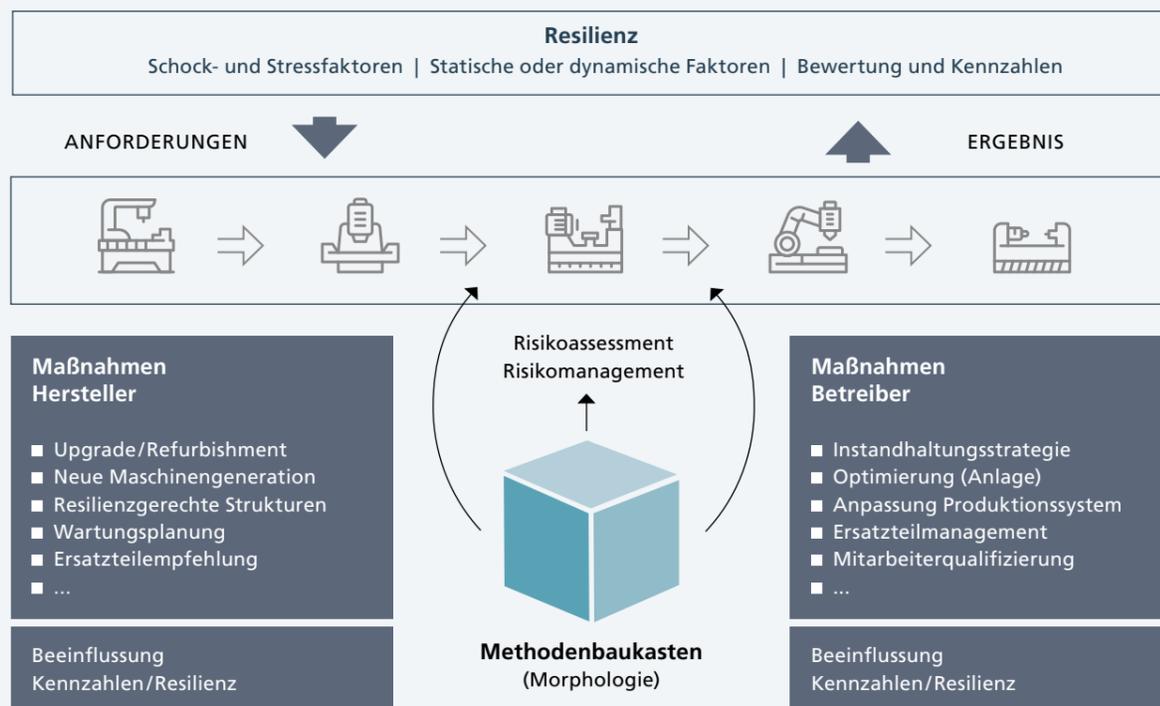
Werkzeuge für ein resilientes Risikomanagement

Für Unternehmen, die auf dem Weg in die resiliente Instandhaltung KI-gestützte Verfahren und Cloud-Lösungen einsetzen möchten, stehen ein detailliertes Vorgehensmodell und ein

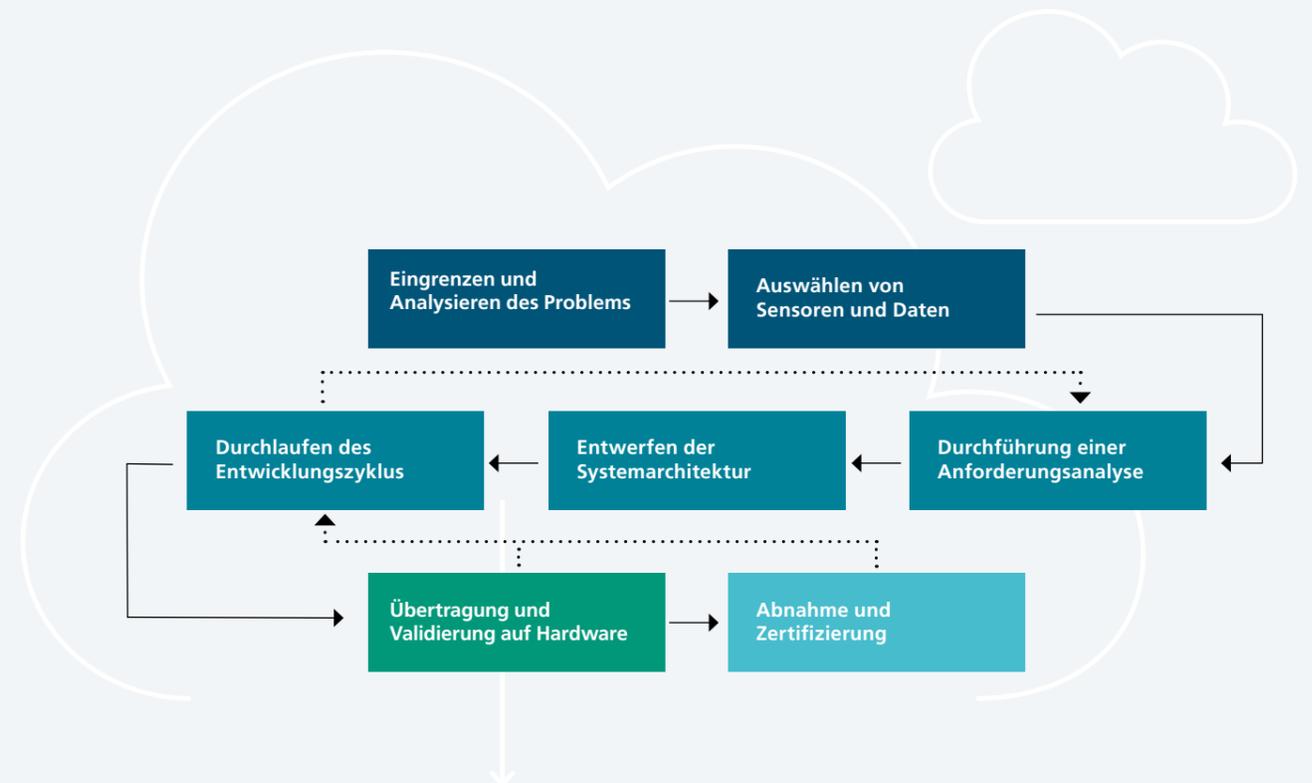
Template zur Beschreibung entsprechender Use Cases zur Verfügung. Beides wurde als Webanwendung entwickelt. Das Vorgehensmodell bietet in sieben Schritten, von der Problemanalyse sowie der Daten- und Sensorikauswahl über Entwicklungsschritte bis zur Abnahme und Zertifizierung, detaillierte Erläuterungen für die Implementierung.

Das Template »Use-Case« bietet darüber hinaus die Möglichkeit, anhand von Fragen und Erläuterungen einen möglichen cloudbasierten Use Case in der Instandhaltung systematisch zu beschreiben. Es unterstützt sowohl die frühe Phase der Ideenfindung solcher Use Cases als auch die Dokumentation bereits implementierter Anwendungen. Diese dienen dann als Input für den Aufbau einer Datenbank zur Sammlung von Use Cases. Je nach Umsetzungsstand stellt das Tool dem Nutzer detaillierte Fragen. Die Beantwortung dieser Fragen soll ihn an die Berücksichtigung aller notwendigen Umsetzungsschritte erinnern und so als Basis einer systematischen Entwicklung dienen.

Maßnahmen eines resilienten Risikomanagements

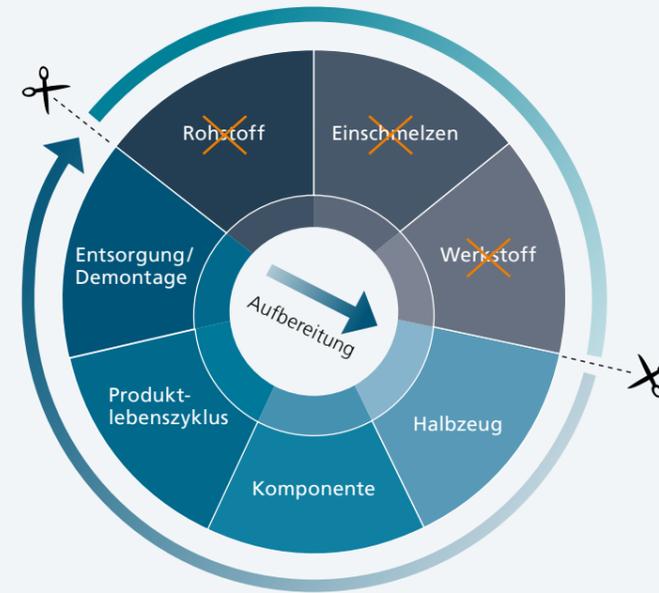


Vorgehensmodell zur Entwicklung eines intelligenten Cloud-Service





Simulation → Voxelauflösung → Voxelherstellung → Formzusammenbau → Abguss → Gussteil



Antriebswelle

oben: Beispielhafte Darstellung einer alternativen Produktion mittels Voxelguss.

