

Kurzstudie

Resilienz produzierender Unternehmen in Baden-Württemberg



ALLIANZ
Industrie 4.0
BADEN-WÜRTTEMBERG | 

Inhalt

Kurzfassung	4
I. Einleitung und Vorgehen	5
II. Methodisches Vorgehen	8
III. Schritt 1: Theoretische und anwendungsnahe Grundlagen zu Resilienz und resilienzsteigernden Maßnahmen	9
III.1 Robustheit	13
III.1.1 Robustes Netzwerkdesign	13
III.1.2 Redundanzen	15
III.1.3 Predictive Maintenance	15
III.1.4 Systematisches Risikomanagement	16
III.2 Speed & Span	17
III.2.1 Kollaboration mit Partnerunternehmen im Netzwerk	17
III.2.2 Intelligente Produktionssteuerung	18
III.2.3 Skalierbare Kapazitäten und Wertschöpfungstiefe	18
III.3 Sensitivity	21
III.3.1 Traceability	21
III.3.2 Predictive Analytics	22
III.3.3 Digitale Zwillinge	23
III.4 Zwischenfazit	25
IV. Schritt 2: Industriebefragung	26
V. Schritt 3: Ergebniskonsolidierung	32
VI. Fazit und Handlungsempfehlung	33
VII. Ausblick	36
VIII. Institut und Verfasser der Studie	37
Literatur	38
Impressum	42

Kurzfassung

Die vorliegende Studie untersucht, wie produzierende Unternehmen in Baden-Württemberg ihre Resilienz gegenüber internen und externen Störungen systematisch bewerten und verbessern können. Hierzu wurden zunächst relevante Einflussfaktoren, Resilienzcharakteristika und Maßnahmen literaturbasiert identifiziert und konsolidiert. Anschließend wurden 42 Unternehmen zu ihrer Belastungssituation, ihrer Resilienz-Selbsteinschätzung sowie zur Wirksamkeit, zum Umsetzungsaufwand und zum eigenen Implementierungsgrad resilienzsteigernder Maßnahmen befragt. Auf dieser Grundlage wurde ein Self-Assessment-Tool auf Basis eines Reifegradmodells entwickelt, das Unternehmen eine Gap-Analyse zwischen Ist-Resilienz und strategischem Zielbild ermöglicht.

Die Studienergebnisse zeigen insbesondere Handlungsbedarf bei externen Einflussfaktoren wie Markt, Lieferketten, Personal sowie Kostenentwicklungen. Während strukturelle Maßnahmen wie robustes Netzwerkdesign, Redundanzen und systematisches Risikomanagement als besonders wirksam eingeschätzt werden, bestehen bei datengetriebenen Ansätzen wie Predictive Maintenance, Vorhersagemodellen und digitalen Zwillingen weiterhin deutliche Umsetzungslücken.

I. Einleitung und Vorgehen



Globalisierung und internationale Arbeitsteilung haben in den vergangenen Jahrzehnten zu hochgradig vernetzten Wertschöpfungs- und Produktionsstrukturen geführt. Unternehmen profitieren dadurch von Skaleneffekten, Spezialisierung und standortspezifischen Vorteilen, stehen jedoch zugleich vor steigendem Koordinationsaufwand, wachsenden Abhängigkeiten zwischen Standorten und Partnern sowie einer erhöhten Dynamik ihres Wettbewerbsumfelds [1,2]. Besonders effizienz- und kostenoptimierte Systeme zeigen sich anfällig gegenüber unerwarteten Schocks, da Redundanzen, Puffer und alternative Handlungsoptionen häufig reduziert wurden [3,4].

Diese Entwicklung wird durch eine zunehmende Anzahl disruptiver politischer, ökonomischer und technologischer Ereignisse verstärkt, wie bspw. der COVID-19-Pandemie und aktuellen geopolitischen Konflikten in der Ukraine und dem Nahen Osten. Zur Beschreibung dynamischer und unsicherer Rahmenbedingungen wurde lange Zeit das VUCA-Konzept herangezogen, das die Dimensionen **Volatilität** (*volatility*), **Unsicherheit** (*uncertainty*), **Komplexität** (*complexity*) und **Ambiguität** (*ambiguity*) umfasst. Da aktuelle Entwicklungen jedoch zunehmend durch Fragilität, Nichtlinearität und schwer nachvollziehbare Ursache-Wirkungs-Beziehungen geprägt sind, gewinnt ergänzend das BANI-Modell an Bedeutung. Dieses beschreibt Rahmenbedingungen als **fragil** (*brittle*), **angstbehaftet** (*anxious*), **nicht-linear** (*non-linear*) und teilweise **unverständlich** (*incomprehensible*). Damit wird deutlich, dass Systeme nicht nur komplex und unsicher sind, sondern auch abrupt versagen können und Entwicklungen sprunghaft verlaufen. [5]

Die praktische Relevanz dieser Entwicklung zeigt sich in der hohen Belastungssituation von Unternehmen. Trotz eines verstärkten Fokus auf systematisches Störungsmanagement [6] waren in einer aktuellen Studie rund 93 % der befragten Unternehmen in den vergangenen drei Jahren von mindestens einer Supply-Chain-Störung betroffen [7]. Zudem berichten 73 % der Supply-Chain-Verantwortlichen von Lieferantenstörungen innerhalb der vergangenen zwölf Monate [8]. Die Ursachen der Störungen sind hierbei vielseitig, wobei bspw. Cyberangriffe auf die Logistik, veraltete Infrastruktur, intensivierete Wetterereignisse sowie geopolitische Fragmentierung und eine Verschärfung von Handelsvorschriften als zentrale Risiken für das Jahr 2026 prognostiziert werden [9]. Doch auch kleine interne Störungen können weitreichende Auswirkungen auf nachfolgende Prozesse in Produktionsnetzwerken haben [10,11]. Ein adäquater Umgang mit derartigen internen und externen Störungen ist daher von zentraler Bedeutung. Unternehmen müssen in der Lage sein, Störungen effektiv und effizient abzufedern, ihre operative Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten und bei Bedarf neue stabile Systemzustände einzunehmen. In diesem Zusammenhang gewinnt der Begriff der Resilienz an Bedeutung. Resilienz wird im Supply-Chain-Management unterschiedlich definiert. Im Kern beschreibt sie die Fähigkeit von Lieferketten und Produktionssystemen, operative Prozesse trotz Störungen aufrechtzuerhalten, angemessen auf unerwartete Ereignisse zu reagieren und sich nach Unterbrechungen zu stabilisieren oder weiterzuentwickeln [12,13]. Resiliente Produktionssysteme zeichnen sich folglich durch eine möglichst stabile Leistungsfähigkeit auch unter gestörten Rahmenbedingungen aus.

Die Relevanz geeigneter Maßnahmen zur Bewältigung von Störungen zeigt sich auch in aktuellen Unternehmensumfragen. Für verbesserte Vorgehenspläne gegen Störfälle erhöhten 34,1 % der Unternehmen in der Europäischen Union den Digitalisierungsgrad ihrer Wertschöpfungsprozesse und 27,6 % weiteten ihre Lagerbestände aus [14]. Diese Maßnahmen verdeutlichen, dass Unternehmen zunehmend in Transparenz, Steuerungsfähigkeit und Pufferkapazitäten investieren. Gleichzeitig bleibt der Umgang mit Veränderungen laut [15] bei 66 % der befragten Unternehmen lediglich reaktiv. Fast die Hälfte der Teilnehmenden hat Schwierigkeiten, sich auf Veränderungen vorzubereiten. Dies zeigt, dass kurzfristige Maßnahmen zwar an Bedeutung gewinnen, langfristige Folgewirkungen und strategische Resilienzansätze jedoch häufig noch nicht ausreichend berücksichtigt werden. Für Baden-Württemberg ist dies jedoch besonders relevant, da der Standort stark durch produzierende Unternehmen, den Maschinen- und Anlagenbau, die Automobilindustrie, Zulieferstrukturen sowie international eingebundene mittelständische Unternehmen geprägt ist. Ziel der vorliegenden Studie ist daher die Entwicklung eines praxisorientierten, branchenübergreifenden Leitfadens zur Steigerung der industriellen Resilienz in Baden-Württemberg. Vor diesem Hintergrund werden in der vorliegenden Studie die folgenden beiden Fragestellungen adressiert:

- **Von welchen Einflussfaktoren sind Unternehmen in Baden-Württemberg betroffen und wie stark wirken sich diese auf ihre Leistungsfähigkeit aus?**
- **Welche Maßnahmen eignen sich besonders gut für den Umgang mit den relevantesten Einflussfaktoren und wie lassen sie sich praxisnah einordnen?**

Neben einer Sammlung und Systematisierung relevanter Einflussfaktoren und konkreter Maßnahmen analysiert die Studie, wie diese Maßnahmen auf zentrale strategische Handlungsansätze einzahlen. Damit soll Unternehmen in Baden-Württemberg ein Ansatz an die Hand gegeben werden, der resilienzsteigernde Maßnahmen mit strategischen Zielbildern verbindet und Unternehmen aller Branchen dabei unterstützt, ihre Resilienz systematisch zu bewerten und zukunftsfähig auszurichten.

Der vorliegende Studienbericht untergliedert sich in die folgenden Kapitel: Kapitel II erläutert das methodische Vorgehen der Studie. Die einzelnen Arbeitsschritte werden anschließend in den Kapiteln III bis V ausführlich dargestellt. Kapitel III umfasst die Recherche und Sammlung relevanter Aspekte im Kontext der Resilienz aus dem Stand der Technik. In Kapitel IV werden diese Erkenntnisse anhand einer Industriebefragung hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit validiert. Kapitel V widmet sich der Ergebniskonsolidierung, in deren Rahmen die Erkenntnisse aus Recherche und Befragung zusammengeführt und in einem Self-Assessment-Tool konsolidiert werden. Dieses erlaubt die unternehmensspezifische Einordnung des Status Quo hinsichtlich Resilienz sowie eine individuelle Gap-Analyse inklusive zugehörigen Maßnahmenvorschlägen. Kapitel VI schließt den Studienbericht mit einem Fazit und konkreten Handlungsempfehlungen ab.

II. Methodisches Vorgehen

Zur Beantwortung der zentralen Fragestellungen ist die vorliegende Studie wie in Abbildung 1 in drei aufeinander aufbauende Schritte gegliedert, wobei sowohl theoretische Aspekte aus dem Stand der Technik als auch praxisnahe Perspektiven integriert werden.

Im ersten Schritt erfolgt eine umfassende Literaturrecherche sowohl zu relevanten Einflussfaktoren, zu zentralen Resilienz-Systemcharakteristika als auch zu geeigneten resilienzsteigernden Maßnahmen. In einem zweiten Schritt werden diese Aspekte systematisch strukturiert, konsolidiert und in einen Fragebogen überführt, anhand dessen die gesammelten Ergebnisse empirisch auf Praxistauglichkeit geprüft werden. Ziel der Erhebung ist es somit, sowohl die wahrgenommene Bedeutung einzelner Einflussfaktoren zu evaluieren als auch praxisbezogene Erfahrungen mit bestehenden Maßnahmen zu erfassen. Dadurch wird sichergestellt, dass neben theoretischen Erkenntnissen auch anwendungsorientiertes Wissen in die weitere Analyse einfließt. Aufbauend auf der Kombination aus Literaturrecherche und empirischen Ergebnissen der Umfrage wird im dritten Schritt ein Self-Assessment-Tool konzipiert und in Form eines Reifegradmodells entwickelt. Dieses Tool ermöglicht es Anwendenden, eine strukturierte Gap-Analyse im Hinblick auf definierte strategische Zielkriterien im Kontext von Resilienz durchzuführen und basierend hierauf bei der Identifikation von konkreten, praxisnahen Maßnahmenempfehlungen unterstützt, die zur gezielten Verbesserung der Resilienz beitragen können.

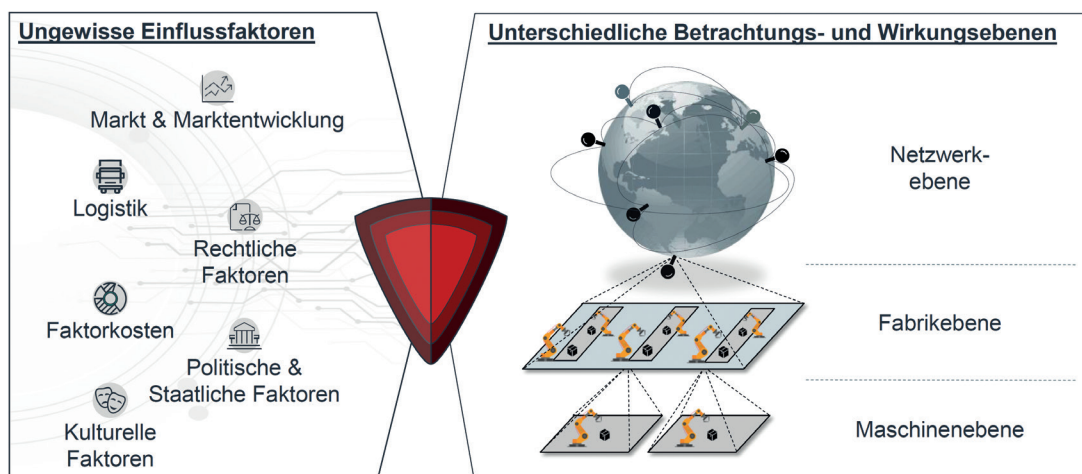
Abbildung 1: Übersicht über die Vorgehensschritte der Studie



III. Schritt 1: Theoretische und anwendungsnahe Grundlagen zu Resilienz und resilienzsteigernden Maßnahmen

Um Produkte möglichst effizient und kostengünstig herstellen zu können, ist deren Herstellung heutzutage meist in sogenannten globalen Produktionsnetzwerken (GPN) organisiert [2]. Diese umfassen neben wertschöpfenden Produktionsprozessen insbesondere auch nicht direkt wertschöpfende Aktivitäten wie Transporte oder Lagerhaltung [16,17]. Die Planung und das Management von GPN umfassen verschiedene Entscheidungen, die mit unterschiedlichen Unternehmensfunktionen, Zeithorizonten und Entscheidungsobjekten verknüpft sind. Zur besseren Übersichtlichkeit und Koordination werden sie daher meist in verschiedene, hierarchische Strukturierungsebenen unterteilt. Wie in Abbildung 2 (rechte Seite) dargestellt, können dabei aufbauend auf [18,19] die folgenden Ebenen unterschieden werden: Auf der untersten **Maschinenebene** werden Prozesse bzw. Arbeitsvorgänge an verschiedenen Arbeitsstationen mithilfe vorhandener Ressourcen bearbeitet. Die Kombination mehrerer Stationen bildet ein Produktionssystem bzw. eine Produktionslinie, welches bzw. welche abhängig vom verwendeten Fertigungsprinzip als Werkstattfertigung, als Gruppenfertigung oder als Fließfertigung ausgestaltet sein kann [20]. Die Aggregation mehrerer Linien bildet die **Fabrikebene**. Da sich die Wertschöpfung heute jedoch meist auf mehrere Standorte aufteilt, sind Produktionsstandorte auf der obersten **Netzwerkebene** zusammengefasst.

Abbildung 2: Einflussfaktoren sowie Betrachtungs- und Wirkungsebenen der Produktion



Da GPN und ihre Strukturen jedoch meist das Ergebnis historischen Wachstums sind [21,22] und selten bewusst gestaltet werden, erhöht sich ihre Anfälligkeit gegenüber globalen Dynamiken und ihren Auswirkungen auf die Netzwerkperformance [23,24]. Für die Gestaltung und das Management von GPN stellen Störungen und Veränderungen eine Bedrohung für die Rentabilität und Überlebensfähigkeit des Unternehmens dar [13]. Am Beispiel der COVID-19-Pandemie oder dem jüngsten Nahostkonflikt zeigt sich die Fragilität globaler Verflechtungen in Form von Werksschließungen und Versorgungsengpässen ganzer Lieferketten mit erheblichen Auswirkungen für einzelne Unternehmen und die gesamte Wirtschaft [10,11]. Neben Einzelstörungen stellen auch andere rasche Veränderungen des Umfelds wie striktere regulatorische Anforderungen, etwa die Europäische Lieferkettenrichtlinie (CSDDD) [25], Unternehmen vor Herausforderungen. Aber auch von Störungen betroffene operative Produktions- oder Logistikprozesse gilt es schnell und effizient zu adressieren und von planerischer Seite möglichst gut vorzudenken. Generell entstehen Störungen in GPN durch eine „Kombination aus einem unbeabsichtigten und unerwartet auslösenden Ereignis, das sich irgendwo in der vorgelagerten Lieferkette [...] der Inbound-Logistik [...] oder dem Beschaffungsumfeld ereignet, und einer daraus resultierenden Situation, die eine ernsthafte Bedrohung für den normalen Geschäftsverlauf des fokussierten Unternehmens darstellt“ [26]. Jede Art von störendem Ereignis oder Veränderung in GPN wirkt über Einflussfaktoren, welche in zentrale Kategorien unterteilt werden.

Die im Folgenden beschriebenen Faktoren sind auf [2] zurückzuführen und wurden im Rahmen der Studie adaptiert. Eine wesentliche Kategorie bilden **Markt- und Kundenfaktoren**. Die Nachfrage nach Produkten und Dienstleistungen sowie deren zeitliche und regionale Entwicklung stellen zentrale Treiber für die Auslegung und Steuerung von Produktionsnetzwerken und -systemen dar. Schwankungen in der Nachfrage, veränderte Kundenanforderungen oder zunehmende Individualisierung beeinflussen sowohl die Kapazitätsplanung als auch die Flexibilitätsanforderungen an das Netzwerk. Eng damit verknüpft sind **Lieferanten und die Verfügbarkeit von Materialien**. Globale Abhängigkeiten, begrenzte Ressourcen sowie Störungen in Lieferketten können die Versorgungssicherheit erheblich beeinträchtigen. Neben der reinen Verfügbarkeit spielen auch Aspekte wie Lieferzuverlässigkeit, Qualität und geopolitische Risiken eine entscheidende Rolle bei der Bewertung von Beschaffungsstrukturen. **Logistik und Transport** stellen einen weiteren zentralen Einflussfaktor dar. Dadurch werden die einzelnen Elemente des Produktionsnetzwerks verbunden und maßgeblich dessen Leistungsfähigkeit beeinflusst. Transportkosten, Lagerbestände sowie Lieferzeiten bestimmen nicht nur die Gesamtkostenstruktur, sondern auch die Fähigkeit, Kundenanforderungen zuverlässig zu erfüllen. Insbesondere steigende Anforderungen an kurze Durchlaufzeiten und hohe Liefertermintreue bei gleichzeitig sich immer schneller verändernden Produktionssystemen erhöhen die Komplexität logistischer und struktureller Entscheidungen [27]. Kostenfaktoren, insbesondere **Energie- und Materialkosten**, wirken sich direkt auf die Wirtschaftlichkeit von Produktionsstandorten aus. Preisschwankungen auf globalen Märkten sowie regulatorische Vorgaben, bspw. im Kontext nachhaltiger Produktion, führen zu zusätzlichen Unsicherheiten. Unternehmen müssen daher kontinuierlich abwägen, wie sie ihre Produktions-

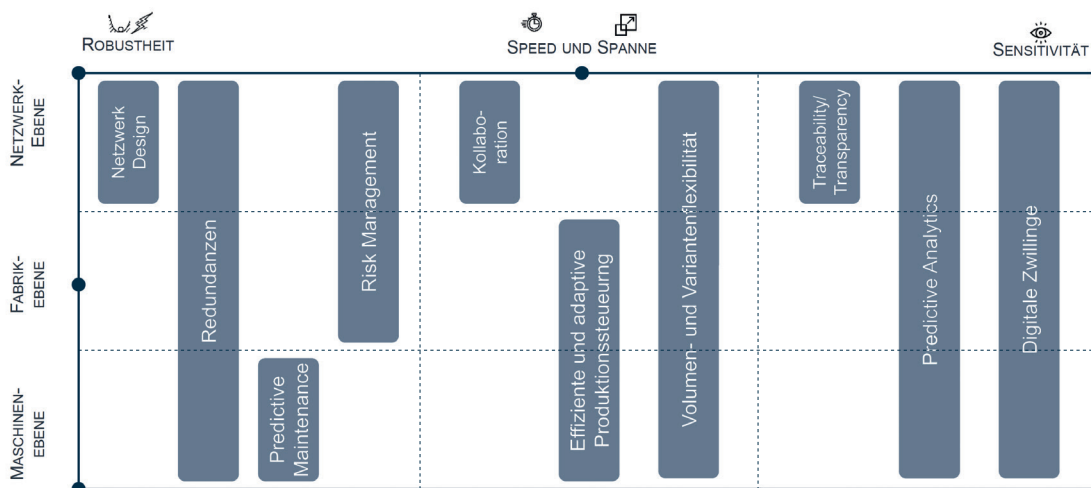
prozesse kostenoptimal und gleichzeitig ressourcenschonend gestalten. Der Einflussfaktor **Personal** umfasst sowohl die Verfügbarkeit als auch die Qualifikation von Mitarbeitenden. Unterschiedliche Ausbildungsniveaus, Fachkräftemangel oder hohe Fluktuation können die Leistungsfähigkeit einzelner Standorte einschränken. Zudem spielen kulturelle Unterschiede und Kommunikationsbarrieren insbesondere in international verteilten Netzwerken eine wichtige Rolle, da sie die Zusammenarbeit und Koordination beeinflussen. Ergänzend dazu sind **Anlagen und IT** als zentrale interne Ressourcen zu betrachten. Der Zustand, die Verfügbarkeit und die Flexibilität von Produktionsanlagen bestimmen maßgeblich die Reaktionsfähigkeit eines Netzwerks auf Störungen und Nachfrageschwankungen. Gleichzeitig gewinnt die IT-Infrastruktur zunehmend an Bedeutung, da sie Transparenz, Vernetzung und datenbasierte Entscheidungen ermöglicht. Störungen oder Sicherheitsrisiken in diesem Bereich können erhebliche Auswirkungen auf den gesamten Produktionsprozess haben. Insgesamt zeichnen sich alle genannten Einflussfaktoren durch eine kontinuierliche Veränderung und gegenseitige Interdependenzen aus. Diese Dynamik stellt eine zentrale Herausforderung für die Gestaltung und den Betrieb resilienter Produktionsnetzwerke dar.

Ohne geeigneten Umgang mit diesen Einflussfaktoren und Veränderungen führen diese zum Verlust der Wettbewerbsfähigkeit des GPN [28]. Diese Herausforderungen zeigen sich auch bei Unternehmen am Standort Baden-Württemberg. Kleine Unternehmen müssen in der Lage sein, auf veränderte Produkthanforderungen und Störungen schnell zu reagieren. Größere Unternehmen wie bspw. Automobilhersteller und -zulieferer befinden sich in einem sich wandelnden Umfeld hin zur Elektromobilität und müssen in die Lage versetzt werden, in ihren Planungsprozessen Unsicherheit zu berücksichtigen und schneller auf Veränderungen mit Planänderungen zu reagieren. Als erfolgversprechende Konzepte zum Umgang mit sich permanent verändernden Rahmenbedingungen gelten Robustheit und Resilienz. Beide bezeichnen die Fähigkeit eines Systems, Störungen zu tolerieren, handzuhaben und seine Funktionsfähigkeit trotz gestörter Rahmenbedingungen aufrechtzuerhalten. Robuste bzw. resiliente Produktionssysteme weisen folglich eine hohe und stabile Performance trotz Störungen auf. Während Robustheit hierbei von einem gleichbleibenden Systemzustand ausgeht, erlaubt Resilienz Zustandsänderungen des Produktionssystems. Resilienz vereint somit Resistenz gegenüber Störungen im Sinne einer schnellstmöglichen Einnahme von Gleichgewichtszuständen mit der Fähigkeit, den Systemzustand anzupassen, wenn bleibende Umweltveränderungen dies erfordern [29]. Entsprechende Zustandsänderungen erfordern eine Anpassungszeit, die auch als Hysterese bezeichnet wird [2].

Für ein effektives Management von Resilienz im Produktionskontext sind konkrete Maßnahmen zur Resilienzbildung umzusetzen und zu verbessern, die die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen steigern, indem sie Resilienz bei gleichbleibender Effizienz ermöglichen. Im Kontext des Störungsmanagements werden dabei einerseits Ansätze verfolgt, die darauf abzielen, die Folgen mithilfe geeigneter Maßnahmen nachträglich bestmöglich einzudämmen bzw. zu minimieren (**reaktiv**) [30]. Andererseits wird häufig der Versuch unternommen, Störungen bspw. mithilfe zusätzlicher Wartungsaktivitäten

oder umfassender Mitarbeiterschulungsprogramme aus langfristiger Sicht bereits vor ihrem Auftreten zu vermeiden (**präventiv**) [31,32]. Während die Störungsprävention also ansetzt, bevor ein Störungsereignis überhaupt eintritt, adressiert die Störungsreaktion die Auswirkungen einer eingetretenen Störung. Dem gegenüber stehen planerische Anpassungen des GPN. Diese Maßnahmen umfassen die gezielte **proaktive** Gestaltung von Systemreserven, um eine möglichst gute Reaktion auf Störungen zu ermöglichen und somit deren Auswirkungen zu reduzieren [23]. Entsprechende Maßnahmen können hierbei nicht nur über die verschiedenen Betrachtungsebenen eines GPN, sondern insbesondere auch über fünf Mechanismen wirksam werden, um den Anforderungen an GPN auch im Stör- und Veränderungsfall gerecht zu werden. Diese Anforderungen umfassen die allgemeinen Bedingungen, unter denen ein System funktionieren soll, sowie die gewünschten Ergebnisse [13]. Zu diesen fünf grundlegenden Eigenschaften zählen die **Anfälligkeit** (*Susceptibility*), die **Stabilität** (*Stability*), die **Geschwindigkeit** (*Speed*), die **Spanne** (*Span*) und die **Sensitivität** (*Sensitivity*) eines Systems. Die Anfälligkeit beschreibt, in welchem Ausmaß ein System durch interne oder externe Störungen beeinträchtigt werden kann. Die Stabilität bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, trotz Störungen einen stabilen Leistungszustand aufrechtzuerhalten. Die Geschwindigkeit beschreibt, wie schnell ein System Gegenmaßnahmen einleiten oder seinen Zustand an veränderte Rahmenbedingungen anpassen kann. Die Spanne gibt an, welche Bandbreite an möglichen Zuständen einem System zur Verfügung steht, um auf unterschiedliche Störungen oder Veränderungen zu reagieren. Die Sensitivität beschreibt schließlich die Fähigkeit eines Systems, relevante Veränderungen frühzeitig zu erkennen und hinsichtlich ihrer Auswirkungen zu bewerten (*Benfer*). Zur besseren Strukturierung werden die fünf Eigenschaften zu drei übergeordneten Maßnahmenkategorien zusammengeführt. Die Anfälligkeit (*Susceptibility*) und die Stabilität (*Stability*) werden unter Robustheit zusammengefasst, da sie insbesondere die Begrenzung von Störungsauswirkungen und die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit des Produktionssystems adressieren. Die Geschwindigkeit (*Speed*) und die Spanne (*Span*) werden gemeinsam als Speed & Span betrachtet, da sie die schnelle und breite Anpassungsfähigkeit eines Systems an veränderte Rahmenbedingungen beschreiben. Die Sensitivität (*Sensitivity*) bildet eine eigenständige Kategorie, da sie die frühzeitige Erkennung und Bewertung relevanter Veränderungen ermöglicht. Unter Einbeziehung sowohl der Betrachtungsebene als auch der Wirkmechanismen können wie in Abbildung 3 dargestellt konkrete Maßnahmen abgeleitet werden, die zur Steigerung der Resilienz in produzierenden Unternehmen herangezogen werden können. Diese Maßnahmenkategorien werden im Folgenden zunächst übergeordnet beschrieben. Für jede der Maßnahmenkategorien werden unter Berücksichtigung theoretischer Grundlagen aus [13] konkrete Umsetzungsvorschläge anhand praktischer Anwendungsfälle aus dem (Forschungs-) Projektkontext skizziert.

Abbildung 3: Maßnahmenkategorien in Bezug auf Betrachtungsebenen und Wirkmechanismen



III.1 Robustheit

Robustheit bezeichnet die Eigenschaft eines Produktions- oder Wertschöpfungssystems, seine funktionale Leistungsfähigkeit auch unter unsicheren, variierenden und gestörten Rahmenbedingungen auf einem hohen Niveau aufrechtzuerhalten, ohne dass signifikante Abweichungen in zentralen Zielgrößen wie Qualität, Zeit, Kosten oder Verfügbarkeit auftreten. Ein wesentlicher Punkt ist die Begrenzung von Ausmaß und Dauer der Störung. Das System agiert dabei innerhalb seines Flexibilitätskorridors, ohne dass Anpassungsmaßnahmen erforderlich werden. Die Steigerung der Robustheit erfolgt dabei durch die Schaffung von Flexibilitäten und/oder Redundanzen und kann in der Praxis bspw. durch die im Folgenden vorgestellten Maßnahmen „Robustes Netzwerkdesign“, „Schaffung von Redundanzen“, „Predictive Maintenance“ oder „systematisches Risikomanagement“ gesteigert und gefestigt werden.

III.1.1 Robustes Netzwerkdesign

Robustes Netzwerkdesign umfasst die vorausschauende, strukturierte Gestaltung von GPN und Fabriken, sodass diese auch unter Unsicherheiten und Störungen stabile Leistungsfähigkeit aufweisen. Ziel ist es, Standorte, Kapazitäten und Materialflüsse, aber auch Fabriklayouts so zu planen, dass sie bei veränderten Rahmenbedingungen (z. B. Nachfrageverschiebungen, Lieferantenausfälle, geopolitische Ereignisse) adaptierbar bleiben.