Produktionstechnologien

Mithilfe von Produktionstechnologien werden aus materiellen Ressourcen und Energie Bauteile, Komponenten und Produkte gefertigt. Sind die ursprünglich geplanten Ressourcen und Energieträger nicht verfügbar, gibt es Störungen in der Wertschöpfungskette. Anhand von ausgewählten, praxisnahen Beispielen werden alternative Technologien vorgestellt, die als Notfallstrategien genutzt werden können und im Sinne von Prepare und »by Design« am Produkt und/oder in der Produktion angewendet werden.

Große und hochkomplexe Gussbauteile beispielsweise für den Maschinen- und Anlagenbau werden in global vernetzten Wertschöpfungs-systemen gefertigt und just in time geliefert. Eine schnelle Ausweichproduktion ist kaum möglich, da die Werkzeugfertigung in der Regel mehr als 6 Monate dauert. Der **Voxelguss** bietet hier einen alternativen Ansatz. Die Gussform wird dabei automatisch in Quader, sogenannte Voxel, aufgeteilt und werkzeuglos mittels der indirekten Additiven Fertigung im Binder-Jetting-Verfahren hergestellt. Je nach aktuell verfügbaren Kapazitäten kann die Fertigung verteilt und somit parallel erfolgen. Die gedruckten Voxel werden an eine lokale Gießerei geliefert und zusammengefügt. Nach dem Abguss und der

Rohteilbearbeitung kann das Bauteil in den bestehenden Fertigungsprozess integriert werden. Der zeitliche Aufwand zur Bauteilbeschaffung beträgt dabei maximal eine Woche.

Die Halbzeugbereitstellung kann bei Störungen für **umformtechnische Prozessketten** eminent wichtig sein. Alternativ lassen sich hier Halbzeuge aus ähnlichen Werkstoffen oder **hybriden Halbzeugen** sowie **Sekundärhalbzeugen** einsetzen. So läuft die Produktion weiter. Als Sekundärhalbzeuge werden nach dem reProd®-Ansatz Halbzeuge bezeichnet, welche aus gebrauchten Produkten gewonnen werden. Dabei ist jedoch zu prüfen, inwiefern aus den alternativen Halbzeugen das geplante Produkt mit den gewünschten Eigenschaften hergestellt werden kann und ob die verfügbaren Betriebsmittel, insbesondere Pressen und Werkzeuge, dafür geeignet sind. Möglicherweise sind zusätzliche und/oder andere Prozessschritte erforderlich. Als »Enabler« für die Auswahl- und Engineeringprozesse bieten sich digitale Modelle, digitale Schatten und Digitale Zwillinge sowohl vom Produkt als auch von den Produktionsprozessen an. Weiterhin ist eine virtuelle Freigabe von Produkt und Prozessen durch den Kunden vorstellbar und zumeist sogar notwendig. Auf diese Weise können etwa gebrauchte Antriebswellen als Sekundärhalbzeuge zu hochfesten Schrauben umgeformt werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt bei der Betrachtung von Resilienz auf der Ebene von Produktionstechnologien ist die Versorgung mit Energieträgern bzw. Reduktionsmitteln. Eine bedeutende Alternative zur Erhöhung der Resilienz bietet beispielsweise der Wechsel von fossilem Koks zu **biogen-stämmigem Kohlenstoff**, sprich **TCR-Koks**. Mit dem TCR-Verfahren können Gärreste, Klärschlamm oder Stoffe aus der »Grünen Tonne« bei 500 °C bis 750 °C zu Karbonisat umgesetzt werden. Neben der Reduzierung der Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen leistet dies auch einen Beitrag zur CO₂-neutralen Produktion.

Fraunhofer-Verbund Produktion

Weitere Lösungsbausteine des Fraunhofer-Verbunds Produktion für eine Resiliente Wertschöpfung in den drei Anwendungsbereichen Strategie- und Prozessmanagementsysteme, Produktionssysteme und Produktionstechnologien werden auf der RESYST-Website zur Verfügung gestellt.

www.produktion.fraunhofer.de/de/forschung-im-verbund/zukunftsthemen/RESYST.html



oben: Produktionsprozesse neu denken: Entscheidungsschemata (links) sowie virtuelle und reale Prozessfolge (rechts).



In Krisen stellen resiliente Wertschöpfungssysteme die Aufrechterhaltung der wertschöpfenden und wirtschaftlichen Betriebsfähigkeit sicher.«

Prof. Dr.-Ing. Welf-Guntram Drossel
Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Fraunhofer-Verbund Produktion

5 Case Studies: Was man heute schon von den Besten lernen kann

ZF Friedrichshafen AG: Fertigungstransparenz aus dem Supermarkt

Die Produktionsplanung und -steuerung in der Einzel- und Kleinserienfertigung unterliegt durch die hohe Varianz im Bauteilspektrum einer starken Dynamik. Für eine hohe Flexibilität und Adaptivität der Produktionssteuerung ist es daher wichtig, zu jeder Zeit die richtigen Informationen am richtigen Ort zur Verfügung zu stellen. Vor allem bei Störungen oder Änderungen im Produktionssystem muss gewährleistet sein, dass alle beteiligten Systeme und Mitarbeiter schnellstmöglich reagieren können, damit die Produktion nicht unterbrochen wird. Betrachtet man jedoch den Großteil der Einzel- und Kleinserienfertigungen des Maschinen-, Anlagen- und Werkzeugbaus, dann wird trotz vieler digitaler Lösungen immer noch Papier eingesetzt, um Informationen zu einem Bauteil bereitzustellen, beispielsweise Arbeitspläne. Papier weist neben hohen Druckkosten noch zwei weitere Nachteile auf, nämlich mangelnde Aktualität und fehlende Lokalisierung. Konkret bedeutet das: Wird ein Auftrag geändert, müssen alle Komponenten dieses Auftrags in der Fertigung lokalisiert und die entsprechenden Papiere ausgetauscht werden. Das zieht einen erheblichen

personellen und zeitlichen Aufwand nach sich. Besonders im Werkzeug- und Formenbau herrscht eine hohe Dynamik bei den Fertigungsprozessen, ausgelöst durch sowohl interne als auch externe Störeinflüsse. Hier kann die Steuerung von Aufträgen zur Sisyphusaufgabe werden.

Die Lösung für diese Herausforderungen fand der Werkzeugbau der ZF Friedrichshafen AG am Standort Schweinfurt im wahrsten Sinne des Wortes im Supermarkt. In vielen Supermärkten kommen seit geraumer Zeit sogenannte **ESL-Tags** (Electronic Shelf Labels), kleine kabellose Bildschirme, zum Einsatz, um die Preise direkt aus der Artikeldatenbank zu aktualisieren, beispielsweise bei Rabattaktionen. Diese Funktion hat sich der ZF Werkzeugbau zunutze gemacht und kann nun alle Informationen aus einem selbst entwickelten SAP-Planungsmodul zum Bauteil, inkl. QR Code, auf einem ESL-Tag anzeigen. Bei Änderungen, z. B. aufgrund von Umpriorisierungen oder Anpassungen der Bearbeitungsreihenfolge, werden die Daten auf den ESL-Tags unverzüglich aktualisiert, sodass jedem Mitarbeitenden die Infos quasi in Echtzeit zur Verfügung stehen. Zusätzlich ist über den Access Point des ESL-Tags eine Lokalisierung des Bauteils innerhalb der Fertigung möglich. Lässt man

das ESL-Tag nun noch aufblinken, dann ist ein Bauteil innerhalb von wenigen Augenblicken auffindbar. Gerd Ringelmann, Produktionsleiter im Werkzeugbau des Unternehmens, sagt: »Zu Beginn der COVID-19-Pandemie mussten wir ca. 1000 Bauteile gleichzeitig von hold« setzen. Mithilfe der ESL-Tags war der Vorgang in wenigen Minuten erledigt. Stellen Sie sich mal vor, ein Mitarbeiter hätte alle Bauteile suchen und manuell markieren müssen. Das hätte Tage oder sogar Wochen gedauert.« Das Beispiel der ESL-Tags zeigt ebenfalls, dass solche innovativen Lösungen nicht immer teuer sein müssen. Die Anschaffung von 2500 ESL-Tags am Standort Schweinfurt hatte sich allein durch den Wegfall des benötigten Papiers innerhalb eines Jahres amortisiert.

ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH: Virtuelle Inbetriebnahme mittels eines Digitalen Zwillinges

Sogenannte Digitale Zwillinge werden von Maschinen- und Anlagenbauern heute schon vielfach genutzt, um hochkomplexe Produktionsmaschinen und -anlagen bei deren Entwicklung virtuell zu planen und zu optimieren. Digitale Zwillinge können auch eingesetzt werden, um die Anlagentechnik für die Durchführung von Fertigungsprozessen zu entwickeln, auszulegen und die Steuerungssysteme noch vor der erfolgten Realisierung zu entwerfen und in Betrieb zu nehmen. Für eine solche virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) sind Modelle der Maschinen und Anlagen zu entwickeln, die hinsichtlich ihrer Schnittstellen, Parameter und Betriebsarten dem realen Pendant entsprechen. Mithilfe solcher virtuellen Systeme können die zuständigen Mitarbeitenden realistische Test- und Inbetriebnahme-Situationen inkl. der notwendigen Steuerungsfunktionen nachstellen und dadurch das Steuerungssystem am **Digitalen Zwilling** genauso wie an der realen Maschine betreiben und untersuchen.

Die virtuelle Inbetriebnahme leistet einen wichtigen Beitrag zur Steigerung der Resilienz von Produktionssystemen. Diese Steigerung setzt neben dem frühzeitigen Erkennen innerer und äußerer Störereignisse auch die Fähigkeit voraus, **flexibel** auf diese Störungen zu reagieren. So ist es notwendig, beim Ausfall eines Fertigungsmittels in der

Produktion eine geeignete Ausweichvariante zu finden und zu prüfen. Neben der qualitativ gleichwertigen Fertigung von Produkten können dabei beispielsweise auch terminliche Randbedingungen oder geänderte Eingangsmaterialien als Zielstellung gegeben sein, die wiederum zu Änderungen der Produktionsabläufe führen. Die dafür nötige **Adaption** des Produktionssystems muss geplant und auf ihre Umsetzbarkeit hin untersucht werden. Ist der Maschinenpark beispielsweise eines Komponentenherstellers virtualisiert, dann können zur Realisierung Digitaler Zwillinge für den vollständigen Lebenszyklus einer Produktionsanlage beispielweise mit der Software »ISG-virtuos« Maschinen und Anlagen aus einer Bibliothek zusammengestellt werden. Mit diesem Baukastensystem stellt man bei sich verändernden Randbedingungen schnell neue Konfigurationen für Fertigungssysteme und Anlagen bis hin zu ganzen Werkhallen zusammen. Im Sinne der **Antizipation** hilft ein solcher Konfigurator ebenfalls dabei, Ereignisse wie den Ausfall von Fertigungsmitteln zu simulieren, die Reaktionen darauf passgenau zu planen und an der virtuellen Repräsentanz zu validieren. So kann das Management im Falle einer Krise oder Störung wesentlich schneller reagieren, was wiederum die Ausfallzeiten der Produktionssysteme verkürzt.

Bis zu zwei Drittel der Steuerungssoftware von fertigungstechnischen Systemen dienen heute der Fehlererkennung und -behandlung. Die Prüfung der dafür eingesetzten Methoden erfolgt bei konventioneller Anlagenentwicklung erst nach Realisierung der Hardware. Erst dann können entsprechende Fehler provoziert und die Reaktion der Steuerung validiert werden. Zudem können Fehler, die zur Beeinträchtigung der Maschinenbediener, der Maschinenumgebung oder auch zur Beschädigung oder gar Zerstörung der Anlage führen, am realen System nicht überprüft werden. Am Digitalen Zwilling hingegen ist es bereits in einer frühen Phase der Anlagenentwicklung, und zwar schon vor der Realisierung, möglich, diese Fehlerbilder zu untersuchen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse fließen sowohl in die Entwicklung der Anlagenkomponenten als auch des Steuerungssystems ein. Damit wird die Robustheit von Systemen schon bei der Entwicklung verbessert.



1 ESL-Tags (Electronic Shelf Labels) sind kleine kabellose Bildschirme.



2 Reale Roboterzelle.

3 Digitaler Zwilling der Roboterzelle.

4 Aus Baukastensystem zusammengestellte virtuelle Fertigungszelle.

Die Blockchain-Technologie ermöglicht die Digitalisierung der gesamten Supply Chain. So wird sie transparent, effizient und bietet den Unternehmen Rechtssicherheit.

Händler PIEL: Flexible und aufwandsarme Integration neuer Partner ins Informationsnetzwerk

Der technische Händler PIEL stand vor der Herausforderung, Kunden und Lieferanten möglichst schnell und aufwandsarm in sein Informationsnetzwerk der Supply Chain zu integrieren. Insbesondere in Situationen, die ein schnelles Handeln durch unmittelbare Anpassung der Supply Chain erfordern, ist diese Herausforderung von existenzieller Bedeutung für das Unternehmen. Kunden und Lieferanten setzen häufig unterschiedliche IT-Systeme mit nicht kompatiblen Datenaustauschformaten ein. Der konventionelle Aufwand zur systemischen Integration eines Kunden oder eines Lieferanten ins Informationsnetzwerk von PIEL, welcher schwerpunktmäßig C-Teile, also Teile mit einem geringen Wert und hoher Beschaffungsmenge, vertreibt, übersteigt dabei häufig den Wert des jährlichen Beschaffungsvolumens eines Kunden oder eines Lieferanten. Ähnliches gilt oftmals für die Prozesskosten, die durch Nachfragen zum aktuellen Bestellstatus entstehen. Auch diese Kosten übersteigen teilweise den Auftragswert einer einzelnen Bestellung.

Um generell und auch in kritischen Situationen lieferfähig zu bleiben und die Integration von Kunden und Lieferanten ins Informationsnetzwerk flexibel und effizient zu gestalten, wurde gemeinsam mit Fraunhofer eine entsprechende Lösung entwickelt. Der Informationsaustausch mit Kunden und Lieferanten erfolgt hierbei über eine zentrale Schnittstelle in einem zweistufigen sogenannten Mappingverfahren. Hierfür werden im ersten Schritt die auszutauschenden Informationen in ein Standardformat konvertiert und danach in das gewünschte Zielformat übersetzt. Sind neue Unternehmen ins Informationsnetzwerk zu integrieren, so muss nur noch eine Mappingschnittstelle im Standardformat geschaffen werden. Ist die Schnittstellenkombination bekannt, können hierfür Synergieeffekte genutzt werden. Eine Blockchain stellt aufgrund ihrer systemischen Basisstruktur die Manipulationssicherheit des Datentransfers zwischen den Unternehmen und dem Mappingverfahren bzw. auch umgekehrt sicher. Somit lassen sich alle Veränderungen

während des gesamten Prozesses eindeutig nachvollziehen. Das Mapping kann sowohl außerhalb einer Blockchain, z. B. in Form einer Dienstleistung (Plattformökonomie), als auch innerhalb der Blockchain (mittels sogenannter SmartContracts) erfolgen. Eine Skalierbarkeit und ein Transfer in weitere Anwendungsfälle sind dadurch ebenfalls möglich.

Im Ergebnis zeigte sich, dass die vereinfachte Integration von Partnern ins Informationsnetzwerk von PIEL zum einen die Flexibilität erhöht und zum anderen die hierfür entstehenden Kosten reduziert. Die Integrationsmöglichkeit schafft so insbesondere in unternehmenskritischen Situationen eine schnelle und flexible Adaption der Supply Chain (Prevent und Respond). Auf das Gesamtsystem bezogen ergibt sich darüber hinaus eine größere Robustheit in kritischen Situationen (Protect). In Verbindung mit reduzierten Prozesskosten führt dies zu einer umfangreichen Steigerung der Resilienz des technischen Händlers PIEL.