Die Gestaltung des Netzwerks beschreibt hierbei die gezielte Verteilung wertschöpfender Aktivitäten auf mehrere, miteinander agierende Produktionsstandorte. Dabei werden lokale Anpassung, transaktionale Kosten sowie Skaleneffekte und Verbundvorteile gemeinsam berücksichtigt und um die Dimension der Anpassungsfähigkeit ergänzt. Mit zunehmender Unsicherheit und Dynamik globaler Märkte gewinnt die Anpassungsfähigkeit von GPN entscheidend an Bedeutung. Klassische Strukturen wie Weltfabriken oder Ketten sind primär auf Effizienz ausgelegt und weisen aufgrund der Zentralisierung von Prozessschritten eine höhere Verwundbarkeit gegenüber Störungen auf, die durch vernetzte Strukturen reduziert werden kann. Netzstrukturen bieten im Gegensatz dazu die höchste Unverwundbarkeit. Die Schaffung einer Netzstruktur erfolgt durch die schrittweise Dezentralisierung und gleichzeitige Vernetzung von Produktions- und Wertschöpfungsaktivitäten über mehrere Standorte hinweg. Dies umfasst den Aufbau redundanter Kapazitäten, die Standardisierung und Modularisierung von Prozessen sowie die digitale Integration zur Sicherstellung von Transparenz und Koordination. Bestehende Strukturen werden dabei iterativ weiterentwickelt, um Effizienz und Anpassungsfähigkeit in ein ausgewogenes Verhältnis zu bringen. Die Umsetzung einer Netzstruktur erhöht die Komplexität in Planung und Steuerung und erfordert eine enge Abstimmung zwischen globalen und lokalen Einheiten. Gleichzeitig entstehen zusätzliche Kosten durch Redundanzen und notwendige Investitionen in Digitalisierung und Kompetenzen. Zudem bedingt der Wandel ein Umdenken von rein effizienzgetriebenen hin zu resilienzorientierten Entscheidungslogiken.

Insbesondere gilt es, nicht nur das Netzwerk als Ganzes, sondern auch seine Subsysteme möglichst robust zu gestalten. Auf Fabrikebene bedeutet das, dass Fabrikstrukturen und -layouts so zu gestalten sind, dass sie anpassungsfähig gegenüber sich ändernden Produktprogrammen, Volumina und Störereignissen sind. Ein zentrales Element ist dabei der Einsatz simulativer Unterstützung für eine adaptive Layoutplanung. Auf Basis digitaler Fabrikmodelle und Materialflusssimulationen können unterschiedliche Layoutvarianten, Flusskonzepte und Pufferstrategien unter variierenden Szenarien (z. B. Nachfragespitzen, Maschinen- oder Linienausfälle, geänderte Losgrößen) vorab getestet und bewertet werden. Dadurch lassen sich Engpässe, Rückstaubildungen oder überlastete Bereiche frühzeitig identifizieren und geeignete Maßnahmen wie modulare Layouts, skalierbare Linienkonzepte oder flexible Flächenzuweisungen ableiten. Adressiert werden insbesondere Risiken wie Nachfragevolatilität, Produktvarianz, Kapazitätsschwankungen und Störungen im Materialfluss. Voraussetzung ist eine hinreichende Datenbasis zu Prozessen, Anlagen, Materialflüssen und Flächenrestriktionen sowie die Fähigkeit, diese in geeigneten Simulations- und Optimierungsmodellen abzubilden. Die Maßnahme wirkt stabilisierend, indem sie die Fabrik in die Lage versetzt, Layoutanpassungen schneller und mit geringeren Risiken umzusetzen, etwa durch vorbereitete Umsetzungsfahrpläne und vorvalidierte Alternativlayouts. Herausforderungen bestehen in der Modellierungstiefe, dem Pflegeaufwand der digitalen Modelle, der Integration in bestehende Planungsprozesse sowie in der Abwägung zwischen Flächen- und Investitionsbedarf einerseits und der angestrebten Wandlungsfähigkeit andererseits.

III.1.2 Redundanzen

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Robustheit von Produktionssystemen und GPN besteht im systematischen Aufbau von Redundanzen. Diese werden als zusätzliche Mittel verstanden, die einem System zur Erfüllung einer Funktion zur Verfügung stehen und damit eine gezielte Überausstattung mit substituierbaren Ressourcen oder Strukturen darstellen.

Redundanzen, etwa durch zusätzliche Lieferanten oder Sicherheitsbestände, sind folglich ein zentraler Hebel, um die Resilienz von Produktionsnetzwerken zu stärken. Redundanzen umfassen das bewusste Vorhalten von Alternativen, Puffern oder zusätzlichen Kapazitäten, um auf Störungen reagieren zu können. Redundanzen leisten einen wichtigen Beitrag, die Handlungsfähigkeit von GPN im Störkontext kurzfristig aufrechtzuerhalten. Sie schaffen Handlungsspielräume, wenn unerwartete Ereignisse eintreten. So wird sichergestellt, dass das GPN unter schwierigen Bedingungen funktionsfähig bleibt, ohne dass die Leistungsfähigkeit vollständig einbricht. Redundanzen wirken als Puffer, indem sie die Abhängigkeit von einzelnen Lieferanten oder Standorten reduzieren. Durch Multiple Sourcing oder strategische Bestände können Engpässe aufgefangen werden. Gleichzeitig erzeugen Redundanzen ein Spannungsfeld zwischen Resilienz und Effizienz, da sie zusätzliche Kosten verursachen, die Planung und Steuerung erschweren und insbesondere bei partnerübergreifenden Abhängigkeiten den Abstimmungsbedarf erhöhen können.

Neben den klassischen Ansätzen wie Multiple Sourcing oder Beständen gewinnt zudem die gezielte Beschaffung von Altteilen und deren industrielles Remanufacturing an Bedeutung und kann als zusätzliche Bezugsquelle in die Wertschöpfung integriert werden. Insbesondere bei kritischen Komponenten besteht oft eine starke Abhängigkeit von einzelnen Lieferanten oder Regionen. Die Einführung von Remanufacturing erhöht somit die Versorgungs- und Lieferfähigkeit durch strukturelle Diversifikation. Dabei wird Redundanz nicht nur durch zusätzliche Lieferanten, sondern auch durch den Aufbau interner oder netzwerkbasierter Aufbereitungsfähigkeiten geschaffen. Durch die Aufbereitung gebrauchter Komponenten entstehen folglich parallele Versorgungsoptionen. Gleichzeitig führt die Einführung von Remanufacturing zu Herausforderungen insbesondere in Bezug auf Qualität und hinsichtlich der Unsicherheit bezüglich der Rücklaufmenge. Zudem müssen technische und regulatorische Anforderungen an aufbereitete Komponenten erfüllt werden.

III.1.3 Predictive Maintenance

Die Maßnahmenkategorie Predictive Maintenance umfasst die vorausschauende Instandhaltung, welche eine möglichst optimale Planung von Instandhaltungstätigkeiten erlaubt, sodass entsprechende Tätigkeiten vor dem Ausfall, allerdings später als bei der klassischen präventiven Instandhaltung, umgesetzt werden. Dies geschieht auf der Basis von Prognosen der verbleibenden Lebensdauer von Systemen. Das Ziel ist die Reduzierung von sowohl ungeplanten Maschinenausfällen als auch von Instandhaltungskosten, weshalb sie ausschließlich auf Maschinenebene zum Einsatz kommen.

Zur Umsetzung einer zustandsbasierten Instandhaltung durch Predictive Maintenance auf Maschinenebene werden anhand datengetriebener Ansätze technische Degradationsprozesse frühzeitig erkannt und Wartungsmaßnahmen zustandsbasiert statt zeitbasiert geplant. Durch die kontinuierliche Erfassung und Analyse von Sensordaten können schleichende Verschleißprozesse, Überlastungen oder instabile Betriebszustände identifiziert werden, bevor es zu Ausfällen kommt. Wartungsmaßnahmen können gezielt geplant, Ersatzteile vorausschauend beschafft und dadurch ungeplante Stillstände reduziert sowie die Anlagenverfügbarkeit erhöht werden. Besonders relevant ist dies für kritische und schwer zugängliche Komponenten, deren Ausfall mit hohem Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Dies kann sich positiv auf die mittlere Betriebsdauer zwischen Ausfällen auswirken und dadurch die Stabilität des gesamten Produktionssystems stärken. Die Umsetzung erfordert ein tiefes Verständnis der Maschinen und ihrer Verschleißmechanismen, ein durchdachtes Sensorkonzept inklusive Auswahl, Positionierung und Abstraten sowie eine geeignete IT-Infrastruktur zur Datenverarbeitung, etwa über Edge- oder Cloud-Systeme. Dies ist insbesondere für Bestandsanlagen eine große Herausforderung. Durch Ansätze wie Brownfield Sensoring, d. h. eine Nachrüstung zusätzlicher Sensoren zur Erfassung aussagekräftiger Daten, können jedoch auch Bestandsmaschinen, die noch nicht über ausreichende Datenerfassungsmöglichkeiten verfügen, für Predictive Maintenance befähigt werden. Da im Kontext von Predictive Maintenance häufig Methoden des maschinellen Lernens zur Anwendung kommen, sind die Gewinnung von Verschleißdaten, vor allem sogenannten „Negativ-Daten“, sowie der Umgang mit großen Datenmengen weitere Herausforderungen bei der Umsetzung. Auch die Übertragbarkeit von Modellen auf unterschiedliche Maschinen ist oft eingeschränkt. Insgesamt ermöglicht die Maßnahme eine deutliche Steigerung der Effizienz, Planbarkeit und Resilienz in der industriellen Instandhaltung. Die Einführung erfolgt typischerweise iterativ, beginnend mit Pilotanwendungen bis hin zur Integration in den operativen Betrieb.

III.1.4 Systematisches Risikomanagement

Systematisches Risikomanagement ist ein strukturierter und kontinuierlicher Prozess zur (datenbasierten) Steuerung von Risiken in Produktionssystemen mit dem Ziel, deren Stabilität und Resilienz nachhaltig zu gewährleisten. Während diese Maßnahme häufig auf dem Aufbau von Redundanzen beruht, kann bspw. durch Ansätze wie die KI-gestützte Unterstützung von Mitarbeitenden in Montage- und Prüfprozessen mittels Werkerassistenzsystemen die Robustheit von Produktionssystemen, insbesondere in Montage- und Prüfprozessen, erhöht werden. So können unter anderem Wearables und Attachables sowie optische Qualitätskontrollen, die Mitarbeitende bei der korrekten Ausführung von Montageschritten unterstützen, typische Störungen wie Fehlmontagen, Reihenfolgefehler, Qualitätsschwankungen und Taktzeitabweichungen reduzieren, die insbesondere bei hoher Variantenvielfalt und häufig wechselndem Personal auftreten. Dies wird erreicht, indem sie komplexe Montageprozesse strukturiert und visuell unterstützt. Dadurch können die kognitive Belastung der Werker reduziert, die Prozesssicherheit erhöht und die Fehlerwahrscheinlichkeit gesenkt werden. Auch die Einarbeitungszeit neuer Mitarbeitender lässt sich verkürzen, wodurch die Produktion auch bei Personalwechseln stabil bleibt. Für die Umsetzung wird eine klar

definierte Prozessstruktur mit standardisierten Arbeitsabläufen, Variantenlogiken und Qualitätsanforderungen benötigt. Zudem ist die frühzeitige Einbindung der Mitarbeitenden entscheidend, um relevante Risiken zu identifizieren und die Akzeptanz der Assistenzsysteme sicherzustellen. Fehlt diese Akzeptanz, kann die Wirksamkeit erheblich beeinträchtigt werden. Eine geeignete Integration in bestehende Arbeitsabläufe sowie transparente Kommunikation über Nutzen und Grenzen der Systeme sind ebenfalls zentrale Voraussetzungen. Des Weiteren sollten Prozessdaten kontinuierlich gepflegt werden.

III.2 Speed & Span

„Speed“ beschreibt die Geschwindigkeit, mit der ein System seinen Zustand ändern kann. Mit „Span“ wird die Menge an Möglichkeiten beschrieben, die ein System hat, wenn es seinen Systemzustand aktiv ändern muss. Dies kann bspw. Produkte, Prozesse, Kapazitäten und Szenarien umfassen. Beide Ansätze kommen zum Einsatz, wenn das System über seinen Flexibilitätskorridor hinausgehen muss. Als exemplarische Möglichkeiten zur Verbesserung von „Speed & Span“ werden im Folgenden die Maßnahmen „Kollaboration mit Partnerunternehmen“, „Intelligente Produktionssteuerung“ sowie „Volumen- und Variantenflexibilität“ näher ausgeführt.

III.2.1 Kollaboration mit Partnerunternehmen im Netzwerk

Kollaboration in GPN bezeichnet die strukturierte, koordinierte und vertrauensbasierte Zusammenarbeit autonomer Akteure, die durch einen standardisierten und geschützten Austausch von Daten, Informationen und Entscheidungsgrundlagen ermöglicht wird, um gemeinsame Wertschöpfungsziele zu erreichen. Dabei werden Kapazitäten gemeinsam genutzt und Lasten aufgeteilt. Für eine erfolgreiche Umsetzung sollten alle Parteien einen Nutzen aus der Zusammenarbeit ziehen. Nur dann können gemeinsame Ziele erreicht werden, die über die Möglichkeiten der einzelnen Akteure hinausgehen.

Konkret geht eine Umsetzung von Kollaboration häufig mit dem partnerschaftlichen Austausch von Informationen einher, ohne die Datensouveränität der einzelnen Partner zu gefährden. Hierzu können standardisierte Schnittstellen, sichere Datenräume und gemeinsame Referenzmodelle eingesetzt werden. Kollaboration verbessert die Resilienz und Effizienz in GPN, indem sie eine koordinierte statt isolierte Entscheidungsfindung ermöglicht. Dadurch steigen Qualität, Planungssicherheit und Wirtschaftlichkeit, während Ausschuss reduziert und Prozesse stabilisiert werden. Hierdurch werden zentrale Herausforderungen wie Informationsasymmetrien, mangelndes Vertrauen und fehlende Standardisierung im Datenaustausch adressiert. Durch die Bereitstellung und Nutzung von Qualitäts-, Prozess-, Kapazitäts- und Logistikdaten können Störungen frühzeitig erkannt, Produktionsprozesse besser koordiniert und fundierte Entscheidungen auf Netzwerkebene getroffen werden. Dies ermöglicht unter anderem eine verbesserte Qualitätssteuerung, dynamische Kapazitätsallokation sowie simulationsbasierte Resilienzanalysen. Die Umsetzung erfordert sowohl technische als auch organisatorische Voraussetzungen. Dazu zählen inter-

operable IT-Systeme, standardisierte Datenmodelle und klare Governance-Regeln für Datennutzung und -zugriff. Die Sicherstellung der Datensouveränität stellt hierbei eine zentrale Herausforderung dar. Ebenso wichtig sind Vertrauen zwischen den Partnern sowie transparente Anreizmechanismen. Die Einführung erfolgt schrittweise über Pilotanwendungen und wird iterativ erweitert. Auch kulturelle und organisatorische Veränderungen sollten beachtet werden.

III.2.2 Intelligente Produktionssteuerung

Durch eine intelligente Produktionssteuerung können Produktionsabläufe datenbasiert und adaptiv gesteuert werden, um sie hinsichtlich multipler Zielgrößen unter dynamischen Bedingungen zu optimieren. Ziel ist folglich, einen realitätsnahen und kontinuierlich anpassbaren Produktionsplan zu erstellen, der als operatives Steuerungsinstrument dient. Dies kann durch die gleichzeitige Optimierung mehrerer Zielgrößen wie Durchlaufzeit, Termintreue, Rüstaufwand und Energieverbrauch erreicht werden. Durch intelligente Produktionssteuerungen wird zudem eine schnelle Reaktion auf Störungen ermöglicht, indem Pläne dynamisch angepasst werden, wodurch Produktionsprozesse stabilisiert und die Ressourcenauslastung verbessert werden kann. Im Gegensatz zu klassischen, statischen Planungen können intelligente Produktionssteuerungen neben Bearbeitungszeiten auch zusätzliche Einflussgrößen wie Rüstfolgen, alternative Maschinen, Wartungsfenster, Personalverfügbarkeit sowie Energiepreise berücksichtigen. Adressiert werden typische Herausforderungen moderner Fertigungssysteme, darunter kleine Losgrößen, häufige Rüstvorgänge, Maschinenausfälle, Wartungen sowie schwankende Energiepreise. Klassische Ansätze stoßen hier an ihre Grenzen, da sie diese Dynamiken nicht ausreichend berücksichtigen. Die Umsetzung erfordert eine umfassende Datenintegration aus verschiedenen IT-Systemen wie ERP, MES oder Energiemanagementsystemen. Neben technischen Voraussetzungen sind organisatorische Anpassungen notwendig, insbesondere hinsichtlich transparenter Entscheidungsregeln, klarer Verantwortlichkeiten und einer datenbasierten Arbeitsweise. Auch die Akzeptanz der Mitarbeitenden spielt eine zentrale Rolle. Herausforderungen bestehen insbesondere in der Datenqualität, der Integration heterogener Systeme, der Komplexität der Planungsalgorithmen sowie in Zielkonflikten zwischen verschiedenen Optimierungszielen.

III.2.3 Skalierbare Kapazitäten und Wertschöpfungstiefe

Unter skalierbaren Kapazitäten und Wertschöpfungstiefen wird die Fähigkeit eines Produktionssystems verstanden, Volumen und Umfang der Wertschöpfung modular und bedarfsgerecht anzupassen, um unter dynamischen Bedingungen effizient und resilient zu bleiben. Skalierbarkeit ermöglicht es einem Produktionssystem, zu atmen, d. h. sich zu erweitern oder zu reduzieren. Je nach Betrachtungsebene gibt es unterschiedliche Maßnahmen, wobei im Folgenden näher auf „Make-Swing-Buy“, „Rekonfiguration in GPN“, „Matrixproduktion“ sowie die „Flexibilisierung von Produktionsressourcen“ eingegangen wird.

III.2.3.1 Make-Swing-Buy

Ein „atmendes“ Produktionsportfolio erweitert die klassische Make-or-Buy-Logik um die Kategorie Swing. Diese ermöglicht es, Produktionsvolumen kurzfristig und flexibel zwischen Eigenfertigung, anderen Produktionsstandorten und externen Lieferanten zu verschieben. Ziel ist eine auslastungsorientierte, kurzfristig anpassbare Allokation von Produktionsbedarfen. Im Umfeld volatiler Nachfragen, globaler Wettbewerbsdynamiken und schwankender Maschinenverfügbarkeiten führen statische Make-or-Buy-Entscheidungen zu einer Über- oder Unterauslastung in der eigenen Fertigung und damit zu wirtschaftlichen Verlusten. Ein vorgedachter und flexibler Ansatz zur kurzfristigen Evaluation von Make-or-Buy für Swing-Teile erhöht die Reaktionsfähigkeit und stabilisiert die eigene Kapazitätsauslastung. Um Make-Swing-Buy erfolgreich zu gestalten, ist eine systematische Analyse von GPN, Fähigkeiten und Teileportfolio notwendig, um die eigenen Bauteile technisch zu bewerten und in die Kategorien Make, Swing und Buy zu klassifizieren. Darauf aufbauende Entscheidungsregeln, zusammen mit passenden Prognosetools und flexibler Gestaltung von Lieferantenverträgen ermöglichen eine situationsabhängige Allokation. Gleichzeitig erfordert die Identifikation geeigneter Swing-Teile hohe Transparenz über technische Anforderungen, interne Fähigkeiten und Lieferantenkompetenzen. Mit letzteren sind zudem geeignete Vertragsmodelle zu verhandeln, um kurzfristige Anfragen für Swing-Teile zuverlässig bedienen zu können.

III.2.3.2 Rekonfiguration von GPN

Durch die Rekonfiguration von GPN, d. h. der flexiblen Verlagerung von Produktionsressourcen zwischen Standorten und Linien eines GPN, sollen Produktionsstrukturen flexibel an veränderte Anforderungen wie schwankende Nachfrage, Produktänderungen oder Standortverschiebungen angepasst werden. Ohne gezielte Anpassung entstehen häufig Über- oder Unterauslastungen, unnötige Investitionen sowie Lieferverzögerungen. Zudem können Umbau- und Transferprozesse temporäre Produktionsausfälle verursachen. Durch die Befähigung eines GPN zur Rekonfiguration können vorhandene Produktionsfähigkeiten standortübergreifend effizient genutzt, Investitionen minimiert und gleichzeitig die Lieferfähigkeit sichergestellt werden. Dabei werden strukturelle Anpassungen eng mit der Produktions- und Auftragsplanung verzahnt, um negative Effekte durch Umbauten zu reduzieren. Die Maßnahme wirkt auf mehreren Ebenen. Sie reduziert langfristig Investitionen durch bessere Nutzung bestehender Ressourcen, verbessert mittelfristig die Lieferfähigkeit und steigert insgesamt die Flexibilität und Wirtschaftlichkeit des Produktionsnetzwerks. Gleichzeitig ist bei der Umsetzung von Rekonfiguration zunächst die Schaffung der technischen Voraussetzung zur Rekonfiguration eine zentrale Herausforderung, da sie eine hohe technische Fertigungsflexibilität bedingt. Zudem ist ein hohes Maß an Transparenz über Kapazitäten, Fähigkeiten und Kosten sowie eine enge Abstimmung zwischen strategischer und operativer Planung notwendig, um Anpassungsbedarfe sinnvoll zu identifizieren und Rekonfigurationsmaßnahmen an geeigneter Stelle in die laufende Produktion zu integrieren.

III.2.3.3 Matrixproduktion

Die Matrixproduktion ist ein flexibles Produktionskonzept, bei dem Maschinen und Fertigungsmodule nicht linear angeordnet sind, sondern in einer netzartigen Struktur miteinander interagieren. Abhängig von ihrem jeweiligen Funktionsumfang übernehmen diese Module unterschiedliche Bearbeitungsschritte oder fertigen diverse Produktvarianten. Die Materialflüsse erfolgen hierbei nicht fest sequenziell, sondern werden situativ über intelligente Steuerungen organisiert. Dadurch können Produktionsprozesse dynamisch angepasst und alternative Bearbeitungsrouten genutzt werden. Hierdurch sollen die Anpassungsfähigkeit und Resilienz von Produktionssystemen gegenüber Störungen wie Nachfrageschwankungen, Lieferengpässen, Maschinenausfällen oder Personalausfällen erhöht werden. So können bspw. Produktionsausfälle einzelner Maschinen durch Umverteilung von Aufträgen kompensiert werden, wodurch die Systemstabilität steigt. Gleichzeitig ermöglicht die Matrixproduktion insbesondere in variantenreichen und dynamischen Umgebungen eine schnellere Anpassung an veränderte Marktanforderungen. Im Gegensatz zu klassischen Linienproduktionen ermöglicht die Matrixproduktion eine situative Steuerung der Materialflüsse sowie eine flexible Zuordnung von Aufträgen zu verfügbaren Ressourcen. Dies führt zu einer besseren Nutzung vorhandener Kapazitäten und reduziert die Abhängigkeit von einzelnen Anlagen. Die Umsetzung erfordert modulare und standardisierte Produktionsressourcen, flexible Materialflusssysteme sowie eine leistungsfähige digitale Infrastruktur. Dazu gehören unter anderem Produktionssysteme, Sensorik, digitale Zwillinge und KI-gestützte Steuerungsalgorithmen. Organisatorisch ist ein Wandel hin zu adaptiven und datenbasierten Planungs- und Steuerungsprozessen notwendig. Die damit einhergehenden Herausforderungen liegen insbesondere in der erhöhten Systemkomplexität, dem Bedarf an leistungsfähigen Steuerungssystemen sowie höheren Investitionskosten.

III.2.3.4 Flexibilisierung von Produktionsressourcen

Durch die Flexibilisierung von Produktionsressourcen wird die Fähigkeit eines Produktionssystems, seine Wertschöpfungstiefe und sein Produktionsvolumen schnell und flexibel an veränderte Anforderungen anzupassen, verbessert. Durch flexible Produktionsressourcen können schwankende Produktionsmengen, technische Ausfälle einzelner Maschinen sowie Produktänderungen kompensiert werden. Klassische, stark spezialisierte Produktionsanlagen reagieren häufig unflexibel auf solche Veränderungen. Flexible Produktionsressourcen erlauben es hingegen, Produktionsaufgaben bei Bedarf umzuverteilen und Ausfälle einzelner Einheiten zu kompensieren.

Diese Flexibilisierung kann bspw. durch eine Modularisierung von Produkten und Produktionsprozessen erreicht werden. Hierdurch kann flexibel auf schwankende Stückzahlen, hohe Variantenvielfalt sowie Änderungen in Produkten, Materialien und Prozessen reagiert werden, ohne dass umfangreiche physische Umbauten erforderlich sind. Ziel ist eine robuste und wirtschaftliche Produktion, die sich sowohl für kleine Losgrößen als auch für skalierbare Volumina eignet. Störungen können auf Teilbereiche begrenzt und schneller behoben werden, während sich Kapazitäten durch Hinzufügen von Modulen flexibel skalieren lassen. Gleichzeitig werden Stillstandszeiten reduziert und die Produktionsstabilität verbessert.

Grundlage bildet ein Baukastenprinzip, bei dem sowohl Produkte als auch Produktionsprozesse in standardisierte Module unterteilt werden. Einheitliche Schnittstellen gewährleisten die Kombinierbarkeit der Bausteine. Prozesse werden so gestaltet, dass Anpassungen möglichst über Parameter erfolgen können, wodurch Variantenwechsel schnell und effizient umgesetzt werden. Ergänzend ist eine leistungsfähige Steuerungs- und IT-Architektur erforderlich, die Parameter verwaltet und Änderungen kontrolliert. Qualitätssicherung und Rückverfolgbarkeit spielen dabei ebenso wie der Einsatz lokaler, kontrollierter Prozessumgebungen zur Stabilisierung sensibler Fertigungsschritte eine zentrale Rolle. Gleichzeitig geht diese Modularisierung mit einem erhöhten Validierungsaufwand für flexible Prozesse einher.

Neben der Modularisierung ist bspw. der Einsatz standardisierter, baugleicher 6-Achs-Industrieroboter als modulare Produktionseinheiten ein zentraler Hebel zur Flexibilisierung von Produktionsressourcen. Diese Roboter können je nach Bedarf kombiniert, erweitert oder reduziert werden, wodurch sich Produktionskapazitäten schnell an veränderte Anforderungen anpassen lassen. Zur Erweiterung der Prozessfähigkeit und Kompensation geringerer Steifigkeit können mehrere Roboter mechatronisch gekoppelt werden, wodurch auch anspruchsvollere Fertigungsprozesse realisiert werden können. Dadurch entsteht ein vielseitiges System, das sowohl unterschiedliche Bauteile als auch variierende Produktionsmengen effizient abdecken kann. Produktionskapazitäten können dynamisch angepasst und Aufgaben bei Störungen umverteilt werden, was Stillstandszeiten reduzieren kann. Die Umsetzung erfordert eine konsequente Standardisierung, modulare Anlagenarchitektur sowie geeignete Steuerungs- und Regelungskonzepte für die koordinierte Zusammenarbeit der Roboter. Standardisierte Schnittstellen und digitale Planungs- und Simulationstools unterstützen die flexible Integration und Anpassung des Systems. Herausforderungen ergeben sich insbesondere durch die technische Komplexität, etwa bei der Synchronisation gekoppelter Roboter, sowie die Entwicklung leistungsfähiger Steuerungssoftware und die Sicherstellung von Datenkonsistenz.

III.3 Sensitivity

Sensitivität bezeichnet die Fähigkeit eines Produktionssystems, relevante Veränderungen, Störungen oder Abweichungen in seinen internen Zuständen oder externen Einflussgrößen frühzeitig zu erkennen, präzise zu differenzieren und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Systemleistung zu bewerten. Basierend auf dieser Bewertung kann dann eine Reaktion geplant werden, wie die Anpassung gestaltet werden soll. Im Folgenden werden exemplarisch die Maßnahmen „Traceability“, „Predictive Analytics“ sowie „Digitale Zwillinge“ vorgestellt.

III.3.1 Traceability

Traceability ist die Fähigkeit, produkt- und prozessbezogene Informationen entlang des gesamten Produktlebenszyklus zu erfassen und bereitzustellen. Dadurch werden die Transparenz und Nachverfolgbarkeit gewährleistet, sodass Unternehmen effizienter, zuverlässiger und kundenorientierter arbeiten können.

Insbesondere GPN sind besonders anfällig für Probleme wie Auftragsänderungen, Qualitätsabweichungen oder technische Änderungen, deren Auswirkungen häufig durch unzureichenden und verzögerten Informationsfluss verstärkt werden. Durch eine systematische Gestaltung des Informationsaustauschs sowohl innerhalb von Fabriken als auch zwischen Netzwerkpartnern können verkürzte Reaktionszeiten und eine schnellere Eingrenzung von Störungen erreicht werden. Unterstützend wirken hierbei insbesondere digitale Technologien wie bspw. digitale Produktpässe, welche produktbezogene Informationen digital über den gesamten Lebenszyklus hinweg erfassen und somit Transparenz und Nachverfolgbarkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette schaffen. Das Ziel digitaler Produktpässe ist die Reduktion von Informationsasymmetrien sowie die Verbesserung von Entscheidungsprozessen. Gleichzeitig können somit auch neue Wertschöpfungsstrukturen wie die Kreislaufwirtschaft unterstützt werden. Durch die Bereitstellung relevanter Informationen wie CO₂-Emissionen, Bauteilzusammensetzung oder Wartungshistorien können effizientere Reparatur-, Wiederverwendungs- und Recyclingstrategien umgesetzt werden. Die Maßnahme verbessert die Entscheidungsqualität und reduziert Suchaufwände, da relevante Produktinformationen eindeutig und rollenbasiert abrufbar sind. Dadurch können Prozesse beschleunigt und Fehler vermieden werden. Digitale Produktpässe aggregieren Daten aus Herstellung, Nutzung sowie End-of-Life und stellen diese verschiedenen Akteuren wie Unternehmen, Behörden und Endkunden bereit. Dabei bleibt die Datenspeicherung dezentral bei den jeweiligen Unternehmen, während der Zugriff bspw. über eine Gaia-X-basierte Infrastruktur erfolgen kann, wodurch Datensouveränität gewährleistet wird. Die Implementierung erfordert eine durchgängige Datenerfassung entlang der Lieferkette sowie die Nutzung standardisierter Schnittstellen und Technologien wie Verwaltungsschalen und Datenräume. Besonders für kleine und mittlere Unternehmen, die häufig nicht über die notwendige IT-Infrastruktur verfügen, kann dies eine Herausforderung darstellen. Zudem kann die Bereitschaft zur Datenweitergabe durch wirtschaftliche oder strategische Interessen eingeschränkt sein.