Technologie für Informationsaustausch in der Instandhaltung

Eine große Aufgabe in Krisenzeiten ist es, die Instandhaltung im eigenen Betrieb zu entlasten und parallel bei starken Schwankungen reaktionsfähig zu bleiben sowie robuste Kooperationen mit Komponentenherstellern oder verschiedenen Service-Anbietern zu forcieren. Bei einer Pilotumsetzung mit ausgewählten Partnern entstanden jedoch diesbezüglich zwei große Herausforderungen: Zum einen war die Koordination der Aufträge zwischen den Anbietern sehr aufwendig. Zum anderen war die Informationsbereitstellung für die Auftragnehmer sowie die Dokumentation äußerst problematisch. Insbesondere die Frage, welche Daten an Partner in den jeweiligen Situationen und in welcher Form weitergegeben werden sollten, stellte das Unternehmen vor Schwierigkeiten. Diese führten dazu, dass bei fast jedem Instandhaltungsauftrag ein Mitarbeiter einen externen Dienstleister begleiten musste. Das Resultat entsprach weder den gesetzten Resilienz- noch den Effizienzzielen.

Eine transparente und eindeutige Informationsweitergabe sowie die Dokumentation der Maßnahmen und auch das Controlling

der Tätigkeiten konnte durch eine informationstechnische Lösung realisiert werden. Die IT-Lösung leitete die Aufträge an den richtigen Partner automatisiert weiter und versorgte ihn mit den passenden Informationen. Der geschützte Informationstransfer reduzierte den manuellen Arbeitsaufwand und beschleunigte die gesamte Abwicklung. Es wurde eindeutig definiert, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt weiterzugeben sind und wie ein manipulationssicherer Transfer sicherzustellen ist, um eine valide Geschäftsgrundlage zu schaffen, und es wurde ein Dokumentationsstandard erarbeitet. Dieser legt fest, welche Informationen erfasst und an den Auftraggeber zurückgespielt werden und wie die durchgeführten Leistungen zu dokumentieren sind. Gleichfalls wurde das Netzwerk an Partnern mithilfe von Standards möglichst flexibel gehalten und aufwandsarm angepasst.

Das von Fraunhofer erarbeitete Lösungskonzept beinhaltet ein Vorgehensmodell sowie mehrere Bewertungsmethoden. Damit können die Verantwortlichen die technische Realisierung, die ökonomischen und strategischen Vorteile sowie auch die Auswirkungen auf die Resilienzfähigkeit begutachten. Die Verwendung einer Blockchain wurde bei diesem Anwendungsfall als sinnvoll erachtet. Notwendige Prozessanpassungen, zu automatisierenden Prozessschritten, Aufgaben der Blockchain und die notwendigen SmartContracts wurden in einzelnen Workshops systematisch erarbeitet. Darauf aufbauend wurde die geeignete Blockchain-Technologie ausgewählt und die Implementierungsreihenfolge festgelegt.

Auf Basis des Vorgehensmodells sowie der Bewertungsmethoden entstand schließlich die erforderliche Blockchain. Jedem Partner stehen nun somit aufgabenbezogen die notwendigen Informationen als manipulations-sichere (Vertrauens-)Basis zur Verfügung. Die SmartContracts steuern den standardisierten und verbindlichen Ablauf jeglicher Aufgaben innerhalb der Kooperation. Die Lösung führte zu einer deutlichen Steigerung sowohl der Adaptivität als auch der Robustheit und damit zu einer erhöhten Resilienz.



Gemeinsam mit PIEL hat das Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML ein Forschungsprojekt gestartet, um auch in kritischen Situationen lieferfähig zu bleiben





Für den Erfolg von resilienten Wertschöpfungsketten sind darauf abgestimmte Planungsprozesse essenziell.«

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV



6 Forschungsbedarf

Der Forschungsbedarf in Bezug auf Resilienz in Wertschöpfungs-systemen ist in drei Ebenen gegliedert:

- Resilienzmanagement, -strategien und Infrastrukturen
- Planung und Betrieb resilienter Produktionsprozesse
- Ressourceneffiziente Produktionsverfahren zur Resilienzsteigerung

Resilienzmanagement, -strategien und Infrastrukturen

Dynamisierte Strategien und Geschäftsmodelle

Die bestehenden Modelle zur Gestaltung, Umsetzung sowie kontinuierlichen Verbesserung der Strategien unterstützen das Management bereits heute mit risikoorientierten Bewertungsmethoden oder klassifizierten Handlungsfeldern, beispielweise gemäß ISO 22316. In einer immer komplexeren Geschäftswelt sind jedoch Lösungen gefragt, mit denen Resilienz in die Strategien und Geschäftsmodelle integriert statt nur hinzugefügt wird. Die dafür zu erforschenden Methoden müssen einerseits die Dynamik entlang der Resilienzphasen von Prepare bis Recover und andererseits die Abhängigkeiten der Handlungsfelder untereinander berücksichtigen, z. B. in einem System Dynamics Model. Dadurch werden Zielkonflikte, etwa zwischen Agilität und Vorratsbildung, beschreibbar, bewertbar und damit auch operationalisierbar. Das Strategiedefizit hinsichtlich des gemeinsamen Zielsystems und dessen Kommunikation löst sich auf.

Adaptives Prozessmanagement und Werkzeuge

Die Gestaltung und Umsetzung adaptiver Prozesse ist auch unabhängig von Krisen ein ständiges Ziel, das mithilfe einzelner Methoden und Werkzeuge wie Process Mining partiell auch heute schon unterstützt wird. Für ein hinreichendes Management von Prozessen im Kontinuum von Normal- und Krisenmodus sind zunächst **prozessbezogene Resilienz-kriterien** erforderlich, die für das Überleben des Unternehmens ausschlaggebend sind. Diese Kriterien müssen sowohl die Spezifika entlang der **Resilienzphasen als auch die Vernetzung der Prozesse untereinander reflektieren**. Damit wird eine Bewertung von Einflüssen und Auswirkungen verschiedener, sich auch überlagernder Ereignisse aus Unternehmenssicht erst machbar. Dafür sind Matching-Methoden zu entwickeln, mit denen Informationen zu äußeren Events sicher auf die prozessbezogenen Resilienz-kriterien appliziert werden können.

Die Corona-Pandemie zeigt jedoch noch ein weiteres Defizit im Prozessmanagement auf: die mangelnde Fähigkeit, die **Balance zu halten zwischen Agilität und Flexibilität** (wie schnell können Unternehmen ihre **Produktion** umstellen) einerseits und **effizienter, sicherer und ressourcenschonender Routine** andererseits. Dazu sind Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die beide Erfordernisse erfüllen. Insbesondere beim Umgang mit unvorhergesehenen Ereignissen müssen Lösungen etabliert werden, die es möglich machen, allein auf Basis von Randbedingungen wie sich ändernden Produkteigenschaften, Fähigkeiten und Erfahrungen **krisentaugliche Prozesse automatisiert zu erzeugen** und zu operationalisieren – und dies, ohne das bestehende Prozessnetz zu stören.

Das Thema ist enorm komplex. Deshalb sollten Referenzmodelle und integrierte Standardbausteine den Unternehmen beim Aufbau und Betrieb ihres Prozessmanagements helfen. Hierfür müssen Regeln formuliert werden, welche die Gestaltung von Systeminfrastrukturen (z. B. Informationstechnik) für die dynamische Prozessanpassung unterstützen.