III.3.2 Predictive Analytics

Vorhersagemodelle für Störungen und Nachfrage sind datenbasierte Prognoseinstrumente zur frühzeitigen Antizipation zukünftiger Abweichungen und Entwicklungen in Produktionssystemen. In diesem Kontext zielen Methoden wie z. B. Predictive Analytics darauf ab, Trends und schleichende Abweichungen frühzeitig zu erkennen. Bspw. ist auf Maschinenebene hierbei die kontinuierliche Erfassung und Analyse von Prozess- und Sensordaten Grundvoraussetzung. Somit lassen sich Störungen adressieren, die sich nicht abrupt, sondern schrittweise entwickeln. Hierzu zählen etwa eine zunehmende Instabilität des Prozesses oder eine allmähliche Qualitätsverschlechterung. Durch Predictive Analytics sollen solche Entwicklungen frühzeitig sichtbar gemacht und eine datenbasierte Grundlage für proaktive Entscheidungen geschaffen werden. Aufgrund der vorausschauenden Prozessüberwachung ist es möglich, nicht erst auf Grenzwertverletzungen zu reagieren, sondern Trends frühzeitig zu erkennen und geeignete Maßnahmen, etwa Prozessanpassungen oder Wartungen, einzuleiten. Dadurch werden Reaktionszeiten verkürzt und Risiken für Ausfälle oder Qualitätsprobleme reduziert. Für die Umsetzung ist eine leistungsfähige IT- und Dateninfra-

struktur erforderlich, die große Mengen heterogener Daten erfassen, speichern und analysieren kann. Dazu gehört die Integration von Maschinen, Sensoren und Peripheriegeräten über geeignete Schnittstellen. Zudem ist eine skalierbare Systemarchitektur notwendig, die Datenerfassung, -speicherung und -analyse strukturiert miteinander verbindet. Ergänzend sind klare organisatorische Zuständigkeiten sowie Fachwissen zur Interpretation der Daten notwendig. Wichtig ist, dass zum einen die Integration heterogener Systeme sowie die inhaltliche Interpretation der erkannten Muster gelingt und zum anderen auch das Domänenwissen für die Zuordnung von Trends zu konkreten Ursachen vorhanden ist.

III.3.3 Digitale Zwillinge

Digitale Zwillinge sind virtuelle Nachbildungen physischer Objekte, Prozesse oder Systeme. Sie sind überwiegend modellbasiert und spiegeln den Charakter, das Verhalten und die Eigenschaften des realen Objekts, Prozesses oder Systems wider. Dies geschieht in (nahezu) Echtzeit. Der digitale Zwilling wird fortlaufend mittels Daten aus dem realen System parametrisiert und gibt diesem wiederum Informationen und Entscheidungen zurück. Dadurch wird eine kurzzyklischere Entscheidungsunterstützung ermöglicht. Digitale Zwillinge sind hierbei flexibel anwendbar und können beliebige Systeme und Betrachtungsebenen umfassen. Hierdurch stellen sie eine geeignete Maßnahme zur Verbesserung der Sensitivität dar.

III.3.3.1 Digitale Zwillinge auf Netzwerkebene

Digitale Zwillinge von GPN sind modellbasierte Systeme, die Unternehmen bei mittel- und langfristigen Entscheidungen, wie etwa bei der Verteilung von Produktionsvolumina, Investitionsplanung oder der Anpassung von Netzwerkstrukturen, unterstützen. Sie basieren auf aktuellen Unternehmensdaten und ermöglichen eine transparente Darstellung komplexer Zusammenhänge innerhalb des GPN. Dadurch können Unternehmen schneller und gezielter auf Veränderungen wie Nachfrageschwankungen, technologische Entwicklungen oder Störungen in Lieferketten reagieren und zukünftige Szenarien frühzeitig analysieren. Digitale Zwillinge verbessern die Entscheidungsqualität und -geschwindigkeit erheblich. Sie ermöglichen sowohl reaktive als auch vorausschauende Entscheidungen und reduzieren den Aufwand für Ad-hoc-Analysen. Zudem entlasten sie Entscheidungsträger und helfen, Unsicherheiten besser zu verstehen. Die Umsetzung erfordert sowohl technologische Investitionen als auch organisatorischen Wandel. Notwendig sind verfügbare und strukturierte Daten sowie Expertise in der Modellierung. Ein iterativer, modularer Ansatz gilt als sinnvoll: Zunächst wird ein einzelner Entscheidungsprozess modelliert und genutzt, bevor das System schrittweise erweitert wird. So kann früh ein Mehrwert erzielt und die Akzeptanz im Unternehmen gesteigert werden, wobei vor allem die Datenverfügbarkeit sowie die erforderliche Modellierungskompetenz dabei zentrale Herausforderungen darstellen.

III.3.3.2 Digitale Zwillinge auf Fabrikebene

Auf Fabrikebene dienen digitale Zwillinge der Erstellung eines virtuellen Abbilds eines realen Produktionssystems, das Strukturen, Prozesse und aktuelle Zustände integriert darstellt. Dazu zählen

Maschinen, Materialflüsse, Prozesszeiten sowie Daten aus ERP-, MES- und weiteren IT-Systemen. Ziel ist es, Störungen und Veränderungen, wie bspw. Maschinenausfälle, Nachfrageschwankungen oder Layoutanpassungen, zunächst modellhaft zu analysieren, um fundierte Entscheidungen zu treffen. Der digitale Zwilling erhöht Transparenz über Produktionsprozesse und ermöglicht die Analyse von Engpässen, Abhängigkeiten und Systemeffekten. Änderungen können vorab simuliert und optimiert werden, wodurch Risiken reduziert und Reaktionszeiten verkürzt werden. Insbesondere bei Störungen lassen sich Handlungsalternativen schnell bewerten und gezielt umsetzen. Eine konsistente und integrierte Datengrundlage aus verschiedenen Quellen sowie geeignete Simulationsplattformen sind beim Aufbau erforderlich. Wichtig sind zudem klare Zieldefinitionen (z. B. strategische Planung oder operative Steuerung) und organisatorische Rollen für Modellpflege, Datennutzung und Entscheidungsfindung. Beim Aufbau ist ein iteratives Vorgehen mit Pilotprojekten, bei denen das Modell schrittweise aufgebaut, validiert und erweitert wird, gängige Praxis. Herausforderungen bestehen vor allem in der Datenqualität, Modellkomplexität und Integration heterogener IT-Systeme. Zudem erfordert die Nutzung ein organisatorisches Umdenken sowie die kontinuierliche Pflege des Modells, um Abweichungen zur Realität zu vermeiden.

III.3.3.3 Digitale Zwillinge auf Maschinenebene

Digitale Maschinenzwillinge zielen darauf ab, das Verhalten von Produktionsanlagen mithilfe eines multiphysikalischen Simulationsmodells realitätsnah abzubilden. Dabei werden geometrische, physikalische sowie prozessbezogene Modelle mit Maschinen-, Material- und Prozessdaten verknüpft. Ziel ist es, komplexe Wechselwirkungen innerhalb der Anlage frühzeitig zu verstehen und vorherzusagen. Durch den Einsatz des digitalen Zwillings können stabile Prozessfenster identifiziert und optimale Betriebsparameter bestimmt werden. Dies ist besonders bei Material- oder Variantenwechseln von Vorteil, da hierbei Einricht- und Hochlaufzeiten reduziert sowie manuelle Versuche minimiert werden können. Gleichzeitig können die Anlagenverfügbarkeit und die Produktqualität erhöht werden. Der Aufbau eines digitalen Zwillings erfordert ein tiefes Verständnis der physikalischen und materialabhängigen Zusammenhänge, Zugriff auf Konstruktions- und Prozessdaten sowie geeignete Materialkennwerte. Zudem sind reale Messdaten notwendig, um das Modell zu parametrieren und zu validieren. Der Aufbau erfolgt iterativ, ausgehend von einem vereinfachten Grundmodell hin zu einem detaillierten Simulationsmodell. Herausforderungen bestehen vor allem in der Modellgenauigkeit, der Verfügbarkeit hochwertiger Daten sowie der Abbildung komplexer Materialverhalten. Für den praktischen Einsatz sind zudem eine ausreichende Rechenleistung und teilweise Echtzeitfähigkeit erforderlich.

III.4 Zwischenfazit

Die resilienzbezogene Aufbereitung des Stands der Technik sowie die exemplarische Ausführung potentieller Resilienzmaßnahmen aus Projekterfahrungen zeigt, dass industrielle Resilienz nicht durch einzelne isolierte Maßnahmen entsteht, sondern durch das Zusammenspiel von Robustheit, Anpassungsfähigkeit und Sensitivität. Produzierende Unternehmen müssen einerseits in der Lage sein, Störungen abzufedern und ihre operative Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten. Andererseits benötigen sie die Fähigkeit, ihre Strukturen und Entscheidungsprozesse bei veränderten Rahmenbedingungen schnell und zielgerichtet anzupassen. Hierbei ist zusätzlich eine hohe Sensitivität erforderlich, um relevante Veränderungen frühzeitig zu erkennen, deren Auswirkungen zu bewerten und geeignete Handlungsoptionen abzuleiten. Die Kernerkenntnisse des Kapitels sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Gleichzeitig verdeutlicht die Analyse, dass die Eignung einzelner Maßnahmen stark von der spezifischen Ausgangssituation eines Unternehmens abhängt. Die betrachteten Maßnahmen unterscheiden sich deutlich hinsichtlich ihres Umsetzungsaufwands, ihrer technologischen und organisatorischen Voraussetzungen sowie ihrer Wirkung auf den Ebenen Produktionsnetzwerk, Fabrik und Maschine. Während strukturelle und organisatorische Maßnahmen häufig an bestehenden Planungs-, Beschaffungs- und Managementprozessen anknüpfen, erfordern datengetriebene und technologieintensive Ansätze meist eine belastbare Datenbasis, geeignete IT-Schnittstellen und klare Verantwortlichkeiten. Welche Maßnahmen für ein Unternehmen besonders geeignet sind, hängt folglich davon ab, von welchen Einflussfaktoren es in welchem Maß betroffen ist und welches strategische Zielbild verfolgt wird. Um diese theoretisch und projektbasiert abgeleiteten Maßnahmen hinsichtlich ihrer Relevanz, Wirksamkeit, Umsetzbarkeit und Verbreitung in der Praxis zu bewerten, werden sie im folgenden Kapitel im Rahmen einer Industriebefragung empirisch validiert.

Tabelle 1: Übersicht der Erkenntnisse zu den betrachteten Mechanismen

Mechanismus	Wirkung	Beispielhafte Maßnahmen	Voraussetzungen	Herausforderungen
 ROBUSTHEIT	Begrenzung von Störungs- auswirkungen und Auf- rechterhaltung der Lei- stungsfähigkeit im Störfall	• Robustes Netzwerkdesign • Redundanzen • Predictive Maintenance • Systematisches Risikomanagement	• Transparenz über kritische Strukturen, Prozesse und Abhängigkeiten	• Zusätzlicher Kostenaufwand • Höhere (Planungs-) Komplexität • Datenverfügbarkeit • Organisatorische Umsetzung
 SPEED & SPANNE	Schnelle und breite Anpassungsfähigkeit bei veränderten Rahmenbedingungen	• Kollaboration mit Partnerunternehmen • Intelligente Produktionssteuerung • Skalierbare Kapazitäten und Wertschöpfungstiefen	• Flexible Ressourcen • Transparente Kapazitäts- und Fähigkeitsdaten • Geeignete Steuerungslogiken	• Abstimmungsaufwand • Technische Komplexität • Integration in bestehende Planungsprozesse
 SENSITIVITÄT	Frühzeitiges Erkennen und Bewertung relevanter Veränderungen, Störungen oder Abweichungen	• Traceability • Predictive Analytics • Digitale Zwillinge	• Belastbare Datenbasis • Standardisierte Schnittstellen • Geeignete IT-Infrastrukturen • Modellierungskompetenz • Verantwortlichkeiten für Datenpflege und -nutzung	• Datenqualität • Systemintegration • Modellkomplexität • Akzeptanz

IV. Schritt 2: Industriebefragung

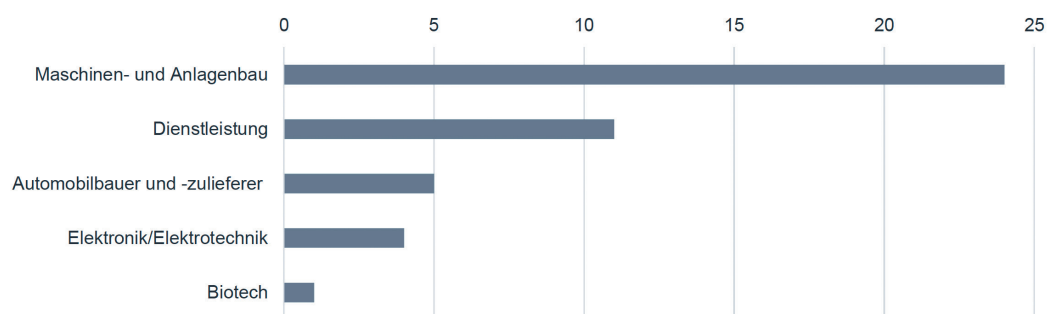
Aufbauend auf dem Stand der Technik sowie den praktischen Einblicken hinsichtlich resilienzsteigernder Maßnahmen aus dem (Forschungs-)Projektkontext werden die zugehörigen Ergebnisse im Rahmen einer Industriebefragung auf ihre Praxistauglichkeit hin überprüft. Hierfür wurde im Zeitraum von Mitte Februar 2026 bis Ende März 2026 eine empirische Analyse durchgeführt. Grundlage hierbei bildet ein basierend auf den gesammelten theoretischen Erkenntnissen erstellter Fragebogen, anhand dessen die Industriepartner zu ihrer Einschätzung hinsichtlich relevanter Einflussfaktoren sowie ihren Erfahrungen mit resilienzsteigernden Maßnahmen befragt wurden. Zielgruppe hierbei waren insbesondere produzierende Unternehmen unterschiedlicher Branchen aus Baden-Württemberg.

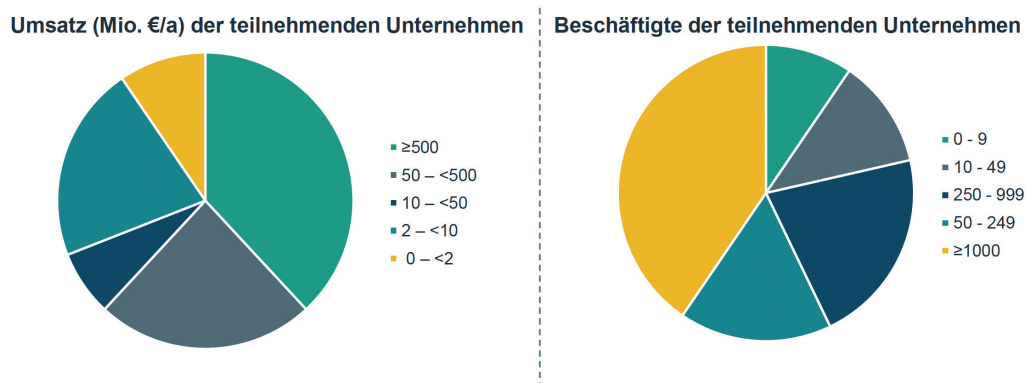
Insgesamt nahmen $n=42$ Unternehmen an der Befragung teil, die sich hinsichtlich Branche, Umsatz und mitarbeiterbezogener Unternehmensgröße unterschiedlich zusammensetzen. Die Verteilung nach Branchen zeigt einen klaren Schwerpunkt im Maschinen- und Anlagenbau, der den größten Anteil der Teilnehmenden ausmacht. Darüber hinaus sind Unternehmen aus dem Dienstleistungssektor sowie der Automobil- und Automobilzuliefererindustrie vertreten. Ergänzend umfasst der Teilnehmendenkreis Unternehmen aus den Bereichen Elektronik und Biotechnologie. Auch hinsichtlich der umsatz- und beschäftigungsbezogenen Unternehmensgröße weist der Kreis der Befragten eine heterogene Struktur auf und umfasst sowohl kleine, mittlere als auch Großunternehmen. Die Gesamtkonstellation aller befragten Unternehmen ist in Abbildung 4 zusammengefasst.

Da Unternehmen je nach Branche und Größe in unterschiedlichem Maße von Einflussfaktoren betroffen sein können, wurde aufgrund des breiten Teilnehmendenkreises der Befragung im ersten Schritt der empirischen Analyse untersucht, wie stark Unternehmen von den im Stand der Technik identifizierten Einflussfaktoren betroffen sind und in welchem Maße sie in der Lage sind, deren Auswirkungen zu bewältigen.

Abbildung 4: Gesamtkonstellation aller Befragten Unternehmen

Branchenzugehörigkeit der teilnehmenden Unternehmen (n=42)





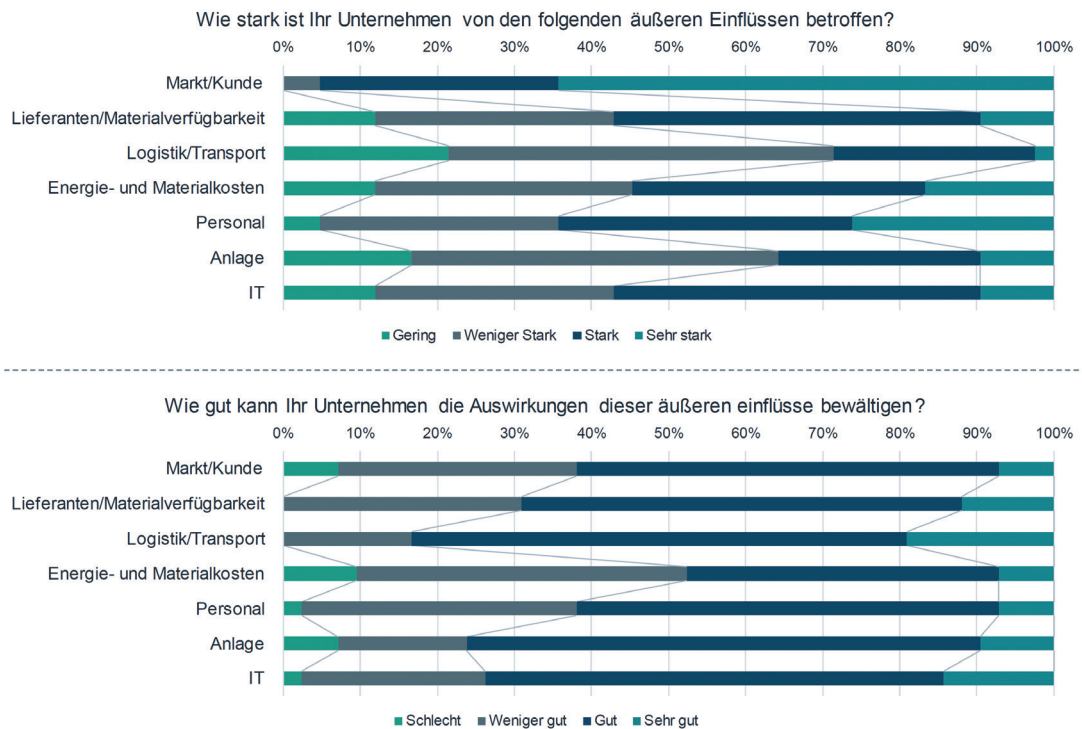
Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass insbesondere markt- und kundenbezogene Faktoren als besonders einflussstark wahrgenommen werden (Abbildung 5). Rund 90 % der befragten Unternehmen geben an, stark oder sehr stark von diesen Faktoren betroffen zu sein. Gleichzeitig schätzen Unternehmen ihre Bewältigungsfähigkeit hinsichtlich dieses Einflussfaktors als eher hoch. Etwa zwei Drittel der Unternehmen bewerten ihre Fähigkeit im Umgang mit diesen Einflüssen als gut oder sehr gut.

Ein abgeschwächtes Bild zeigt sich bei Lieferanten und der Materialverfügbarkeit. Etwa 57 % der Unternehmen sind hierbei stark bis sehr stark betroffen, können jedoch in rund 69 % der Fälle gut bis sehr gut mit entsprechenden Disruptionen umgehen.

Im Gegensatz hierzu zeigt sich im Bereich Logistik und Transport eine geringere Belastungssituation der Befragten. Lediglich 29 % der teilnehmenden Unternehmen gaben an, hiervon stark bzw. sehr stark beeinflusst zu sein. Gleichzeitig wird die Fähigkeit im Umgang mit logistikbezogenen Einflussfaktoren von 83 % als gut oder sehr gut bewertet.

Energie- und Materialkosten zählen hingegen zu den dominierenden Einflussfaktoren. Hier berichten 55 % der Unternehmen von einer starken oder sehr starken Belastungssituation. Die Fähigkeit zur Bewältigung entsprechender Einflussfaktoren fällt hierbei über alle Einflussfaktoren hinweg am niedrigsten aus: Weniger als die Hälfte der Unternehmen schätzen ihre Kompetenzen in diesem Bereich als gut oder sehr gut ein.

Abbildung 5: Wahrgenommene Belastungssituation durch externe Einflüsse und Einschätzung der unternehmerischen Bewältigungsfähigkeit



Hingegen wird der Faktor Personal von 64 % der befragten Unternehmen als stark bzw. sehr stark wahrgenommen. Weniger als lediglich 7 % der Teilnehmenden schätzen hierbei ihre Fähigkeiten im Umgang mit personellen Einflussfaktoren als sehr gut ein.

Dem gegenüber stehen anlagenbezogene Einflussfaktoren wie kurzfristige Maschinenausfälle, deren Auswirkungen von den befragten Unternehmen in lediglich 36 % der Fälle als stark bzw. sehr stark wahrgenommen werden. Zudem weist der Einflussfaktor bei den befragten Unternehmen eine hohe Bewältigungsfähigkeit auf. Weniger als ein Viertel aller Befragten schätzt seine Möglichkeiten im Umgang mit anlagenbezogenen Disruptionen als weniger gut oder schlecht ein.

Abschließend wird der Bereich IT von 57 % der Unternehmen als relevant eingeschätzt, wobei sich knapp drei Viertel der befragten Unternehmen gute oder sehr gute Möglichkeiten im Umgang mit entsprechenden Unsicherheiten attestieren.

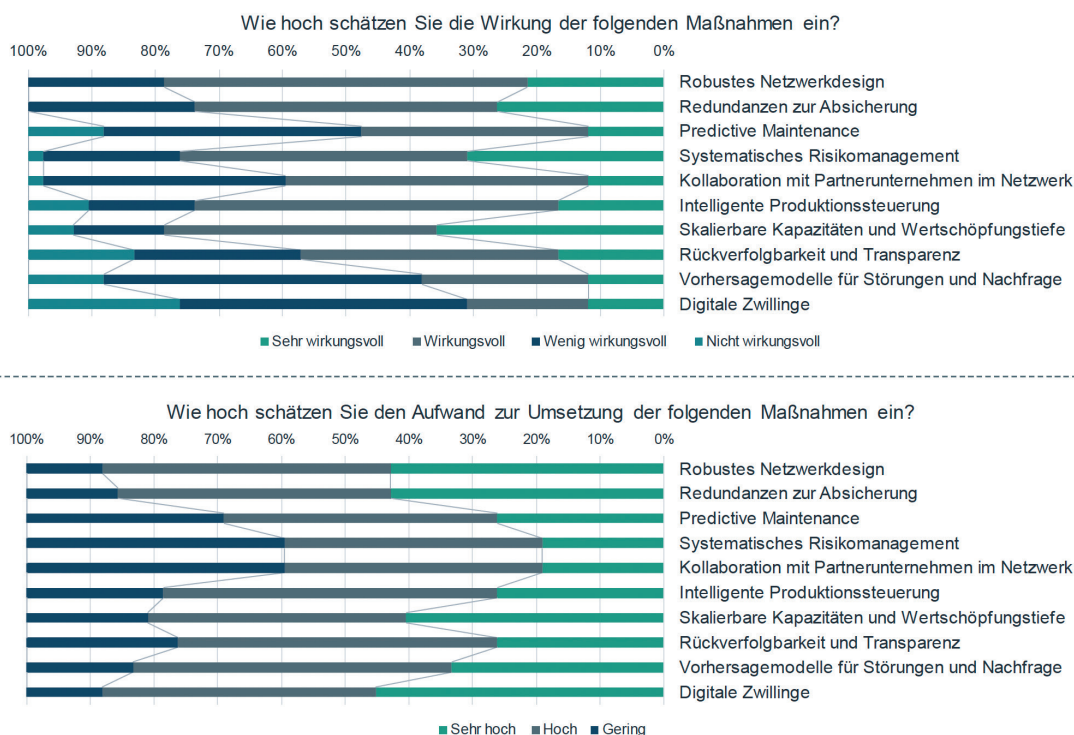
Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Unternehmen insbesondere durch externe und schwer beeinflussbare Faktoren wie Markt, Personal, Lieferketten und IT beeinflusst werden. Gleichzeitig ist die Fähigkeit zur Bewältigung dieser Einflüsse nicht in gleichem Maße ausgeprägt. Dies verdeutlicht

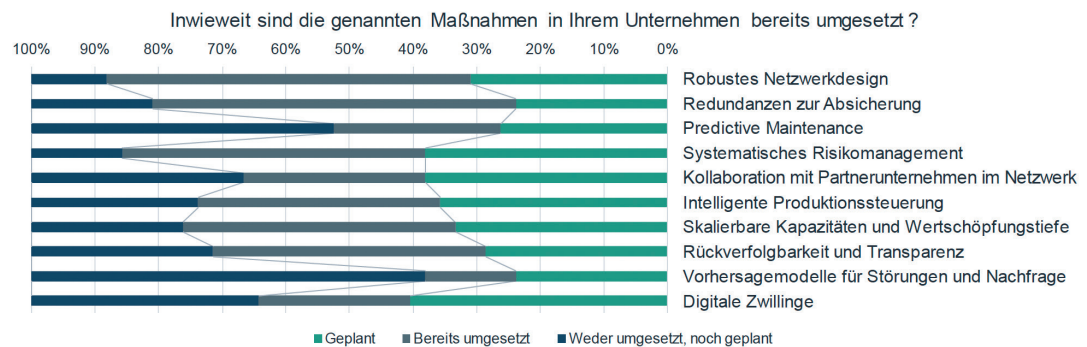
sich durch die Auswertung der Selbsteinschätzung der befragten Unternehmen hinsichtlich ihrer Fähigkeiten im Umgang mit den Auswirkungen von Störungen. Hierbei sehen sich lediglich 24 % der Unternehmen als besser als ihre Konkurrenz aufgestellt. 69 % aller befragten Unternehmen schätzen sich im Vergleich zu ihren Wettbewerbern auf einem vergleichbaren Niveau und 7 % der Unternehmen sogar auf einem schlechteren Niveau im Umgang mit den Auswirkungen von Störungen im Vergleich zu ihren Wettbewerbern ein.

Daher stehen im nächsten Schritt konkrete Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz im Fokus. Ziel ist es, die wahrgenommene Wirksamkeit dieser Maßnahmen, den damit verbundenen Umsetzungsaufwand sowie den aktuellen Implementierungsgrad in der Praxis zu untersuchen. Hierbei wurden die in Abbildung 3 eingeführten übergeordneten Maßnahmen abgefragt.

Die Bewertung der Maßnahmenwirksamkeit (Abbildung 6) zeigt insgesamt insbesondere bei strukturellen Maßnahmen ein positives Bild. Ein robustes Netzwerkdesign wird von 79 % der Unternehmen als wirkungsvoll oder sehr wirkungsvoll (davon 21 % sehr wirkungsvoll) eingeschätzt, Redundanzen zur Absicherung sogar von etwa 74 %. Auch systematisches Risikomanagement sowie skalierbare Kapazitäten werden mit 76 % bzw. 79 % mehrheitlich als wirkungsvoll bzw. sehr wirkungsvoll bewertet.

Abbildung 6: Bewertung der Wirksamkeit, des Umsetzungsaufwands und des Implementierungsstands resilienzsteigernder Maßnahmen





Demgegenüber zeigen sich bei datengetriebenen und technologieintensiven Maßnahmen differenziertere Einschätzungen. Predictive Maintenance wird bspw. lediglich von etwa 48 % als wirkungsvoll oder sehr wirkungsvoll bewertet, wohingegen rund 52 % der befragten Unternehmen nur eine geringe oder keine Wirksamkeit sehen. Ähnlich verhält es sich bei Vorhersagemodellen, bei denen etwa 62 % eine geringe oder keine Wirksamkeit angeben. Digitale Zwillinge weisen mit rund 69 % die kritischste Bewertung auf.

Gleichzeitig wird der Umsetzungsaufwand insbesondere der als wirkungsvoll bzw. sehr wirkungsvoll eingestuften Maßnahmen als tendenziell hoch bewertet. So schätzen jeweils rund 88 % der Unternehmen robustes Netzwerkdesign und Redundanzen als mit hohem oder sehr hohem Aufwand verbunden ein. Auch digitale Zwillinge (88 %) sowie intelligente Produktionssteuerung (79 %) zählen zu den aufwändigsten Maßnahmen. Demgegenüber werden Maßnahmen wie Predictive Maintenance oder systematisches Risikomanagement vergleichsweise heterogener bewertet, weisen jedoch ebenfalls signifikante Aufwände im Bereich zwischen 60 % und 70 % auf.