Dynamisches Matching von Kompetenzen, Services und Materialien entlang der Wertschöpfungskette

Für die schnelle Vernetzung von Produkten und Services, z. B. beim Ausfall eines Partners, sind Entwicklungen auf mehreren Ebenen notwendig. Die Matching-Algorithmen müssen, bezogen auf ihre **Aggregation und Genauigkeit, adaptierbar** so entwickelt werden, dass weder keine noch zu viele irrelevante Matches entstehen. Die **Rückführung der Erfahrungen** in das Matching ist so zu gestalten, dass in Zukunft keine Fehler auftreten. Im Ereignisfall muss es schnell gehen, dazu sind **teilautomatisierte Verhandlungs- und Synchronisationsmechanismen** im Wertschöpfungsnetzwerk erforderlich. Das Matching muss über die Verfahrens- und die Serviceebene vor allem die notwendigen Ressourcen berücksichtigen. Dazu sind digitale Schnittstellen sowie gemeinsame Kommunikationsstandards zwischen dem Primär- und Sekundärrohstoffsektor auf eine Weise zu konzipieren, dass beim Ausfall eines Sektors ein nahtloser und in Bezug auf den gesamten Produktlebenszyklus transparenter Übergang gewährleistet ist. Mithilfe von **Matching-Algorithmen zur Substituierbarkeit von Rohstoffen mit Rezyklaten** können Unternehmen im Krisenfall schnell auf selbstautonome Prozesse umstellen.

Resilientes Infrastrukturmanagement

Unvorhergesehene Events betreffen oft Infrastrukturen in ihrer Vernetzung. Hier muss es eine dazu vernetzte Bestandssicht geben, die schnelle und sichere Entscheidungen ermöglicht, z. B. über die Belastbarkeit der Fundamente oder die Versorgungstechnik zum Hinzufügen von Maschinen und Anlagen. Dazu sollten die Konzepte des **Building Information Modeling (BIM)** um Aspekte der Fabrikplanung erweitert werden. Dies ermöglicht einerseits die gemeinsame Bewertung von Risiken aus Produktions- und Gebäudesicht sowie andererseits abgesicherte Ad-hoc-Entscheidungen. Ähnliches gilt auch für die Informationstechnik. **IT-Bedrohungsanalysen müssen den Einfluss auf die Produktivität** auf eine Weise berücksichtigen, die es erlaubt, dass im Falle von Einschränkungen sowohl Produktionsszenarien vorab entwickelt und getestet werden können als auch der Austausch von IT-Prozessen oder Systemkomponenten während der Protect- und Response-Phase rasch erfolgt. Kritische Wertschöpfungsbestandteile dürfen dabei nicht beeinträchtigt werden.

Robuste Logistik

Der Betrieb von Liefer- und Produktionsnetzwerken erfordert auch schon im Normalmodus ein erhebliches Maß an »Bricolage«, da Einschränkungen und Ausfälle bereits an der Tagesordnung sind. Es fehlen jedoch **Resilienzindikatoren**, mit denen die Robustheit eines Netzwerks bewertet und optimiert werden kann. **Standardisierte Gestaltungs- und Reorganisationskonzepte** in Form von parametrisierbaren Referenzmodellen würden gerade den hochvernetzten Unternehmen in Deutschland helfen, in Krisenfällen die Liefer- und Handlungsfähigkeit zu schützen.

Planung und Betrieb resilienter Produktionsprozesse

Für die Beherrschung der hohen Komplexität und Dynamik der Produktionsprozesse im Rahmen resilienter Produktionssysteme ist Forschungsbedarf angezeigt. Die Potenziale der Matrixproduktion erfordern neben Konzepten für die Produktionssteuerung auch Konzepte zur dynamischen Versorgung und Materialbereitstellung. Besonders für kurzfristig auftretende Materialengpässe sind im Sinne der reaktiven Resilienzstrategien für einen effizienten Umgang in der Matrixproduktion gefragt. Darauf aufbauend ist die Zuweisung von Strategien für die Materialbereitstellung differenziert nach verschiedenen Materialien zu untersuchen. Neben der Steuerung der Matrix muss auch die Rekonfigurierbarkeit von Fertigungssystemen auf Prozess-, Technologie- und Layoutebene weiter untersucht und erforscht werden. Für die mehrdimensionale Steigerung der Komplexität der Steuerung innerhalb der Matrixproduktion sind geeignete KI-gestützte Verfahren zu

entwickeln – auch dies ist also ein wichtiges Thema für die Forschung.

In Bezug auf die Transformation industrieller Produktionssysteme in eine Matrix ist die Entwicklung einer ökonomischen Nutzenbewertung der Matrixproduktion notwendig, um einen Vergleich mit konventionellen Fertigungssystemen anstellen zu können.

Zusätzlicher Forschungsbedarf ergibt sich auf der Anlagenebene. Dabei muss insbesondere die Auslegung von Anlagenkonfigurationen zur Reduzierung der Aufwände bei der Umsetzung von Rekonfigurationsstrategien untersucht werden. Algorithmen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz versprechen die Vielzahl an Einflussfaktoren beherrschbar zu machen. Die Verbindung solcher KI-basierten Methoden sowie der virtuellen Inbetriebnahme kann bei der Auslegung von Roboter- und Fertigungszellen sowie bei der Planung von Anlagenkonfigurationen zu deutlich kürzeren Anläufen in der Fertigung führen.

Auch auf der Ebene der Prozesskette gibt es für Forschende noch viel zu tun. Im Fokus stehen hier die Prognosefähigkeit der Fertigungstechnologien in der Einzel- und Kleinserienfertigung sowie die Vorhersagbarkeit von manuellen Eingriffen. Besonders die Prognostizierbarkeit der Fertigungszeit von komplexen 3D-Freiformflächen reicht zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht aus, um die Adaptivität in der Industrie praxisnah zu realisieren. Die vielen mehrdimensionalen Optimierungsprobleme in den einzelnen Ebenen eines Produktionssystems ist in diesem Zusammenhang ein mögliches Einsatzfeld künftiger Quantencomputer, die alle Ebenen miteinander verbinden.

Die Instandhaltung liefert bei der Schaffung von resilienten Produktionssystemen einen entscheidenden Beitrag sowohl im Bereich der Technologien als auch der Organisation. Basierend auf den ersten Ergebnissen muss zunächst eine geeignete **Methode zur Ermittlung des unternehmensspezifischen Resilienz-Soll-Zustands** zum Einsatz kommen. Dafür ist eine Verknüpfung zwischen der Resilienzsteigerung und dem wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert erforderlich. Das Wissen um den Zustand der Produktionsanlagen, wie sie moderne Condition-Monitoring-Technologien in Ansätzen bereits heute liefern, muss weiterentwickelt werden. Insbesondere **die Aussagekraft von Condition-Monitoring-Daten** in Bezug auf Diagnose und Lebensdauer muss noch verbessert werden und eine Erhöhung des sogenannten Technology Readiness Levels (TLR) erfahren. Demonstratoren leisten hier gute Dienste.

Produktion und Instandhaltung planen heute in der Regel immer noch nicht gemeinsam. Hierfür gilt es, auf Basis von Predictive- und Prescriptive-Ansätzen eine **ganzheitlich**

»Gerade in Krisen sind
Transparenz, breite Teilhabe,
industrielle Leistungsfähigkeit
und Datensouveränität
die Voraussetzung für sichere
und zuverlässige Vernetzung.
GAIA-X muss deshalb mit
offenen Technologien umgesetzt
werden.«

Prof. Dr.-Ing. Thomas Knothe
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik IPK

automatisierte dynamische Produktions- und Instandhaltungsplanung für komplexe Produktionssysteme zu schaffen. **Maschinelles Lernen** ist dabei ein Schlüsselfaktor. Die unternehmensübergreifende Konsolidierung und Auswertung relevanter Informationen aus den Produktionssystemen bilden eine unverzichtbare Grundlage für die Zuverlässigkeit von Prognosen. Diese wiederum ist auf sicherere und hoch verfügbare **Cloud-Services** angewiesen, die aktuelle Entwicklungen wie **GAIA-X** und **International Data Spaces (IDS)** berücksichtigen. Neben den unternehmensübergreifenden Cloud-Lösungen liefert die Blockchain eine innovative und extrem resiliente Möglichkeit, um beispielsweise relevante Informationen entlang des Lebenszyklus von Anlagen zu erfassen und auszuwerten. Wirtschaftlichkeits- und Ökologiebetrachtungen sind hierfür ebenso sinnvoll wie die Schaffung einer **Simulationsumgebung** zur schnellen Visualisierung und zum Testen von **Blockchain-Lösungen** (inkl. SmartContracts), u. a. auch zur Abschätzung von Aspekten wie CO₂-Emissionen und Nachhaltigkeit.