Der Implementierungsgrad verdeutlicht schließlich eine deutliche Diskrepanz zwischen wahrgenommener Wirksamkeit und tatsächlicher Umsetzung. Klassische Maßnahmen wie robustes Netzwerkdesign und Redundanzen sind bereits in rund 57 % der Unternehmen umgesetzt. Weitere 31 % planen deren Einführung. Auch systematisches Risikomanagement ist bei knapp der Hälfte der Unternehmen etabliert. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei technologiegetriebenen Maßnahmen erhebliche Umsetzungsdefizite. So geben rund 48 % der Unternehmen an, Predictive Maintenance weder umgesetzt noch geplant zu haben. Bei Vorhersagemodellen liegt dieser Anteil mit etwa 62 % noch höher. Auch digitale Zwillinge sind bei rund 36 % der Unternehmen weder implementiert noch geplant. Gleichzeitig befinden sich viele dieser Maßnahmen wie bspw. digitale Zwillinge mit ca. 40 % in der Planungsphase.

Zusammenfassend heben die Ergebnisse der Industriebefragung die Herausforderung produzierender Unternehmen in Baden-Württemberg insbesondere hinsichtlich externer, dynamischer und nur begrenzt direkt beeinflussbarer Einflussfaktoren hervor. Besonders hinsichtlich markt- und kundenbezogener Veränderungen, Personalverfügbarkeit, Lieferanten- und Materialverfügbarkeit sowie Energie- und Materialkosten berichten die befragten Unternehmen von einer starken Belastungssituation. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Fähigkeit zur Bewältigung dieser Einflussfaktoren nicht in allen Bereichen gleichermaßen ausgeprägt ist. Während einige Einflussfaktoren, wie bspw. Logistik, Maschinen oder IT, von vielen Unternehmen als vergleichsweise gut beherrscht eingeschätzt werden, bestehen insbesondere bei Kostenentwicklungen und personellen Einflussfaktoren Verbesserungspotentiale. Die Selbsteinschätzung der Unternehmen macht zudem deutlich, dass Resilienz bislang nur selten als klarer Wettbewerbsvorteil wahrgenommen wird, sondern die Mehrheit der befragten Unternehmen sich im Umgang mit Störungen und Veränderungen auf einem ähnlichen Niveau wie ihre Wettbewerber einschätzt. Resilienz scheint folglich weniger als Differenzierungsmerkmal, sondern häufig als notwendige Voraussetzung zur Aufrechterhaltung der eigenen Leistungsfähigkeit angesehen zu werden. Auch bei der Bewertung konkreter Maßnahmen zeigt sich ein differenziertes Bild. Strukturelle und organisatorische Maßnahmen wie robustes Netzwerkdesign, Redundanzen, systematisches Risikomanagement und skalierbare Kapazitäten werden von den Unternehmen überwiegend als wirksam eingeschätzt. Gleichzeitig sind diese Maßnahmen häufig mit hohem Umsetzungsaufwand verbunden. Datengetriebene und technologieintensive Ansätze wie Predictive Maintenance, Predictive Analytics und digitale Zwillinge weisen zwar grundsätzlich Potential zur Verbesserung von Transparenz, Sensitivität und Entscheidungsqualität auf, sind in der Praxis jedoch deutlich seltener implementiert und werden teilweise noch zurückhaltend bewertet. Dies deutet darauf hin, dass viele Unternehmen zunächst grundlegende Voraussetzungen wie Datenverfügbarkeit, Datenqualität, IT-Schnittstellen, organisatorische Zuständigkeiten und klare Anwendungsfälle schaffen müssen, bevor solche Maßnahmen breiter angewandt werden können.

V. Schritt 3: Ergebniskonsolidierung

Nachdem in den beiden vorangegangenen Schritten zunächst die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik systematisch aufbereitet und anschließend im Rahmen einer Industriebefragung empirisch eingeordnet wurden, erfolgt im dritten Schritt die Konsolidierung der Ergebnisse. Ziel dieser Ergebniskonsolidierung ist die Entwicklung eines Reifegradmodells, mit dem Unternehmen ihre unternehmensspezifische Resilienz strukturiert bewerten und daraus konkrete Handlungsbedarfe ableiten können.

Das Reifegradmodell dient als Self-Assessment-Tool und ermöglicht Unternehmen eine systematische Einordnung ihres aktuellen Ist-Zustands. Gleichzeitig werden die strategischen Zielsetzungen des jeweiligen Unternehmens berücksichtigt. Dadurch kann nicht nur bewertet werden, wie resilient ein Unternehmen in einzelnen Handlungsfeldern derzeit aufgestellt ist, sondern auch, welche Bereiche aus strategischer Sicht besonders relevant sind. Im Mittelpunkt steht somit die Identifikation der größten Lücken zwischen dem aktuellen Reifegrad und dem angestrebten Zielzustand.

Der Aufbau des Reifegradmodells folgt einer mehrstufigen Logik. Zu Beginn beantworten die teilnehmenden Unternehmen zunächst grundlegende demografische Fragen, beispielsweise zu Umsatz, Unternehmensgröße und Branche. Auf dieser Basis können nachfolgende resilienzbezogene Fragen gezielt gefiltert und an die jeweilige Unternehmenssituation angepasst werden. Anschließend erfolgt die Bewertung einzelner resilienzbezogener Fragestellungen auf einer Skala von 1 bis 4. Diese Skala beschreibt den jeweiligen Reifegrad eines Unternehmens in einem konkreten Themenfeld. Ergänzend dazu bewerten die Unternehmen für jede Fragestellung die strategische Priorität, ebenfalls auf einer Skala von 1 bis 4, von niedriger bis hoher Priorität.

Die einzelnen Fragen des Reifegradmodells orientieren sich inhaltlich an den zuvor identifizierten Maßnahmenkategorien Robustheit, Speed & Span sowie Sensitivity. Ein Beispiel hierfür ist der Themenbereich digitaler Zwillinge. Hier lautet die entsprechende Frage: „Liegen Ihre Daten verstreut in manuell gepflegten Excel-Listen oder können Sie mit einem digitalen Zwilling in Echtzeit simulieren, welche Auswirkungen der Ausfall eines Lieferanten hätte.“ Die Teilnehmenden ordnen sich hierbei einer von vier Reifegradstufen zu. In diesem Fall von manueller Datenpflege über statisches Reporting und digitalen Schatten bis hin zum digitalen Zwilling. Auf diese Weise werden abstrakte Maßnahmenkategorien in konkrete, für Unternehmen verständliche Bewertungsfragen überführt.

Aus der Gegenüberstellung von aktuellem Reifegrad und strategischer Priorität wird anschließend der jeweilige strategische Gap abgeleitet. Nach Abschluss der Bewertung werden die drei Fragestellungen mit dem größten Gap identifiziert. Diese zeigen auf, in welchen Bereichen die größten Abweichungen zwischen Ist-Zustand und Zielbild bestehen und wo folglich der dringendste Handlungsbedarf liegt. Damit erhalten Unternehmen eine transparente Einschätzung darüber, welche Schwachstellen ihre strategischen Resilienzziele am stärksten beeinträchtigen.

Für die identifizierten Handlungsfelder werden anschließend konkrete Maßnahmen vorgeschlagen. Diese Maßnahmen orientieren sich an den im Stand der Technik herausgearbeiteten Resilienzsteigernden Maßnahmen und den daraus abgeleiteten Maßnahmenkategorien. Zu jeder Maßnahme werden zusätzlich zentrale Informationen bereitgestellt. Diese beantworten die Fragen, warum die Maßnahme für die Resilienz des Unternehmens relevant ist, wie sie angewendet werden kann und welche Herausforderungen bei der Umsetzung zu berücksichtigen sind. Dadurch soll das Reifegradmodell nicht nur eine Bewertung ermöglichen, sondern Unternehmen auch eine praxisnahe Orientierung für die nächsten Umsetzungsschritte geben.

Insgesamt führt die Ergebniskonsolidierung die theoretischen Erkenntnisse aus dem Stand der Technik und die empirischen Ergebnisse der Industriebefragung in einem anwendungsorientierten Reifegradmodell zusammen. Das entwickelte Reifegradmodell unterstützt Unternehmen dabei, ihren aktuellen Resilienzstatus einzuordnen, strategische Handlungsfelder zu priorisieren und geeignete Maßnahmen zur gezielten Weiterentwicklung ihrer Resilienz abzuleiten.

VI. Fazit und Handlungsempfehlung

Die Erkenntnisse aus dem Stand der Technik, den praktischen Projekteinblicken sowie aus der Industrieumfrage zeigen, dass Resilienz für produzierende Unternehmen in Baden-Württemberg zu einer zentralen Ziel- und Gestaltungsgröße geworden ist. Insbesondere global verteilte Wertschöpfung, volatile Märkte, geopolitische Unsicherheiten, steigende Energie- und Materialkosten, Fachkräftemangel sowie technologische und regulatorische Veränderungen führen dazu, dass eine ausschließlich effizienzorientierte Betrachtung bestehender Produktions- und Lieferstrukturen im heutigen Unternehmensumfeld nicht mehr ausreichend ist. Vielmehr müssen Störungen frühzeitig erkannt und deren Auswirkungen begrenzt werden, um sich bei veränderten Rahmenbedingungen schnell und zielgerichtet anpassen zu können. Resilienz ist damit nicht nur als kurzfristige Reaktion auf einzelne Störereignisse, sondern als strategische Fähigkeit zu verstehen, die kontinuierlich entwickelt, überprüft und in unternehmerische Entscheidungsprozesse integriert werden muss. Die Studienergebnisse verdeutlichen, dass dies nicht durch eine einzelne Maßnahme erreicht wird, sondern Resilienz durch das Zusammenspiel unterschiedlicher Fähigkeiten entsteht. Unternehmen benötigen robuste Strukturen, um die Auswirkungen von Störungen zu begrenzen und ihre operative Leistungsfähigkeit aufrechtzuerhalten. Gleichzeitig müssen sie über ausreichende Anpassungsfähigkeit verfügen, um Produktionsvolumina, Kapazitäten, Wertschöpfungstiefen oder Lieferstrukturen bei Bedarf schnell verändern zu können. Um relevante Veränderungen im Unternehmensumfeld dabei möglichst frühzeitig zu erkennen, ist zudem eine hohe Sensitivität in GPN notwendig. Die Industriebefragung zeigt zudem, dass produzierende Unternehmen insbesondere von externen und nur begrenzt direkt beeinflussbaren Faktoren wie markt- und kundenbezogene Veränderungen, Lieferanten- und Materialverfügbarkeiten, Personalengpässe sowie Energie- und Materialkosten betroffen sind.

Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass die Fähigkeit zur Bewältigung dieser Einflussfaktoren nicht überall gleichermaßen ausgeprägt ist. So bestehen z. T. noch Lücken zwischen Belastungssituation und Bewältigungsfähigkeit. Zur gezielten Verbesserung der Resilienz sollten Unternehmen daher nicht unmittelbar mit Einzelmaßnahmen beginnen, sondern zunächst ihre spezifische Ausgangssituation analysieren. Hierzu gehört die Bewertung zentraler Einflussfaktoren, die Einschätzung der eigenen Bewältigungsfähigkeit sowie die Ermittlung bestehender Reifegradlücken auf den Ebenen Produktionsnetzwerk, Fabrik und Maschine. Das im Rahmen der Studie entwickelte Self-Assessment-Tool setzt genau an diesem Punkt an. Es ermöglicht Unternehmen, ihren aktuellen Resilienz-Reifegrad strukturiert zu erfassen, mit strategischen Zielvorstellungen zu vergleichen und daraus konkrete Handlungsbedarfe abzuleiten. Auf diese Weise können Unternehmen erkennen, auf welcher Betrachtungsebene die größten Potentiale bestehen und welche Maßnahmen unter Berücksichtigung von Wirksamkeit, Umsetzungsaufwand und strategischer Relevanz priorisiert werden sollten. Basierend auf den Studienergebnissen lassen sich zudem konkrete Reifegradstufen und Handlungsempfehlungen für Unternehmen ableiten.

Stufe 1: Transparenz schaffen

I. Resilienz systematisch bewerten

Unternehmen sollten zunächst eine strukturierte Eigenanalyse durchführen, um die eigene Belastungssituation durch zentrale Einflussfaktoren, die aktuelle Bewältigungsfähigkeit sowie bestehende Verbesserungspotentiale transparent zu machen. Dabei sollten die drei Ebenen Produktionsnetzwerk, Fabrik und Maschine getrennt betrachtet werden, da sich Risiken und Maßnahmen je nach Ebene deutlich unterscheiden.

Stufe 2: Absicherung der strukturellen Resilienz

II. Kritische Abhängigkeiten reduzieren

Da viele Unternehmen stark von externen Faktoren betroffen sind, ist die systematische Identifikation und Reduktion kritischer Abhängigkeiten, bspw. von einzelnen Lieferanten, Standorten, Regionen, Technologien oder Schlüsselpersonen, ein zentraler Hebel zur Steigerung der Resilienz. Dabei sollten Handlungsoptionen gezielt dort geschaffen werden, wo Störungen besonders schwerwiegende Auswirkungen hätten.

III. Redundanzen risikodifferenziert aufbauen

Auch wenn die Industriebefragung zeigt, dass Redundanzen von vielen Unternehmen als wirksame Maßnahme zur Steigerung der Resilienz eingeschätzt werden, sind diese mit zusätzlichen Kosten, höherem Planungsaufwand und Ansteigen der Komplexität verbunden. Unternehmen sollten daher eine risikobasierte Differenzierung zwischen kritischen und weniger kritischen Materialien, Kapazitäten und Prozessen vornehmen, um insbesondere für besonders störungsrelevante Bereiche gezielt Puffer, alternative Lieferanten, zusätzliche Kapazitäten oder Rückfalloptionen aufbauen zu können.

IV. Systematisches Risikomanagement leben

Systematisches Risikomanagement sollte nicht nur Risiken erfassen, sondern konkrete Entscheidungen in Planung, Beschaffung, Produktion und Instandhaltung unterstützen. Hierfür müssen Unternehmen kritische Prozessschritte identifizieren, Risiken bewerten, Verantwortlichkeiten festlegen und geeignete Frühwarnindikatoren definieren. So können bspw. in Montage- und Prüfprozessen standardisierte Arbeitsabläufe, digitale Assistenzsysteme, optische Qualitätskontrollen oder KI-gestützte Assistenzsysteme dazu beitragen, Fehlerquellen zu reduzieren, Einarbeitungszeiten zu verkürzen und die Stabilität von Qualität und Taktzeit zu erhöhen.

Stufe 3: Adaptives und datenbasiertes Resilienzmanagement

V. Datengetriebene Maßnahmen iterativ einführen

Während strukturelle und organisatorische Maßnahmen bereits heute als besonders wirksam wahrgenommen werden, zeigen datengetriebene und technologieintensive Ansätze noch deutliche Umsetzungslücken. Predictive Maintenance, Predictive Analytics, Traceability und digitale Zwillinge bieten langfristig großes Potential, um Sensitivität, Reaktionsgeschwindigkeit und letztendlich auch die Qualität von Planung und Steuerung zu erhöhen. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Einführung dieser Maßnahmen eine belastbare Datenbasis sowie eine geeignete IT-Infrastruktur voraussetzt. Für die Umsetzung ist folglich ein iteratives Vorgehen mit klar abgegrenzten Pilotanwendungen sinnvoll, bei denen zunächst Datenverfügbarkeit, Datenqualität und wirtschaftlicher Nutzen geprüft werden. Erfolgreiche Anwendungen können anschließend schrittweise skaliert und in bestehende Planungs- und Steuerungsprozesse integriert werden.