Ein ganz wesentliches Element für die erfolgreiche Etablierung einer anforderungsgerechten Resilienz in Unternehmen sind die Kompetenz und Qualifikation der Menschen im Unternehmen.

Deshalb müssen die Inhalte und Strukturen für die Aus- und Weiterbildung beim Thema Resilienz geschaffen bzw. erweitert

werden. Hier sollten u. a. die bereits vorhandenen Anwendungszentren und Labore der Fraunhofer-Gesellschaft im Fokus stehen. Sie können zu einer virtuellen und realen **Demonstrationswelt** vernetzt werden, um Resilienz erfahrbar zu machen.

Ressourceneffiziente Produktionsverfahren zur Resilienzsteigerung

Für die Einführung und Nutzung resilienter Wertschöpfungs-systeme ist die **interdisziplinäre Erforschung der ganzheitlichen Prozesskette**, bestehend aus konventionellen und additiven Prozessen, voranzutreiben. Das gilt ebenso für die Nutzungsmöglichkeiten alternativer bzw. hybrider Werkstoffe.

Um Resilienzpoteziale in Wertschöpfungsaktivitäten und -systemen aufzudecken, steht bei den unterschiedlichen alternativen Prozessketten der Additiven Fertigung bzw. der Austauschbarkeit von Werkstoffen sowie Hilfs- und Betriebsmitteln die Ermittlung sinnvoller Use Cases und Geschäftsmodelle im Vordergrund.

Diese Vorarbeit legt die Basis für die Überführung in eine automatisierte Generierung von **alternativen Prozessketten und Werkstoffen**. Zwingend notwendig ist die damit verbundene Entwicklung und Validierung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Steigerung organisationaler Resilienz. Diese Steigerung resultiert aus additiven Fertigungsverfahren für branchenübergreifende Produktions- und Wertschöpfungssysteme.

Um die Akzeptanz von alternativ gefertigten Bauteilen zu erhöhen, ist eine relevante Datenbasis für die **virtuelle Überprüfung** von Anwendungsfällen ebenfalls unverzichtbar. Eine Forschungsaufgabe ist hier – neben der **Evaluierung der Werkstoff- bzw. Produkteigenschaften** – auch die Schaffung eines gemeinsamen Datenraums. Dieser berücksichtigt auch die vor- und nachgelagerten Prozesse. Je besser die Datenlage und die Kenntnisse über Simulationsprogramme, desto genauer lassen sich Prozesse in Form eines Digitalen Zwillinges abbilden, virtuell optimieren und zum Einsatz bringen.

Des Weiteren stellen sich auch in den einzelnen **additiven Fertigungsverfahren** Fragen für die Forschenden. Neben der Vergrößerung der Werkstoffvielfalt können auch Aspekte wie Prozessstabilität, mobile Anwendungsmöglichkeiten und Sensorintegration weitere Potenziale in der Einsetzbarkeit bieten.

1 www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/gaia-x.html

2 www.fraunhofer.de/de/forschung/fraunhofer-initiativen/international-data-spaces.html



Digitalisierung ist der Schlüssel für resiliente Wertschöpfungsketten sowie für robuste und krisenfeste Geschäftsprozesse.«

Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK

7 Handlungsempfehlungen

Unternehmen

- Aufbau von integrierten Resilienzmanagementsystemen, die bereits im Normalmodus nutzbar sind
- Aufbau resilienter, alternativer Prozessketten
- Erhöhung der Flexibilität bei der Anwendung alternativer Fertigungstechnologien
- Befähigung von Mitarbeitenden, um in Krisen agieren zu können

Wertschöpfungssystem

- Erzeugung gemeinsamer interoperabler Infrastrukturen zur sicheren digitalen Vernetzung und Datenverfügbarkeit
- Gestaltung alternativer, konkurrenzfähiger Lieferketten
- Stärkung von Kreislaufprinzipien für Rohstoffe, Materialien und Bauteile
- Stärkung der Unternehmensvernetzung und Kollaboration für gemeinsames Handeln

Politik – Gesellschaft

- Schnelle und sichere Zertifizierung von Produkten und Prozessen
- Beschleunigte Vergabeverfahren zur Sicherung der Grundversorgung
- Staatliche Unterstützung auf Wertschöpfungssysteme ausrichten
- Förderung der interdisziplinären Resilienzforschung zur Sicherstellung des Erhalts und des Ausbaus des Wirtschaftsstandorts Deutschland

Unternehmen

Aufbau von integrierten Resilienzmanagementsystemen, die bereits im Normalmodus nutzbar sind

Vom Add-on zum Nutzen im Tagesgeschäft: Resilienz ist als individuelle Fähigkeit eines Unternehmens in bestehende Managementsysteme so zu integrieren, dass alle Resilienzphasen unterstützt werden. Durch eine Flexibilisierung des Strategiesystems wird bereits im Normalmodus ein Nutzen im Tagesgeschäft hinsichtlich Observation, Governance und Training sowie Prozessverbesserungen erzielt. Das gilt zum einen für Positionierungsalternativen, z. B. bei Technologien, zum anderen im Sinne der zu betrachtenden Zeithorizonte von Entscheidungen. So gelten im Krisenfall strategische Entscheidungen auch für kürzere Zeiträume.

Aufbau resilienter, alternativer Prozessketten

Hier gilt die Regel: Ausweichtechnologien vorsehen. Zur Erreichung von Resilienz in der Produktion ist im Fall von Disruptionen schnelles, reaktives Handeln zwingend notwendig. Das Ziel von resilienten, alternativen Prozessketten ist es, Flexibilität auf den drei Ebenen Produktionssteuerung, Produktionsanlagen und Prozesskettenauslegung zu schaffen. Unternehmen müssen hierfür bereits im Vorfeld von Störungen alternative Prozessketten hinsichtlich Verfügbarkeit und Anlagenfähigkeiten berücksichtigen. Aus der Verbindung aller drei Ebenen der Flexibilität entsteht eine neue Art der Produktionskomplexität, die Unternehmen mit einem hohen

Maß an Transparenz in Verbindung mit digitalen Werkzeugen beherrschen müssen. Besonders die Entwicklungen neuartiger oder die Erweiterungen bereits etablierter Fertigungstechnologien sollten von Unternehmen stets verfolgt und der Einsatz im eigenen Unternehmen als Ergänzung oder Substitution zum bestehenden Fertigungstechnologieportfolio sollte geprüft werden.

Erhöhung der Flexibilität bei der Anwendung alternativer Fertigungstechnologien

Der Blick über den Tellerrand: Die begrenzte Anzahl von Ressourcen und Technologien erfordert im Fall einer Disruption immer wieder den Aufbau alternativer Prozessketten und ein Umdenken in der Auswahl und Reihenfolgeplanung der Fertigungstechnologien. Häufig lässt sich ein Bearbeitungsschritt mithilfe einer anderen Technologie ersetzen. Hier reicht die Spannweite von sehr ähnlichen Fertigungsverfahren wie beispielsweise Bohren und Fräsbearbeitung bis hin zu komplett neuen Möglichkeiten, etwa durch additive Fertigungsverfahren, um nur ein Beispiel zu nennen. Um diese Flexibilität zu erreichen, ist allerdings ein tiefes Verständnis der eigenen technologischen Fähigkeiten notwendig. Im Fall einer Disruption hilft das, die Alternativen zu erkennen.

Befähigung von Mitarbeitenden, um in Krisenfällen agieren zu können

Persönliche Robustheit und Flexibilität stärken: Die drei wesentlichen Aspekte für Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter in Krisenfällen sind Orientierung, Vernetzung und Handlungssicherheit. Unternehmen geben Orientierung durch ein praktisch greifbares und vor allem positives Zielbild, das sich in den Führungskräften spiegelt und zugleich durch Erleben präsent ist. Damit ist das so wichtige »Warum« als Voraussetzung für besondere Anstrengungen geschaffen. Die Vernetzung dient dem »Auffangen« der Mitarbeitenden in schwierigen Situationen und gibt weitere Sicherheit im Tagesgeschäft. Krisenpläne sind deshalb nicht nur auf das Funktionieren von Prozessen, sondern insbesondere auch auf regelmäßigen Kontakt und Austausch der Belegschaft sowohl untereinander als auch mit Führungskräften ausulegen. Handlungssicherheit kann durch Trainings (z. B. für Bricolage) und vernetzte Krisenübungen erzielt werden. Dabei sind selbstständiges Handeln und vernetztes Entscheiden zu trainieren.

Wertschöpfungssystem

Erzeugung gemeinsamer interoperabler Infrastrukturen und Plattformen zur sicheren digitalen Vernetzung und Datenverfügbarkeit

Vernetztes Handeln erfordert durchgängige und robuste Interoperabilität aller Beteiligten. Dazu sind innerhalb eines Netzwerks Lösungen bereitzustellen, mit denen einzelne Wertschöpfungsketten individuell mit vertrauenswürdigen Partnern (wieder) schnell und aufwandsarm aufgebaut werden können. Darüber hinaus sind Planungs-, Steuerungs- und Rückverfolgungsfunktionen bereitzustellen, mit denen der Zustand von Produkten und Prozessen für die berechtigten Beteiligten zu vereinbarten Regeln transparent wird. Dabei sind Ausfallsicherheit, sichere Identitäten, Daten- und Manipulationssicherheit sowie Datensouveränität zu gewährleisten. Die derzeitige Fragmentierung an Plattformen sowie unzureichende Interoperabilität lassen sich durch Verfahren von sicheren vernetzten Systemen überwinden. Zur allgemeinen Steigerung der Resilienz bietet das europäische Projekt GAIA-X sehr gute Möglichkeiten für ganze Netzwerke, gemeinsame Services zu entwickeln.

Gestaltung alternativer, konkurrenzfähiger Lieferketten

Lieferfähigkeit stets gewährleisten: Auf Basis integrierter Resilienzmanagementsysteme sind globale Liefer- und Produktionsnetzwerke eng miteinander verzahnt. Eine Dynamisierung von Liefer- und Produktionsnetzwerken erhöht die Versorgungssicherheit für relevante Produktionsgüter durch eine Diversifikation der Lieferketten, d. h., es müssen proaktiv zusätzliche Lieferantenoptionen berücksichtigt sowie Maßnahmen und

Strategien für potenzielle Störfälle erarbeitet werden. Resilienz kann hierbei insbesondere durch eine konsequente regionale Versorgung geschaffen werden. Mithilfe eines intelligenten Verteilungssystems können die mit der Regionalisierung verbundenen höheren Bestände gleichartiger Vorprodukte verringert werden. Weiterhin sind temporäre Rückverlagerungen geeignet, um bei Störungen Risiken und Lieferengpässe zwischen regionalen und internationalen Wertschöpfungssystemen auszubalancieren.

Stärkung von Kreislaufprinzipien für Rohstoffe, Materialien und Bauteile

Die Kreislauffähigkeit von Produkten und Materialien ist einer der zentralen Aspekte für nachhaltiges Wirtschaften. Auch wenn der Anteil immaterieller Wirtschaftsgüter wächst, bedarf es nach wie vor stofflicher Ressourcen. Daher gilt es, soweit wie möglich ohne nichterneuerbare Rohstoffe auszukommen und diese in Kreisläufen zu führen. Die verstärkte Nutzung nachwachsender Rohstoffe sowie die Erhöhung der Kreislauffähigkeit schafft Potenziale für regionale Wertschöpfungsketten und trägt durch eine verstärkte Nutzung von Rezyklaten zu einer Erhöhung der Widerstandsfähigkeit bei der Rohstoffversorgung bei.

Stärkung der Unternehmensvernetzung und Kollaboration für gemeinsames Handeln

Neben den klassischen Liefer- und Servicenetzwerken schafft der systematische Aufbau und Betrieb gemeinsamer Aktivitäten entlang von unternehmerischen Aufgaben Optionen für effektives und effizientes Handeln in allen Resilienzphasen. So sparen Ausbildungskooperationen zwischen Unternehmen, die sonst nicht in gegenseitigen Lieferbeziehungen stehen, nicht nur Aufwände im Prepare, sondern führen auch im Respond schnell zu gemeinsamer Handlungsfähigkeit. Aus gelebten Innovationsnetzwerken entstehen so im Krisenfall sehr kurzfristig abgesicherte Systementwicklungen. Neben regionalen Arbeitsgemeinschaften oder bilateralen Kooperationen können dazu insbesondere Branchenverbände und Kammern Vernetzungsplattformen zur Steigerung der Resilienz aufbauen und betreiben.



Politik – Gesellschaft

Schnelle und sichere Zertifizierung von Produkten und Prozessen

Unternehmen müssen bei Disruptionen in ihren Wertschöpfungssystemen Einfluss auf ihre eigenen Produktionssysteme nehmen oder sogar kurzfristig die Strategie anpassen. Dies kann erhebliche Veränderungen in der Produktionsprogrammplanung, der Materialbedarfs- und Kapazitätsbedarfsplanung sowie in der Fertigungsplanung nach sich ziehen. Dabei entstehen parallel neue Anforderungen an die Zertifizierungen von Produkten und Prozessen. Die Nutzung alternativer Materialien bzw. die Verwendung alternativer Fertigungsprozesse kann sogar zum Erlöschen einer Zertifizierung führen. Um die Veränderungen abzusichern, sind daher Verfahren für eine gleichermaßen zeitnahe wie sichere Zertifizierung unverzichtbar.

Beschleunigte Vergabeverfahren zur Sicherung der Grundversorgung

In Krisen kommt es bei Wertschöpfungssystemen darauf an, schnell und flexibel zu reagieren. Ausfälle in Lieferketten oder auch die Befriedigung akuter oder erhöhter Bedarfe an notwendigen Produkten und Dienstleistungen erfordern zügiges und konsequentes Handeln. Dem gegenüber stehen teilweise aufwendige oder langwierige Vergabeverfahren. Um trotzdem die notwendigen Agilitäts- und Innovationspotenziale freisetzen zu können, sollten temporär beschleunigte Vergabeverfahren die Aufrechterhaltung von Wertschöpfungssystemen insbesondere zur Sicherung der Grundversorgung sicherstellen, natürlich unter Einhaltung der gebotenen Sicherheitsstandards

Staatliche Unterstützung auch auf Wertschöpfungssysteme ausrichten

Staatliche Unterstützungsleistungen wie Überbrückungshilfen unterstützen Unternehmen in Krisen, etwa aufgrund temporär verordneter Schließungen und dadurch entstandener Umsatzeinbußen, dabei, ihre wirtschaftliche Existenz zu sichern. Diese Unterstützungsleistungen sind ein zentrales Instrument, um die Auswirkungen der Corona-Pandemie oder der in einigen Regionen historischen Hochwasserkatastrophe abzufedern. Auch der durch die

Bundesregierung eingerichtete Wirtschaftsstabilisierungsfonds ist eine wichtige Hilfe für Unternehmen. Denn die Gefährdung des Unternehmensbestands hätte tiefgreifende Auswirkungen auf den Wirtschaftsstandort Deutschland und den Arbeitsmarkt. Neben der Betrachtung der Relevanz einzelner Unternehmen sollten darüber hinaus die Zusammenhänge in Wertschöpfungssystemen in den Blick genommen werden, um auch ganze Wertschöpfungssysteme über Krisen hinweg aufrechtzuerhalten und damit drohende Wertschöpfungsverlagerungen zu verhindern.

Förderung der interdisziplinären Resilienzforschung zur Sicherstellung des Erhalts und des Ausbaus des Wirtschaftsstandorts Deutschland

Nicht erst angesichts der Pandemie wird deutlich, wie wichtig Technologiesouveränität für den Wirtschaftsstandort Deutschland ist. Neben der Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit steht auch die unternehmerische Handlungsfähigkeit im Fokus. Integrative Konzepte und Anwendungen zur Steigerung der Resilienz verdeutlichen, wie vielschichtig und differenziert das Thema ist. Daher müssen auf allen Ebenen die Weichen für kollaborative und interdisziplinäre Resilienzforschung gestellt werden. Nur so lässt sich die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen auch langfristig sicherstellen.



Es reicht nicht aus, über Resilienz zu reden. Resilienz muss genauso wie Effizienz und Nachhaltigkeit bei der Gestaltung unserer Wertschöpfungs-systeme Berücksichtigung finden.«

Dr.-Ing. Thomas Heller

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Smart Maintenance Community der Fraunhofer-Gesellschaft

8 Zusammenfassung

Unternehmen weltweit sind fortwährend mit abrupten Veränderungen konfrontiert. Dazu gehören insbesondere extrem kurzfristig auftretende, aber tiefgreifende Störungen wie die globale Finanzkrise, die Handelskrise oder jüngst die Corona-Pandemie. Aber auch langfristige Veränderungen wie beispielsweise der Klimawandel oder notwendige Transformationsprozesse wie die Digitalisierung stellen besondere Dimensionen der Veränderungen dar, die sich nicht nur auf einzelne Unternehmen, sondern auf Wertschöpfungsketten als Ganzes auswirken. Um den wirtschaftlichen Erfolg und das Überleben zu sichern, benötigen Unternehmen flexible, leistungsfähige und robuste Wertschöpfungs-systeme und die Bereitschaft zur Veränderung. Grundlegend hierfür ist, die Resilienz als strategischen Wettbewerbsfaktor zu erkennen und zur strategischen Aufgabe der Unternehmensführung zu machen.

Darin liegt auch eine enorme Chance: Unternehmen, die lernen, Krisen effektiv zu managen oder sogar komplett zu umgehen, erschließen sich vollkommen neue Marktchancen für die Zukunft. Unternehmen, die wirklich resilient sind, stärken in Krisen ihre internationale Wettbewerbsfähigkeit und gehen am Ende sogar als Gewinner daraus hervor.

Um Unternehmen auf ihrem Weg zur **Resilienz** zu unterstützen, legt der Fraunhofer-Verbund Produktion mit diesem White Paper ein »Rahmenmodell für Resiliente Wertschöpfung« vor. Es bildet ein durchgängiges Gerüst, das die relevanten Aspekte vollständig und vernetzt adressiert und das Dilemma zwischen Effizienz im Tagesgeschäft und der Vorbereitung auf krisen-hafte Ereignisse auflöst. Das Rahmenmodell enthält in einem morphologischen Kasten das »Was« – die erforderlichen Eigenschaften von Partnern und Prozessen entlang der Resilienzphasen, das »Wie« – die wesentlichen Optimierungsziele für Resiliente Wertschöpfung, das »Wo« – die Interventions-ebenen zur Gestaltung sowie das »Womit« – die Lösungsbausteine zur Umsetzung und zum Betrieb eines resilienten Unternehmens.

Die Lösungsbausteine sind den fünf Resilienzphasen als Handlungsempfehlungen zugeordnet. Sie decken die Ebenen Resilienzprinzipien, Resilienzmanagement, Resilienzmethoden, Technologien sowie Resilienzwerkzeuge ab. Darüber hinaus werden einzelne Lösungsbausteine, die von den beteiligten Fraunhofer-Forschungseinrichtungen entwickelt wurden, den drei Anwendungsbereichen Strategie- und Prozessmanagementsysteme,

Produktionssysteme und Produktionstechnologien zugeordnet und exemplarisch vorgestellt. Neben diesen im White Paper aufgeführten anwendungsreifen Lösungsbausteinen finden sich weitere auf der Website des Fraunhofer-Verbunds Produktion (www.produktion.fraunhofer.de).

Um den Herausforderungen einer resilienten Wertschöpfung konsequent begegnen zu können und zur Erhöhung des Resilienzniveaus ganzer Wertschöpfungs-systeme beizutragen, müssen auf den drei Ebenen Unternehmen, Wertschöpfungs-system sowie Politik und Gesellschaft konkrete Handlungsempfehlungen umgesetzt werden. Für Unternehmen bedeutet dies den Aufbau und die Integration von Resilienzmanagementsystemen sowie alternativer Prozessketten, aber auch die Bereitschaft, alternative Fertigungstechnologien einzusetzen. Auch die Qualifizierung der Mitarbeitenden zum richtigen und sicheren Agieren in Krisen ist dringend geboten.

Auf der Ebene der Wertschöpfungs-systeme gilt es, die Vernetzung und Kollaboration der Unternehmen untereinander zu stärken, interoperable und digital vernetzte Infrastrukturen zu schaffen sowie alternative und konkurrenzfähige Lieferketten zu etablieren. Zudem ermöglicht die Stärkung von Kreislaufprinzipien für Rohstoffe, Materialien und Bauteile, die Produktion auf Basis von Rezyklaten und regionaler Wertschöpfung aufrechtzuerhalten. Zur Aufrechterhaltung der Produktion erfordert die Verwendung alternativer Materialien und Prozesse oder die Fertigung alternativer Produkte eine schnelle und sichere Zertifizierung von Produkten und Prozessen auf

der Ebene von Politik und Gesellschaft. Darüber hinaus ist es geboten, insbesondere für Krisenzeiten beschleunigte Vergabeverfahren zu etablieren, die eine Sicherung der Grundversorgung gewährleisten. Staatliche Unterstützungsleistungen sollten sich allerdings nicht nur auf einzelne Unternehmen konzentrieren, sondern vielmehr ganze Wertschöpfungs-systeme in den Blick nehmen. Übergreifend gilt es, die interdisziplinäre Resilienzforschung zur Sicherstellung des Erhalts und des Ausbaus des Wirtschaftsstandorts Deutschland zu fördern und zu verstetigen.

Wer jetzt glaubt, die aktuellen Krisen wären weitestgehend überwunden und eine Rückkehr zum Vorkrisensystem wäre das Gebot der Stunde, irrt grundlegend und ist auf die nächste Krise nicht ausreichend vorbereitet. Resilienz ist keine einmalige Maßnahme zur Lösung eines Problems, sondern eine andauernde strategische Aufgabe der Unternehmensführung zur langfristigen Sicherung der Überlebensfähigkeit. Nur so kommen Unternehmen vor die Krise.

Impressum

Herausgeber

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten
Forschung e. V.
Hansastraße 27 c
80686 München

Gesamtkoordination, Projektleitung und Redaktion

Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und
Konstruktionstechnik IPK
Pascalstraße 8–9
10587 Berlin
holger.kohl@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

Autoren

Dr.-Ing. Dominik Buß (Fraunhofer IML)
Prof. Dr. Heiko Gebauer (Fraunhofer IMW)
Dr. Robert Glawar (Fraunhofer Austria)
Dr.-Ing. Thomas Heller (Fraunhofer IML, Smart Maintenance
Community der Fraunhofer-Gesellschaft)
Dr.-Ing. Steffen Klan (Fraunhofer IGCV)
Prof. Dr.-Ing. Thomas Knothe (Fraunhofer IPK)
Prof. D.-Ing. Holger Kohl (Fraunhofer IPK)
Brandon Sai M. Sc. (Fraunhofer IPA)
Niels Schmidtke M. Sc. (Fraunhofer IFF, Fraunhofer-Verbund
Produktion)
Dipl.-Wi.-Ing. Fabian Stenzel (Fraunhofer UMSICHT)
Dipl.-Ing. Markus Werner (Fraunhofer IWU)
Marcel Wilms M. Sc. (Fraunhofer IPT)

Empfohlene Zitierweise

Kohl, Holger, et al.: White Paper »RESYST« – Resiliente
Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ,
erfolgreich, krisenfest. Hrsg. Fraunhofer-Gesellschaft e. V.,
München 2021

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

Bildquellen

Seite 19: iStock
Seite 19: Fraunhofer IFF, Viktoria Kühne
Seite 23: Fraunhofer, Rainer Benz
Seite 26: Fraunhofer, Andreas Heddergott
Seite 29 Mitte: Heitec AG
Seite 31 oben: iStock; unten: PIEL GmbH
Alle übrigen Abbildungen und
Infographiken: Fraunhofer-Gesellschaft

Beteiligte Fraunhofer-Forschungseinrichtungen

Fraunhofer-Einrichtung für Additive Produktionstechnologien
IAPT

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und System-
zuverlässigkeit LBF

Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM

Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF

Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und
Verarbeitungstechnik IGCV

Fraunhofer-Institut für Großstrukturen in der Produktions-
technik IGP

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktions-
technik IPK

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung IPA

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energie-
technik UMSICHT

Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM

Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umform-
technik IWU

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZFP

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und
Wissensökonomie IMW

Fraunhofer Austria Research GmbH

Gestaltung und Layout Silke Schneider

© Fraunhofer-Gesellschaft e. V., München 2021



Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Telefon +49 30 39006-233
holger.kohl@ipk.fraunhofer.de