VI. Über flexible Kapazitäten und Kollaborationen atmen

Neben Robustheit ist insbesondere die schnelle Anpassung von Produktionsvolumina, Ressourcen und Wertschöpfungstiefen bei veränderten Rahmenbedingungen ein zentraler Hebel zur Schaffung unternehmerischer Resilienz. Hierzu sind insbesondere flexible Kapazitätsmodelle, Make-Swing-Buy-Ansätze, kollaborative Netzwerke und intelligente Produktionssteuerungen zentrale Hebel, welche jedoch eine hohe Transparenz über interne Fähigkeiten, verfügbare Kapazitäten, technische Anforderungen und Lieferantenkompetenzen sowie eine Berücksichtigung geeigneter Governance-Regeln und Aspekte der Datensouveränität voraussetzen.

VII. Resilienz als kontinuierlicher Managementprozess

Im Kontext eines dynamischen Umfelds stellt Resilienz keinen einmalig erreichbaren Zielzustand, sondern einen kontinuierlichen Managementprozess dar. Unternehmen müssen regelmäßig überprüfen, welchen Einflussfaktoren sie ausgesetzt sind, wie gut sie auf diese vorbereitet sind und welche Maßnahmen unter den jeweiligen Rahmenbedingungen den größten Beitrag zur Resilienz leisten. Dabei gilt es, Zielkonflikte zwischen Effizienz und Resilienz transparent zu machen und bewusst zu steuern.

VII. Ausblick

Die Studie verdeutlicht, dass industrielle Resilienz zunehmend zu einer grundlegenden Voraussetzung für die langfristige Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen wird. Insbesondere in einem von Unsicherheit, Dynamik und globalen Abhängigkeiten geprägten Umfeld reicht eine rein effizienzorientierte Gestaltung von Produktions- und Wertschöpfungsstrukturen nicht mehr aus. Vielmehr müssen Unternehmen ihre Fähigkeit stärken, Störungen frühzeitig zu erkennen, Auswirkungen gezielt zu begrenzen und sich flexibel an neue Rahmenbedingungen anzupassen.

Zukünftig wird die Bedeutung resilienter Produktions- und Wertschöpfungssysteme weiter zunehmen. Technologische Entwicklungen wie Künstliche Intelligenz, datengetriebene Entscheidungsunterstützung, digitale Zwillinge und vernetzte Datenräume eröffnen neue Möglichkeiten, Veränderungen frühzeitig zu erkennen und adaptive Entscheidungen zu treffen. Gleichzeitig steigen jedoch die Anforderungen an Datenqualität, IT-Infrastruktur und organisatorische Fähigkeiten. Für Unternehmen wird es daher entscheidend sein, Resilienz nicht als einmaliges Projekt, sondern als kontinuierlichen Entwicklungsprozess zu verstehen. Das entwickelte Reifegradmodell kann hierfür als Ausgangspunkt dienen und perspektivisch um branchenspezifische Bewertungslogiken, quantitative Kennzahlen sowie automatisierte Datenauswertungen erweitert werden. Darüber hinaus bietet die Studie Ansatzpunkte für weiterführende Forschung, insbesondere hinsichtlich der Messbarkeit von Resilienz, der wirtschaftlichen Bewertung resilienzsteigernder Maßnahmen sowie der Integration von Nachhaltigkeits- und Resilienzzielen in der industriellen Praxis.

VIII. Institut und Verfasser der Studie

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) ist eine der führenden Technischen Universitäten Europas und gleichzeitig Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft. Es entstand 2009 aus der Fusion der Universität Karlsruhe (TH) und des Forschungszentrums Karlsruhe und vereint damit universitäre Lehre mit außeruniversitärer Großforschung in einer in Deutschland einzigartigen Struktur. Mit rund 10.000 Beschäftigten, davon etwa 5.900 in Wissenschaft und Lehre, sowie über 23.000 Studierenden zählt das KIT zu den größten und leistungsfähigsten Wissenschaftseinrichtungen Europas. Als Forschungsuniversität in der Helmholtz-Gemeinschaft erbringt das KIT Leistungen von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung und leistet dabei maßgebliche Beiträge zu den globalen Herausforderungen in den Feldern Energie, Mobilität und Information.

Das wbk Institut für Produktionstechnik ist Teil der KIT-Fakultät für Maschinenbau und beschäftigt knapp 130 Mitarbeitende. Es gliedert sich in die drei Bereiche Fertigungs- und Werkstofftechnik (Prof. Schulze, Prof. Zanger), Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung (Prof. Fleischer) sowie Produktionssysteme (Prof. Lanza). Das wbk widmet sich anwendungsnaher Forschung, Lehre und Innovation im Bereich Produktionstechnik und legt einen Schwerpunkt auf zukunftsweisende Technologiefelder wie Elektromobilität, nachhaltige Produktion, Production Informed AI und additive Fertigung. Neben den klassischen Feldern des Maschinen- und Anlagenbaus wird erforscht, wie datengestützte und von künstlicher Intelligenz geprägte Ansätze die Produktionseffizienz steigern und neue Geschäftsmodelle ermöglichen können, sowie wie klassische Produktionstechnologien auf neue Werkstoffe und digitale Prozessketten übertragen werden können. Seit 2024 ist das wbk zudem Sprecherinstitut des Sonderforschungsbereichs 1574 „Kreislauffabrik für das ewige Produkt“, der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird und eine integrierte lineare und zirkuläre Produktion im industriellen Maßstab zum Ziel hat. Im Bereich Produktionssysteme unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza stehen darüber hinaus die Planung, Bewertung und Beherrschung globaler, schockrobuster Produktionsnetzwerke sowie atmender Fabriken im Mittelpunkt. Dieses Themenfeld bildet die konzeptionelle Grundlage der vorliegenden Studie.

Verfasst wurde die Studie im Bereich Produktionssysteme des wbk, der sich unter anderem mit Fragestellungen der Resilienz produzierender Unternehmen, globaler Produktionsnetzwerke und Produktionssystemplanung sowie mit der Entwicklung praxisnaher Bewertungs- und Reifegradmodelle befasst.

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Dr.-Ing. Martin Benfer

Michael Martin

Moritz Hörger

Katharina Theuner

Dirk Rechkemmer

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

wbk Institut für Produktionstechnik

Kaiserstraße 12, 76131 Karlsruhe

www.wbk.kit.edu

KIT – Die Universität in der Helmholtz-Gemeinschaft

Literatur

- [1] Coe, N. M., Dicken, P., and Ess, M., 2000, "Global Production Networks: Realizing the Potential," *J Econ Geogr*, 8(3), pp. 271–295. <https://doi.org/10.1093/jeg/lbn002>.
- [2] Lanza, G., Ferdows, K., Kara, S., Mourtzis, D., Schuh, G., Váncza, J., Wang, L., and Wiendahl, H.-P., 2019, "Global Production Networks: Design and Operation," *CIRP Annals*, 68(2), pp. 823–841. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.05.008>.
- [3] Sheffi, Y., and Rice, J. B., 2005, "A Supply Chain View of the Resilient Enterprise," *MIT Sloan Management Review*, 47(1).
- [4] Ivanov, D., and Das, A., 2020, "Coronavirus (COVID-19/SARS-CoV-2) and Supply Chain Resilience: A Research Note," *IJISM*, 13(1), p. 90. <https://doi.org/10.1504/IJISM.2020.107780>.
- [5] Cascio, J., 2020, "Facing the Age of Chaos," Medium. [Online]. Available: <https://medium.com/@cascio/facing-the-age-of-chaos-b00687b1f51d>. [Accessed: 11-May-2026].
- [6] Brehm, N., Aksoy, O., and Wellbrock, W., 2017, "Erfolgsfaktor Störungsmanagement: Entwicklung Und Evaluation Eines Reifegradmodells," *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 112(12), pp. 843–847. <https://doi.org/10.3139/104.111840>.
- [7] Bisztray, M., Békés, G., Charos, A., De Pirro, A., Friesenbichler, K., Koren, M., Lengyel, B., and Meyer, B., 2024, "Supplier Disruptions Survey (First Round) — Aggregated," p. 10, kB. <https://doi.org/10.22000/MXMCOYURFECSDIBN>.
- [8] sphaera, AI_Powered Supplier Risk Management Survey 2025. [Online]. Available: Zugriff auf Whitepaper muss beantragt werden. Zugriffslink: <https://sphaera.com/resources/white-paper/ai-powered-supplier-risk-management-survey-2025/> [Accessed: 11-May-2026].
- [9] Everstream Analytics, Supply Chain Risikoberichtm 2026. [Online]. Available: <https://www.everstream.ai/de/special-reports/supply-chain-risikobericht-2026/>. [Accessed: 11-May-2026].

- [10] Vanchan, V., 2021, "Global Pandemic Disruptions, Reconfiguration and Glocalization of Production Networks," *Living with Pandemics*, J.R. Bryson, L. Andres, A. Ersoy, and L. Reardon, eds., Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781800373594.00028>.
- [11] Peukert, S., Hörger, M., and Lanza, G., 2023, "Fostering Robustness in Production Networks in an Increasingly Disruption-Prone world," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 41, pp. 413–429. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.01.002>.
- [12] Christopher, M., and Peck, H., 2004, "Building the Resilient Supply Chain," *The International Journal of Logistics Management*, 15(2), pp. 1–14. <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>.
- [13] Benfer, M., Verhaelen, B., Peukert, S., and Lanza, G., 2021, "Resilience Measures in Global Production Networks: A Literature Review and Conceptual Framework," *DU*, 75(4), pp. 491–520. <https://doi.org/10.5771/0042-059X-2021-4-491>.
- [14] eurostat, 2025, "Global Value Chain Disruptions and Enterprise Responses in the EU." [Online]. Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Global_value_chain_disruptions_and_enterprise_responses_in_the_EU. [Accessed: 11-May-2026].
- [15] ATOSS, Resilience by Design, ATOSS. [Online]. Available: <https://go.atoss.com/atoss-fws-gc-de.pdf>.
- [16] Lanza, G., Benfer, M., and Hörger, M., 2024, "Gestaltung des Produktionssystems," *Handbuch Logistik*, K. Furmans, M. Henke, H. Tempelmeier, M. Ten Hompel, and T. Schmidt, eds., Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1–13. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54476-7_47-1.
- [17] Arnold, D., Isermann, H., Kuhn, A., Tempelmeier, H., and Furmans, K., eds., 2008, *Handbuch Logistik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72929-7>.
- [18] Westkämper, E., 2006, *Einführung in Die Organisation Der Produktion*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

- [19] Wiendahl, H.-P., ElMaraghy, H. A., Nyhuis, P., Zäh, M. F., Wiendahl, H.-H., Duffie, N., and Brieke, M., 2007, "Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation," *CIRP Annals*, 56(2), pp. 783–809. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003>.
- [20] Eversheim, W., 1996, *Organisation in der Produktionstechnik: Band 1: Grundlagen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg s.l. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-87737-7>.
- [21] Abele, E., Meyer, T., Näher, U., Strube, G., and Sykes, R., 2008, *Global Production*, Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-71653-2>.
- [22] Choi, T. Y., Dooley, . J., and Rungtusanatham, M., 001, "Supply Networks and Complex Adaptive Systems: Control versus Emergence," *J of Ops Management*, 19(3), pp. 351–366. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1016/S0272-6963%2800%2900068-1>.
- [23] Peukert, S., Hörger, M., and Zehner, M., 2023, "Linking Tactical Planning and Operational Control to Improve Disruption Management in Global Production Networks in the Aircraft Manufacturing Industry," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 46, pp. 36–47. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2023.07.009>.
- [24] Golan, M. S., Jernegan, L. H., and Linkov, I., 2020, "Trends and Applications of Resilience Analytics in Supply Chain Modeling: Systematic Literature Review in the Context of the COVID-1 Pandemic," *Environ Syst Decis*, 40(2), pp. 222–243. <https://doi.org/10.1007/s10669-020-09777-w>.
- [25] 2022, Directive of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence and Amending Directive (EU) 2019/1937. [Online]. Available: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:bc4dcea4-9584-11ec-b4e4-01aa75ed71a1.0007.02/DOC_1&format=PDF.
- [26] Bode, C., and Macdonald, J. R., 2017, "Stages of Supply Chain Disruption Response: Direct, Constraining, and Mediating Factors for Impact Mitigation," *Decision Sciences*, 48(5), pp. 836–874. <https://doi.org/10.1111/dec.12245>.

- [27] Rechkemmer, D., Benfer, M., and Lanza, G., 2025, "Automated Layout Creation in Production Planning, "Simulation in Produktion Und Logistik 2025 21. ASIM-Fachtagung, Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.25368/2025.268>.
- [28] Wiendahl, H.-P., Reichardt, J., and Nyhuis, P., 2014, Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung Und Umsetzung Wandlungsfähiger Produktionsstätten, Hanser, München.
- [29] Stricker, N., and Lanza, G., 2014, "The Concept of Robustness in Production Systems and Its Correlation to Disturbances." <https://doi.org/10.5445/IR/1000145194>.
- [30] Patig, S., and Thorhauer, S., 2002, "Ein Planungsansatz zum Umgang mit Störungen bei der Produktion: Die flexible Produktionsfeinplanung mithilfe von Planungsschritten," *Wirtschaftsinf*, 44(4), pp. 355–366. <https://doi.org/10.1007/BF03250860>.
- [31] Fischäder, H., ed., 2007, Störungsmanagement in netzwerkförmigen Produktionssystemen, DUV, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-8350-9375-1>.
- [32] Genc, E., Duffie, N., and Reinhart, G., 01 , "Event-Based Supply Chain Early Warning System for an Adaptive Production Control," *Procedia C RP*, 19, pp. 39–44. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.076>.

Impressum

Auftraggeber und Herausgeber

Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg
beim VDMA e. V. Baden-Württemberg
Kronenstr. 3
70173 Stuttgart
Tel.: +49 711 22801-20
E-Mail: info@i40-bw.de
Internet: www.i40-bw.de

Kontakt

Dr. Isabella R. Jesemann
Operations Manager Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg
Tel.: +49 171 9620357
E-Mail: isabella.jesemann@vdma.eu

Layout, Satz und Druck

bürger Print & Medien GmbH
Furtstraße 2/1
75242 Neuhausen
E-Mail: info@burgerprint.de
Internet: www.burgerprint.de

Erscheinungsjahr

2026

[illegible]

Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg

VDMA e. V. Baden-Württemberg

Kronenstraße 3

70173 Stuttgart

Tel.: +49 711 22801-20

E-Mail: info@i40-bw.de

Internet: www.i40-bw.de

Gefördert
durch



Baden-Württemberg
Ministerium für Wirtschaft,
Handwerk und Tourismus

Mit Unterstützung von:

