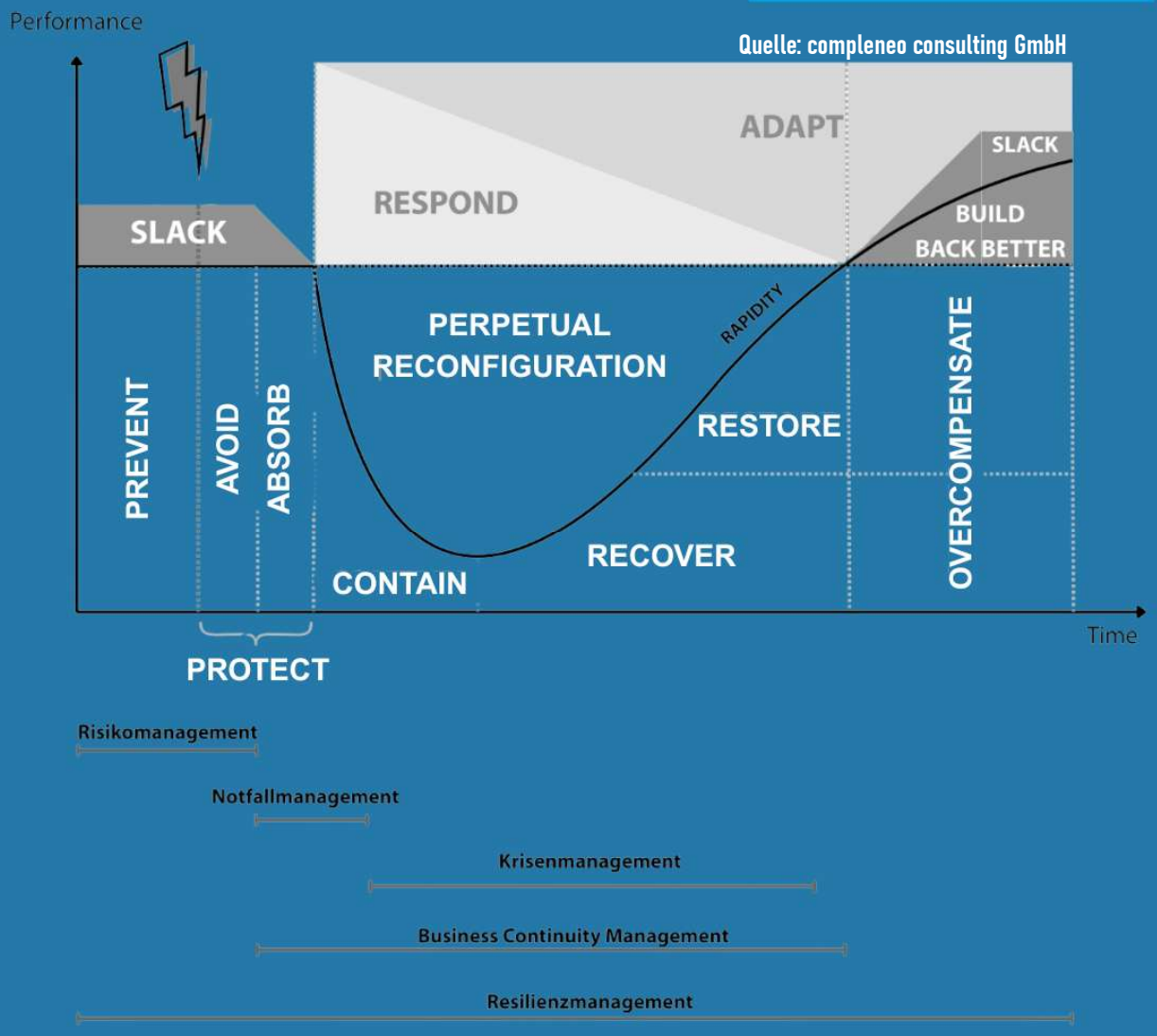
Werk4.0



Vom konventionellen Produktionswerk zum resilienten Kompetenzwerk

Die *Werk-4.0-Resilienzreise*

Autorinnen: Ulrike Munz, Heike Kühn

Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V.

Dezember 2025

Executive Summary

Die industrielle Produktion steht vor einem tiefgreifenden Wandel: Globale Lieferketten sind fragil, Innovationszyklen verkürzen sich, externe Krisen wie Pandemien oder geopolitische Konflikte wirken unmittelbar auf die Fertigung. Klassische Produktionssysteme, die auf Stabilität und Effizienz ausgelegt sind, stoßen an ihre Grenzen. Resilienz wird deshalb zur strategischen Fähigkeit, um Störungen nicht nur zu überstehen, sondern als Lern- und Entwicklungschance zu nutzen. *Werk-4.0* setzt genau hier an. Das Projekt verbindet technologische Innovation, organisatorisches Lernen und strategische Anpassungsfähigkeit und macht Resilienz in realen Produktionsumgebungen erlebbar und messbar.

Der aktuelle Stand der Forschung bietet Ansätze wie Time-to-Recover, OEE-Abweichungen oder Scorecards, die die Reaktionsfähigkeit bewerten. Dennoch fehlen prädiktive Indikatoren, standardisierte Benchmarks und Routinen zur Integration in die Unternehmensstrategie. Human- und Organisationsfaktoren sind in quantitativen Modellen unterrepräsentiert. *Werk-4.0* schließt diese Lücken nicht vollständig, liefert aber wichtige Impulse: praxisnahe Kennzahlen wie Fehlerquote, Adaptionsgeschwindigkeit und subjektive Belastung, digitale Dashboards sowie partizipative Methoden wie Co-Creation. Gleichzeitig bleibt die Anschlussfähigkeit an offene Punkte bestehen – etwa die Entwicklung von Frühwarnlogiken, KPI-Kaskaden und die Aggregation über Ebenen hinweg.

Für die Praxis bedeutet das: *Werk-4.0* ist kein Endpunkt, sondern ein Ausgangspunkt. Unternehmen können die Erfahrungen nutzen, um prädiktive Indikatoren zu entwickeln, kausale Wirkungen von Maßnahmen zu evaluieren und Resilienz-Monitoring strategisch zu verankern. Die Verbindung von technischen, organisatorischen und menschzentrierten Ansätzen macht *Werk-4.0* zu einem relevanten Impulsgeber in einem Feld, das noch weit von Standardisierung und Benchmarking entfernt ist.

Abbildung 1. Resilienzo – unser Resilienzmaskottchen im Projekt *Werk-4.0*.

Abkürzungsverzeichnis

AP ..... *Arbeitspaket*
BCM ..... *Business Continuity Management*
CAD ..... *Computer-Aided Design*
KI ..... *Künstliche Intelligenz*
Q-Tor ..... *Qualitäts-Tor (Automatisierter Prüfpunkt in der Produktion)*
SUS ..... *System Usability Scale (Fragebogen)*
TTR ..... *Time-to-Recover*

Inhalt

Abkürzungsverzeichnis ... 3

Warum *Werk-4.0* den Wandel in der industriellen Produktion gestaltet ... 6

Resilienz in der Industrie: State of the Art, offene Fragen und die Rolle von *Werk-4.0* ... 6

Von Technik zu Kultur: Wie Nutzerzentrierung und Co-Creation Resilienz prägen ... 8

Vom Verstehen zum Gestalten: Zielentwicklung im Konsortium ... 10

Resilienz-Szenarien im Reallabor ... 12

Die 5 Resilienz-Szenarien ... 12

Erprobung im Reallabor ... 13

Systematik der Resilienzmessung ... 15

Die Messung von Resilienz im *Werk-4.0* Projekt ... 15

Darstellung der Resilienz-Ergebnisse ... 17

Menschzentrierte Resilienz – Anpassungsfähigkeit im Arbeitsalltag ... 17

Technische Resilienz – Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme ... 17

Organisationale Resilienz – Steuerungsfähigkeit und Entscheidungslogik ... 18

Implikation ... 18

Resilienzeffekte und Wirkungen im *Werk-4.0* ... 19

Menschzentrierte Resilienz ... 19

Technische Resilienz ... 19

Organisationale Resilienz ... 20

Vertiefende Betrachtung der Resilienzeffekte ... 21

Wirkung entlang der Resilienzkurve ... 21

Einbettung der Resilienzansätze im Projekt *Werk-4.0* ... 24

Monitoring und Indikatoren ... 26

Beispielhafte Indikatoren für organisationale Resilienz ... 27

Wie entwickelt man Resilienz-Indikatoren? ... 28

Typische Beteiligte und ihre Rollen 28
Top-Management 29
Führungskräfte 29
Risikomanagement und BCM 29
Qualitätsmanagement und Organisationsentwicklung 29
Mitarbeitende 29
Praktische Empfehlungen für das Monitoring 30
Digitales Dashboard 30
Regelmäßige Reviews 30
Quantitative und qualitative Methoden 30
Pilotierung neuer Indikatoren 30
Kontinuierlicher Prozess 31
Erfahrungsaustausch 31
Organisationale Resilienz in der Praxis 32
Wirkungsketten der Lösungen im Projekt *Werk-4.0* 32
Detaillierte Darstellung der Resilienz-Wirkungsketten 34
Vom Resilienz-Modell zur Anwendung – Der Resilienzhelfer als Praxisinstrument aus *Werk-4.0* 36
Resilienz-Dividende und Transfer – Was *Werk-4.0* zeigt 38
Erkenntnisse aus *Werk-4.0* – Herausforderungen, Learnings und strategische Perspektiven 38
Resilienz als strategisches Prinzip und Zukunftsinvestition 40
Von der Erkenntnis zur Anwendung 40
Ausblick – Einladung zur Mitgestaltung 41
Glossar 42
Quellen 45
Das Projekt *Werk-4.0* 47
Impressum 48

Warum Werk-4.0 den Wandel in der industriellen Produktion gestaltet

Die industrielle Produktion befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel. Globale Lieferketten werden zunehmend fragil, Innovationszyklen verkürzen sich, und externe Krisen wie Pandemien, Energieengpässe oder geopolitische Konflikte beeinflussen unmittelbar die Produktionsrealität. Klassische Produktionssysteme, die auf Stabilität und Effizienz ausgelegt sind, stoßen dabei an ihre Grenzen: Sie reagieren träge auf Veränderungen, sind nur begrenzt anpassungsfähig und zeigen sich störanfällig gegenüber unvorhergesehenen Ereignissen.

Genau hier setzt das Projekt *Werk-4.0* an: Ziel ist es, den Wandel nicht nur zu bewältigen, sondern aktiv zu gestalten – durch die Entwicklung eines neuen Produktionsverständnisses, das Resilienz als zentrale Gestaltungsgröße begreift. *Werk-4.0* steht damit für den Übergang vom konventionellen Produktionswerk hin zum resilienten Kompetenzwerk, das technologische Innovation, organisatorisches Lernen und strategische Anpassungsfähigkeit miteinander verbindet. Entscheidend ist dabei der Praxisbezug, der in allen acht Arbeitspaketen von Anfang an mitgedacht wurde. Resilienz soll nicht nur theoretisch beschrieben, sondern in realen Produk-tionsumgebungen erlebbar und messbar gemacht werden.

Werk-4.0 begreift Resilienz als strategischen Schlüsselfaktor. Sie beschreibt die Fähigkeit von Produktionssystemen, flexibel und vorausschauend auf unerwartete Ereignisse zu reagieren, Störungen zu absorbieren und aus ihnen heraus Verbesserungen zu initiieren. Im Unterschied zur klassischen Robustheit, die primär auf das Durchhalten unter Belastung zielt, setzt Resilienz auf aktive Anpassung, Lernfähigkeit und Selbstoptimierung. Produktionssysteme sollen nicht nur widerstandsfähig, sondern entwicklungsfähig sein – mit dem Ziel, ihre Leistungs- und Wettbewerbsfähigkeit auch unter unsicheren Bedingungen zu sichern und auszubauen.

Diese Herausforderungen prägen auch den aktuellen Forschungsstand. Ein Blick auf den State of the Art zeigt, wo die Industrie heute steht und wo *Werk-4.0* ansetzt.

Resilienz in der Industrie: State of the Art, offene Fragen und die Rolle von Werk-4.0

Die Bedeutung von Resilienz für Produktionssysteme ist inzwischen unbestritten. Der aktuelle Stand der Forschung und Praxis orientiert sich am Leitbild „Absorbieren – Anpassen – Erholen“ (Bruckler et

al., 2024). Messungen erfolgen überwiegend über performance-basierte Kennzahlen wie Time-to-Recover (TTR) oder die Fläche unter der Erholungskurve („Resilience Triangle“). Diese Ansätze sind etabliert und erlauben eine Bewertung der Reaktionsfähigkeit auf Shopfloor-Ebene. Ergänzend kommen Scorecards und Reifegradmodelle zum Einsatz, die Dimensionen wie Robustheit, Agilität und Adaptivität bündeln und für Managemententscheidungen gut kommunizierbar sind (Stachowiak & Pawłyszyn, 2021).

Trotz dieser Fortschritte bestehen zentrale Forschungslücken. Zum einen fehlt es an Vergleichbarkeit und Standardisierung. Metriken sind stark kontextabhängig (Rincón-Guio & Sarache, 2024), Referenzwerte und Benchmarks sind rar (Wachter et al., 2024). Zum anderen dominieren lagging indicators – ex-post-Messungen wie TTR –, während prädiktive, führende Indikatoren (Frühwarnsignale, KI-basierte Prognosen) kaum etabliert sind. Zudem ist die kausale Wirkung von Maßnahmenpaketen in komplexen Produktionssystemen unzureichend verstanden – integrierte Versuchsdesigns und digitale Zwillinge fehlen. Weitere offene Punkte betreffen die Einbettung von Resilienz-Messungen in die Manufacturing-Strategy und Governance, die Aggregation von Kennzahlen über Ebenen hinweg (Anlage – Werk – Netzwerk), die Integration von Human- und Organisationsfaktoren in quantitative Modelle sowie die Entwicklung branchenspezifischer Leitfäden und offener Datensätze für Benchmarking.

Genau hier setzt *Werk-4.0* an. Das Projekt kann nicht alle Lücken schließen, aber wichtige Impulse geben. Es hat praxisnahe Indikatoren für technische und menschzentrierte Resilienz entwickelt und einige davon im Reallabor erprobt. Damit adressiert *Werk-4.0* die Forderung nach operationalisierbaren Kennzahlen und zeigt, wie soziale und kulturelle Dimensionen in die Resilienzgestaltung integriert werden können. Die partizipative Entwicklung von Indikatoren in Workshops und die Verankerung von Nutzerzentrierung und Co-Creation sind Beiträge, die über rein technische Ansätze hinausgehen. Zudem liefert *Werk-4.0* Bausteine für Governance (Rollenmodelle, Monitoring-Empfehlungen), aber keine vollständige KPI-Kaskade; es nutzt digitale Dashboards, jedoch ohne prädiktive Frühwarnlogik; und es fokussiert auf Shopfloor-Ebene, ohne standardisierte Roll-ups zu Werk- oder Unternehmenskennzahlen.

Für die Praxis bedeutet dies, dass *Werk-4.0* keinen Endpunkt, sondern vielmehr einen Ausgangspunkt darstellt. Unternehmen können die Erfahrungen aus dem Projekt nutzen, um prädiktive Indikatoren zu entwickeln, kausale Wirkungen von Maßnahmen zu evaluieren und Resilienz-Monitoring strategisch zu verankern. Die Verbindung von technischen,

organisatorischen und menschzentrierten Ansätzen macht *Werk-4.0* zu einem relevanten Impulsgeber – gerade in einem Feld, das noch weit von Standardisierung und Benchmarking entfernt ist.

Von Technik zu Kultur: Wie Nutzerzentrierung und Co-Creation Resilienz prägen

Im Projekt *Werk-4.0* haben sich Nutzerzentrierung und Co-Creation als zentrale Querschnittsthemen und konstitutive Elemente eines resilienten Produktionsverständnisses herausgebildet. Beide Ansätze wirken aufeinander ein, verstärken sich gegenseitig und schaffen damit die Voraussetzung, Resilienz nicht nur technisch, sondern auch sozial-organisational zu gestalten.

Das Projekt verankerte Nutzerzentrierung systematisch in allen Arbeitspaketen (s. S.10). Von der Entwicklung praxisnaher Personas über die Gestaltung von Lern- und Transferformaten bis hin zur Evaluation im Reallabor (Pietsch et al., 2025). Dadurch rückten reale Bedarfe, Nutzungsszenarien und Erfahrungswelten der Beschäftigten konsequent in den Mittelpunkt der Entwicklung. Die Perspektive der Nutzenden diente der Akzeptanzsteigerung und wurde zu einem zentralen Innovationsmotor: Sie machte sichtbar, wo Anpassungs-, Lern- und Handlungsspielräume entstehen, die zur Resilienzfähigkeit der Systeme beitragen.

Die Fähigkeit von Produktionssystemen, flexibel und widerstandsfähig auf Veränderungen zu reagieren, hängt maßgeblich davon ab, wie Menschen und Organisationen gemeinsam Innovationen gestalten. Nutzerzentrierung und Co-Creation sind deshalb zentrale Erfolgsfaktoren, um Resilienz nicht nur technisch, sondern auch sozial und kulturell im Unternehmen zu verankern.

Das Konsortium lebte Co-Creation durch vielfältige Formen der interdisziplinären und organisationsübergreifenden Zusammenarbeit (Walk & Lerche, 2025). Der gemeinsame Entwicklungsprozess im Konsortium, zwischen Industrie, Forschung und Praxispartnern, ermöglichte den Aufbau eines geteilten Verständnisses von Resilienz. Gleichzeitig förderte er Vertrauen, Kommunikationsfähigkeit und kollektives Lernen. Alles zentrale Komponenten organisationaler Resilienz.

In ihrer Kombination zeigen Nutzerzentrierung und Co-Creation, dass Resilienz in der industriellen Praxis nicht verordnet, sondern gemeinsam hervorgebracht wird. Sie bilden den sozialen Resonanzraum, in dem technische Innovation, Lernprozesse und Wandelfähigkeit zusammenfinden. Beide Themen werden in separaten White Papers (Lerche et al., 2025; Pietsch et al.,

2025; Walk & Lerche, 2025) vertieft und bieten praxisnahe Impulse.

Abbildung 2. Werk-4.0 White Paper zur Agilität im Projekt (Quelle: Walk & Lerche, 2025)

Abbildung 3. Werk-4.0 White Paper zur Nutzerzentrierung im Projekt (Quelle: Pietsch, Reuter & Walk, 2025)

Vom Verstehen zum Gestalten: Zielentwicklung im Konsortium

Das breite Konsortium aus Industrie und Wissenschaft (s. Abbildung 4.) bildete die Grundlage für die interdisziplinäre Zusammenarbeit im Projekt *Werk-4.0*. Die dadurch erreichte Vielfalt an Perspektiven, Kompetenzen und Methoden ermöglichte die Entwicklung und Umsetzung eines praxisnahen Resilienzverständnisses.

Abbildung 4. Konsortialpartner im *Werk-4.0* Verbundprojekt

Die Partner arbeiteten in acht Arbeitspaketen zusammen, die von der digitalen Prozesskette über den digitalen Steuerungszwilling und KI-Inspektoren bis hin zu Werkerassistenzsystemen, In-Line Qualifizierung, Geschäftsmodellinnovation und Co-Creation reichten.

Arbeitspakete im Werk 4.0

AP1 – Digitale Prozesskette:

Vernetzung aller Produktionsschritte in einer durchgängigen digitalen Prozesskette, um Datenflüsse transparent und effizient zu gestalten.

AP2 – Digital Twin:

Aufbau eines digitalen Abbilds der Produktionsprozesse, um Abläufe virtuell zu simulieren und Optimierungen vorab zu testen.

AP3 – KI Inspector:

Entwicklung KI-gestützter Prüfmechanismen, die Qualitätsabweichungen frühzeitig erkennen und automatisiert bewerten.

AP4 – Arbeitssicherheit und Routenoptimierung:

Sicherstellung sicherer Arbeitsumgebungen durch intelligente Routenplanung für Mensch und Materialfluss.

AP5 – Werker-Assistenzsysteme:

Bereitstellung intuitiver Assistenzlösungen, die Werker bei komplexen Aufgaben in Echtzeit unterstützen.

AP6 – Qualifizierung:

Vermittlung neuer Kompetenzen für digitale Produktionsprozesse durch praxisnahe Schulungs- und Lernformate.

AP7 – Geschäftsmodelle:

Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle, die den Mehrwert digitaler Fabrikkonzepte wirtschaftlich nutzbar machen.

AP8 – Co-Creation auf dem Factory Campus:

Förderung gemeinsamer Innovationsarbeit im offenen Campus-Format, um Lösungen kollaborativ zu entwickeln.

Zu Beginn des Projekts stand das gemeinsame Ziel, das Phänomen Resilienz im Zusammenspiel von Mensch, Technik und Organisation besser zu verstehen. In

Workshops und Konsortialtreffen wurde intensiv diskutiert, wie ein resilientes Produktionssystem der Zukunft aussehen könnte und welche Wechselwirkungen zwischen technischen, organisatorischen und menschlichen Faktoren entscheidend sind.

Im Verlauf des Projekts verlagerte sich der Schwerpunkt zunehmend: aus Verstehen wurde Gestalten. Es ging nicht mehr nur darum, theoretische Grundlagen zu klären, sondern Resilienz im industriellen Kontext konkret erfahrbar, gestaltbar und messbar zu machen. Die Leitfrage lautete nun: Wie kann ein resilientes Kompetenzwerk praktisch aussehen und wie lässt sich Resilienz nachvollziehbar bewerten und gezielt weiterentwickeln?

Um dieser Frage zu begegnen, wurde im Projekt *Werk-4.0* ein systematischer, methodisch vielfältiger Ansatz gewählt. Im Zentrum stand das Ziel, Resilienz nicht als abstraktes Konzept, sondern als operationalisierbare Größe zu verstehen. Eine Größe, die sowohl technische Systeme als auch menschliches Handeln umfasst und deren Wechselwirkung sichtbar macht.

Das Team analysierte zunächst unterschiedliche Modelle und Methoden aus der Resilienzforschung und prüfte ihre Anwendbarkeit für die industrielle Produktion, darunter der Resilienzzyklus (Kohl, 2021), das Cynefin-Framework (Knapp & Richter, 2023) sowie Bewertungsansätze aus angrenzenden Disziplinen. Diese Analyse diente dazu, die Komplexität des Themas zu strukturieren, gemeinsame Begrifflichkeiten zu schaffen und eine methodische Grundlage für die Bewertung von Resilienz im Produktionskontext zu entwickeln.

Auf dieser Basis identifizierte das Konsortium realistische Szenarien aus den Arbeitspaketen, die exemplarisch relevante Resilienzereignisse abbilden. Sie dienten als Prüf- und Lernräume, um zu verstehen, wie sich Resilienz im Alltag industrieller Systeme zeigt, wie sie gestärkt werden kann und wie sich daraus Gestaltungsprinzipien für das „*Werk-4.0*“ der Zukunft ableiten lassen.

Resilienz-Szenarien im Reallabor

Die im Projekt *Werk-4.0* identifizierten Resilienz-Szenarien zeigen exemplarisch, wie typische Störpotenziale erkannt und produktiv bewältigt werden können. Sie machen deutlich, dass Resilienz kein Zufall ist, sondern das Ergebnis systemischer Vorbereitung und lernfähiger Strukturen.

Die 5 Resilienz-Szenarien

1. Fehlende Auslastung

Wenn Produktionskapazitäten nicht voll genutzt werden, z. B. durch Nachfragerückgänge, saisonale Schwankungen oder Marktumbrüche, entstehen wirtschaftlicher Druck und Ineffizienzen. Darüber hinaus droht der Verlust von Know-how und Motivation. Resiliente Werke reagieren mit flexiblen Produktionsmodellen, der temporären Umnutzung von Ressourcen oder der Erschließung neuer Geschäftsfelder. Anpassungsfähigkeit ersetzt hier reine Effizienzorientierung.

2. Änderung technischer Eigenschaften im Serienbetrieb

Während des laufenden Serienbetriebs muss eine Produkteigenschaft, wie z. B. Material, Maß oder Bauteil, kurzfristig geändert werden. Das erfordert koordinierte Anpassungen in Prozessen und Dokumentation, ohne die Fertigung zu stoppen. Resilienz zeigt sich, wenn solche Änderungen durch digitale Prozessketten, flexible Steuerungssoftware und automatisierte Prüfprozesse schnell und fehlerfrei umgesetzt werden können.

3. Upgrade oder Ersatz einer Maschine

Fällt eine zentrale Maschine aus oder wird modernisiert, steht die Produktion vor einer kritischen Übergangsphase: Stillstandzeiten, Schnittstellenprobleme und Schulungsbedarf treffen aufeinander. Ein resilientes Werk antizipiert solche Situationen: Es verfügt über Ersatzprozesse, vorausschauende Instandhaltung, kompatible Schnittstellen und trainierte Teams, um Umrüstungen reibungslos zu bewältigen.

4. Flexibler Einsatz von Mitarbeitenden

Personelle Engpässe durch Krankheit, Fluktuation oder Urlaub erfordern schnelle Umverteilung von Aufgaben, oft auch den Einsatz digitaler Assistenzsysteme oder Cobots. Resilienz entsteht durch eine offene Lernkultur, modulare Qualifizierung und adaptive Unterstützungssysteme, die Mitarbeitende in die Lage versetzen, flexibel und sicher neue Aufgaben zu übernehmen.

5. Fehler im Fertigungsprozess

Trotz Automatisierung können Fehler auftreten, z. B. durch Materialabweichungen, Bedienfehler oder technische Störungen. Entscheidend ist die Reaktionsfähigkeit

des Systems. Resiliente Produktionsumgebungen erkennen Fehler frühzeitig (z. B. mittels KI-basierter Inspektion), analysieren sie systematisch und leiten Lernprozesse ein, um Wiederholungen zu vermeiden. So wird Fehlererkennung zum Ausgangspunkt kontinuierlicher Verbesserung.

Diese Szenarien zeigen, dass Resilienz kein singuläres Merkmal, sondern immer ein Systemverhalten ist. Sie entsteht aus der Fähigkeit, Störungen als Impuls für Anpassung und Weiterentwicklung zu nutzen. *Werk-4.0* hat diese Dynamik im industriellen Kontext sichtbar und methodisch erfassbar gemacht – als Grundlage für eine neue Generation lernfähiger Produktionssysteme.

Erprobung im Reallabor

Für die praktische Umsetzung und Erprobung im Reallabor haben wir uns bewusst auf zwei der Resilienz-Szenarien beschränkt: „Änderung technischer Eigenschaften im Serienbetrieb“ und „Flexibler Einsatz von Mitarbeitenden“.

Diese Auswahl entspringt einer klaren Logik. Zum einen spielte die Machbarkeit im Reallabor eine zentrale Rolle. Das Testumfeld sollte reale Produktionsbedingungen abbilden, zugleich aber handhabbar genug sein, um Methoden, Tools und Konzepte innerhalb des Projektzeitraums systematisch zu erproben. Das Team wählte daher Szenarien, die sowohl relevant als auch praktisch umsetzbar waren, mit klaren Schnittstellen zu technischen wie auch menschlichen Faktoren.

Das Reallabor im Projekt *Werk-4.0* war von Beginn an als explorativer Raum gedacht, in dem neben dem Testbetrieb auch methodisch fundierte Entwicklungsarbeit getätigt wird. Einige Resilienz-Szenarien konnten gezielt an ausgewählten Stationen erprobt werden, andere blieben aus praktischen Gründen ungetestet. Die ursprünglich geplante Tiefe der Umsetzung ließ sich nicht vollständig realisieren, was zu einer begrenzten Datenlage führte. Dennoch sind die methodischen Erkenntnisse, die aus der Entwicklung und teilweisen Erprobung hervorgegangen sind, äußerst wertvoll. Sie bilden eine belastbare Grundlage für die Weiterentwicklung resilienter Produktionssysteme und zukünftige Transformationsprojekte.

Das Projekt verfolgte ebenso den Anspruch, Resilienz ganzheitlich als Zusammenspiel von Technologie, Organisation und Mensch zu adressieren. Durch die Kombination eines prozessual-technischen und eines menschenzentrierten Szenarios konnten unterschiedliche Dimensionen von Resilienz parallel untersucht werden, wobei die Änderung technischer Eigenschaften im Serienbetrieb für die prozessuale und technologische Dimension steht. Das Szenario zeigt, wie Produktionssysteme flexibel auf technische Änderungen und neue Anforderungen reagieren können, ohne die laufende Fertigung zu unterbrechen. Es verdeutlicht

die Bedeutung digitaler Prozessketten, semantischer Modelle und automatisierter Validierung für die technische Anpassungsfähigkeit.

Flexibler Einsatz von Mitarbeitenden fokussiert die menschlich-organisatorische Dimension. Es untersucht, wie Produktionssysteme personelle Engpässe, Kompetenzwechsel und spontane Veränderungen durch Qualifizierungsmaßnahmen, Assistenzsysteme und eine lernförderliche Kultur kompensieren können.

Durch diese gezielte Auswahl gelang es, technische und organisationale Resilienz gemeinsam zu betrachten und Wechselwirkungen zwischen Mensch, Technik und Organisation empirisch erfahrbar zu machen. Die Reallabor-Erprobung lieferte so praxisnahe Erkenntnisse darüber, wie Resilienz konkret gestaltet, bewertet und weiterentwickelt werden kann.

Die folgenden Kapitel behandeln die Systematik der Resilienzmessung, die Ergebnisse entlang der drei Dimensionen sowie die Messbarkeit durch Indikatoren und Monitoring-Ansätze.

Systematik der Resilienz-messung

Im Projekt *Werk-4.0* wurde Resilienz nicht nur praktisch erprobt, sondern auch methodisch entwickelt und messbar gemacht. Das Ergebnis ist ein fundierter Ansatz, der zeigt, wie technische, organisatorische und menschliche Faktoren systematisch bewertet und weitergedacht werden können.

Im Projektverlauf zeigte sich, wie anspruchsvoll die Entwicklung eines belastbaren Resilienzansatzes und dessen Überführung in eine praxisnahe Systematik ist. Bestehende Erfahrungen aus den Arbeitspaketen bildeten eine wertvolle Grundlage, doch erst durch einen gezielten methodischen Strukturierungsprozess, unterstützt durch externe Expertise, konnten die Ergebnisse konsolidiert, Lücken geschlossen und ein gemeinsames Rahmenwerk geschaffen werden.

Im Zentrum stand die Frage, wie Resilienz als mess- und gestaltbare Systemleistung verstanden und bewertet werden kann. In Workshops wurden wissenschaftliche Modelle reflektiert und auf industrielle Szenarien übertragen, wodurch ein gemeinsames Verständnis entstand, das technische, organisatorische und menschliche Aspekte integriert.

Besonderes Augenmerk lag auf dem nachhaltigen Nutzen resilienter Systeme – der sogenannten „Resilienz-Dividende“ - etwa höhere Anpassungsfähigkeit, geringere Störanfälligkeit oder effizientere Ressourcennutzung. Das Ergebnis ist ein strukturierter, praxisorientierter Ansatz, der als methodisches Fundament für die Weiterentwicklung lernfähiger und widerstandsfähiger Produktionssysteme dient.

Die Messung von Resilienz im Werk-4.0 Projekt

Die Messung von Resilienz war ein zentraler Schritt, um das Konzept im industriellen Alltag greifbar zu machen. Mit einem klaren sechsstufigen Vorgehen wurden technische und menschliche Faktoren systematisch erfasst und als Grundlage für konkrete Verbesserungen und anschlussfähige Steuerungsprozesse bewertet.

1. Zielbild
Das Team formulierte für jeden Bereich ein konkretes Sollbild, also die Vorstellung davon, wie ein Prozess oder System im Idealfall resilient funktioniert. Dieses Zielbild diente als Orientierung für alle weiteren Schritte.

2. Stressoren
Anschließend wurden mögliche Störfaktoren identifiziert, die das Zielbild gefährden könnten, z.B. technische Ausfälle, personelle Engpässe oder externe Schocks. Diese Analyse half, Schwachstellen

sichtbar zu machen und Handlungsfelder zu priorisieren.

3. Maßnahmen
Darauf aufbauend entwickelte das Konsortium gezielte Maßnahmen, um die Resilienz zu stärken. Diese reichten von technischen Lösungen wie flexibler Software und automatisierten Prüfprozessen bis zu Qualifizierungsangeboten und unterstützenden Assistenzsystemen.

4. Resilienzeffekte
Das Team beschrieb dann für jede Maßnahme die erwarteten Wirkungen, z.B. schnellere Reaktionsfähigkeit, geringere Fehleranfälligkeit oder mehr Eigenverantwortung im Team. So entstand ein klarer Bezug zwischen Maßnahme und Ziel.

5. Indikatoren
Um die Wirkung messbar zu machen, definierte das Konsortium passende Kennzahlen – sowohl technischer Art (z. B. Anlagenverfügbarkeit, Datenübertragungsdauer) als auch menschbezogen (z. B. Erlernzeit, kognitive Belastung, Nutzerzufriedenheit).

6. Review
Zum Abschluss reflektierte das Team die Ergebnisse. Haben die Maßnahmen gewirkt? Sind die Indikatoren aussagekräftig? Wo besteht Anpassungsbedarf? Dieser Schritt sichert die Weiterentwicklung und macht Resilienz zu einem lernenden Prozess.

Darstellung der Resilienzergebnisse

Die Auswertung der im Projekt *Werk-4.0* entwickelten Zielbilder zeigt drei ineinandergreifende Perspektiven, die gemeinsam das Fundament eines ganzheitlichen Resilienzverständnisses bilden:

Menschzentrierte Resilienz stärkt die Anpassungsfähigkeit, Selbstwirksamkeit und Autonomie der Mitarbeitenden.

Technische Resilienz ermöglicht eine hochflexible, digital vernetzte Produktionsumgebung mit KI-gestützter Qualitätssicherung und dynamischer Prozesssteuerung.

Organisationale Resilienz befähigt Unternehmen, Strukturen, Entscheidungsprozesse und Verantwortlichkeiten so zu gestalten, dass strategische Lücken geschlossen und komplexe Änderungen effizient koordiniert werden können.

Im Zusammenspiel erhöhen diese drei Dimensionen die psychologische Belastbarkeit, die technologische Wandlungsfähigkeit und die organisationale Anpassungskraft und stellen zentrale Pfeiler eines resilienten Produktionssystems dar.

Menschzentrierte Resilienz – Anpassungsfähigkeit im Arbeitsalltag

In der Praxis zeigt sich Resilienz dort, wo Mitarbeitende mit hoher Prozessdynamik umgehen müssen. Häufige Änderungen an der Linie durchbrechen gewohnte Routinen, die tief im prozeduralen Gedächtnis des Werkenden verankert sind. Gleichzeitig steigen die Anforderungen an Kompetenzen. Beschäftigte müssen eigenständig lernen, improvisieren und Entscheidungen treffen. Unklare Kommunikation über Änderungen erhöht die kognitive Belastung und führt zu Unsicherheit.

→ **Zentrale Herausforderung**: Lern- und Kommunikationsstrukturen schaffen, die Mitarbeitende aktiv einbinden und situativ befähigen.

Technische Resilienz – Anpassungsfähigkeit der Produktionssysteme

Digitale Prozessketten erfordern stabile Schnittstellen und Echtzeitfähigkeit. Anpassungen müssen unter Taktzeitdruck erfolgen, ohne Produktionsunterbrechung. Gleichzeitig belasten geplante und spontane Änderungen die Steuerungssoftware und Qualitätssicherung. Die Abhängigkeit von KI-Inspektoren und digitalen Systemen birgt Risiken, wenn diese nicht zuverlässig funktionieren. Zudem sind bestehende Anlagen oft auf stabile Großserienfertigung ausgelegt, was jede Anpassung

technisch und sicherheitstechnisch aufwendig macht.

→ **Zentrale Herausforderung**: Modularisierung, semantische Datenmodelle und adaptive Steuerungssysteme fördern, um technische Flexibilität zu erhöhen.

Organisationale Resilienz – Steuerungsfähigkeit und Entscheidungslogik

Resiliente Organisationen müssen Entwicklung, Produktion und IT synchronisieren, um Informationsbrüche zu vermeiden. Gleichzeitig fehlt es oft an klaren Governance-Strukturen, die schnelle und risikobewusste Entscheidungen ermöglichen. Zwischen Effizienzlogik (z. B. Lean, Six Sigma) und Offenheit für Wandel entsteht ein Spannungsfeld, da Prozesse optimiert, aber selten grundlegend verändert werden.

→ **Zentrale Herausforderung**: Entscheidungslogiken, Rollen und Governance so gestalten, dass Stabilität und Anpassung gleichermaßen möglich bleiben.

Implikation

Werk-4.0 zeigt, dass Resilienz keine zusätzliche Eigenschaft, sondern eine Systemleistung ist, die aus dem Zusammenspiel von Mensch, Technik und Organisation entsteht. Erst wenn Mitarbeitende befähigt, Technologien flexibel gestaltet und Entscheidungsprozesse agil organisiert sind, kann ein Produktionssystem Störungen nicht nur überstehen, sondern produktiv nutzen.

Werk-4.0 liefert damit ein integriertes Strukturmodell industrieller Resilienz, das auf andere Werke und Branchen übertragbar ist. Es dient als methodischer und kultureller Bezugsrahmen für zukunftsfähige Produktionssysteme.

Resilienzeffekte und Wirkungen im Werk-4.0

Werk-4.0 identifizierte zentrale Resilienzeffekte entlang der drei Dimensionen – menschzentriert, technisch und organisational. Diese Effekte verdeutlichen, wie die Wirkprinzipien Prävention, Dämpfung und Regeneration (Internationale Organisation für Normung, 2017) im Zusammenspiel zu höherer Stabilität, Effizienz und Lernfähigkeit führen.

Menschzentrierte Resilienz

Typische Effekte:

- Reduktion von Ängsten und Kompetenzlücken durch immersive Anleitungen, Trainings und visuelle Hilfen
- Dämpfung kognitiver Belastung durch spielerische Prozessgestaltung und Schritt-für-Schritt-Unterstützung
- Regeneration durch kurze körperliche Aktivierungen und soziale Belohnungssysteme (Gamification, Social Rewards)
- Prävention durch frühzeitige Informationsbereitstellung zur Vermeidung von Überlastung
- Entlastung durch Automatisierung und KI-Assistenz zur Reduktion von Arbeitsdruck

Gesamtwirkung:
Mitarbeitende verarbeiten Änderungen schneller, bleiben motiviert und handeln sicherer. Durch aktive Stresskompensation und gezielte Lernförderung werden sie zum Stabilitätsanker.

Technische Resilienz

Typische Effekte:

- Neutralisierung von Risiken durch transparente Änderungsprozesse und automatisierte Datenintegration
- Dämpfung von Ausfallfolgen durch flexible Steuerungssoftware und offene Kommunikationsprotokolle
- Prävention von Störungen, Fehlern oder Ausfällen durch standardisierte Informationsmodelle
- Neutralisierung von Abweichungen und Fehlreaktionen durch 3D-Prüfung und digitale Prüfparameter zur Vermeidung von Fehleingriffen.
- Entlastung durch automatisierte Qualitätsprüfungen (z. B. Q-Tor ohne Bediener, Roboterkameras) zur Reduktion von Personalbindung und Fehlerquoten

Gesamtwirkung:
Technische Maßnahmen erhöhen die Systemrobustheit und minimieren Ausfallrisiken, während sie gleichzeitig schnelle Rekonfiguration in Echtzeit ermöglichen. Stabilität und Flexibilität schließen sich dabei nicht aus.

Organisationale Resilienz

Typische Effekte:

- Prävention von Fehlreaktionen und Instabilitäten durch klare Informationsflüsse und Rollenverteilungen zur Vermeidung von Unsicherheit bei Änderungen
- Dämpfung von Fehlerfortpflanzungen und Qualitätsverlusten durch Feedbackschleifen (z. B. am Q-Tor) zur Reduktion von Fehlerfolgen und zur Erhöhung der Transparenz
- Regeneration durch schnelle Entscheidungs- und Eskalationsprozesse zur zügigen Wiederherstellung nach Störungen

Gesamtwirkung:
Organisationale Maßnahmen schaffen Orientierung, beschleunigen Entscheidungen und sichern die Umsetzung komplexer Änderungen. Klare Strukturen ermöglichen Tempo, statt zu bremsen.

Vertiefende Betrachtung der Resilienzeffekte

Die Reallabor-Erprobung zeigt, wie technische, organisatorische und menschzentrierte Maßnahmen gezielt dazu beitragen können, Störungen in Produktionssystemen nicht nur zu bewältigen, sondern als Impuls für Weiterentwicklung und lernfähige Anpassung zu nutzen.

Menschzentrierte Ansätze wie Werkerassistenz oder Gamification fördern Lernfähigkeit, Motivation und situatives Handeln. Technische Lösungen wie digitale Prozessketten, Explainable AI oder synthetische Qualitätsprüfungen zielen hingegen auf Fehlervermeidung, Systemrobustheit und schnelle Anpassung.

Besonders deutlich wird dieser Zusammenhang im digitalen Änderungsmanagement. Transparenz und Nachvollziehbarkeit von Änderungen tragen hier direkt zur Risikominimierung und Systemstärkung bei. Ein zentrales Element ist die domänenübergreifende Ontologie, die technische Informationen über den gesamten Anlagenlebenszyklus hinweg strukturiert und maschinenlesbar verknüpft. Sie ermöglicht automatisierte Validierungen, konsistente Änderungsprozesse und schafft eine gemeinsame semantische Basis für Mensch und Maschine. Das Ergebnis ist nicht mehr Komplexität, sondern beherrschte Komplexität. Technische und organisationale Resilienzmechanismen greifen ineinander, fördern die Lernfähigkeit und stabilisieren das Gesamtsystem.

Die Vielfalt der beobachteten Effekte zeigt, dass Resilienz nicht eindimensional gedacht werden kann. Unterschiedliche Wirkprinzipien – Prävention, Dämpfung und Regeneration – entfalten ihre Wirkung in einem dynamischen Zyklus, der auf Lernen, Anpassung und Weiterentwicklung ausgerichtet ist.

Wirkung entlang der Resilienzkurve

Die Resilienzkurve (s. Abbildung 5) gliedert die Reaktion industrieller Produktionssysteme auf Störungen in Phasen und macht Resilienz als dynamischen, gestaltbaren Prozess sichtbar. *Werk-4.0* nutzte hierfür ein von compleneo Consulting entwickeltes Modell, das folgende Phasen unterscheidet:

- **PREVENT / AVOID – Prävention und Vermeidung von Störungen**
  Ziel dieser Phase ist es, potenzielle Stressoren frühzeitig zu erkennen und durch geeignete Maßnahmen ihre Eintrittswahrscheinlichkeit zu minimieren. Dazu gehören vorausschauendes Monitoring, Risikofrüherkennung, vorbeugende Wartung und die Sensibilisierung der Mitarbeitenden.

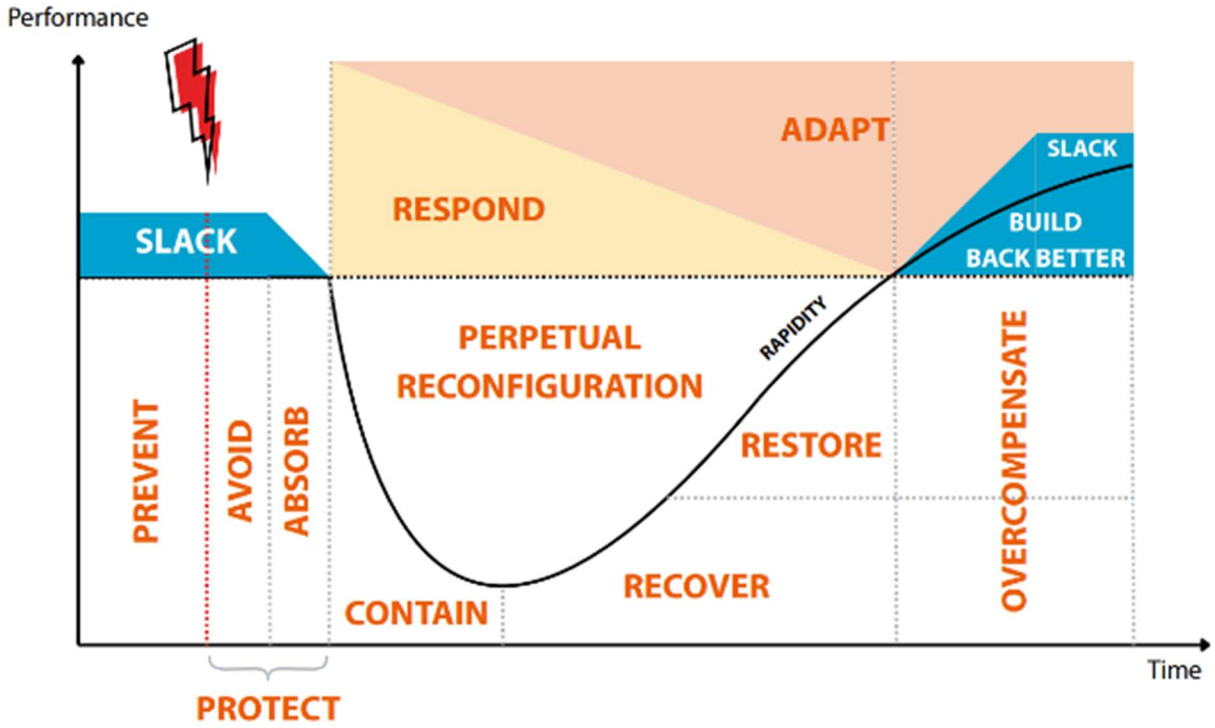


Abbildung 5. Resilienzkurve (Quelle: compleneo Consulting GmbH)

- **PROTECT (AVOID + ABSORB) – Schutz (Vermeidung + Absorption)**
  Diese Phase umfasst den Zeitraum zwischen dem Eintreten eines Störereignisses und den ersten spürbaren Auswirkungen im täglichen Betrieb. Das System nutzt vorhandene Puffer und Schutzmaßnahmen, um den initialen Schock abzufedern.
- **CONTAIN / RESPOND – Eindämmung und Reaktion**
  Das System nimmt die Störung auf, begrenzt ihre Ausbreitung und aktiviert vorbereitete Maßnahmen. In dieser Phase dominiert RESPOND: das Abrufen bestehender Notfallpläne, Prozeduren und Routinen zur Stabilisierung.
- **RECOVER / RESTORE / ADAPT – Erholung, Wiederherstellung und Anpassung**
  Das System kehrt schrittweise in einen funktionsfähigen Zustand zurück. Während anfangs noch RESPOND-Maßnahmen im Vordergrund stehen, verschiebt sich der Fokus zunehmend auf ADAPT: die Entwicklung neuer Lösungen, Prozesse und Kompetenzen, die über die ursprüngliche Situation hinausgehen.
- **OVERCOMPENSATE / BUILD BACK BETTER – Überkompensation und gestärkter Wiederaufbau**
  Besonders resiliente Systeme verbessern ihren Ausgangszustand durch

Lern- und Anpassungseffekte. Die Überkompensation, eine bewusste Überkorrektur des Systemzustands, führt zu einem höheren Leistungsniveau als vor der Störung.

- **SLACK – Ressourcen-Puffer**
  Slack bezeichnet die Gesamtheit der Ressourcen, Kompetenzen und Redundanzen, die eine Organisation bereithält. Dieser Puffer wird während einer Krise aufgebraucht, um negative Effekte abzufedern. Ohne ausreichenden Slack schlägt jede Störung unmittelbar auf das System durch.
- **PERPETUAL RECONFIGURATION – Kontinuierliche Anpassung**
  Beschreibt die fortlaufende Rekonfiguration von Prozessen, Rollen und Systemen während der Krise, insbesondere in den Phasen RESPOND und ADAPT. Es ist kein separater Zustand, sondern die Fähigkeit zur dynamischen Anpassung unter Belastung.
- **RAPIDITY – Anpassungsgeschwindigkeit**
  Rapidity ist ein Maß dafür, wie schnell ein System die Phasen der Resilienzkurve durchläuft. Je höher die Rapidity, desto schneller erfolgen Eindämmung, Erholung und Wiederherstellung.
- Entlang dieser Phasen erstrecken sich verschiedene Managementansätze mit unterschiedlichen Schwerpunkten, bspw.:
  - **Risikomanagement:** Schwerpunkt in PREVENT, AVOID, ABSORB, PROTECT
  - **Krisenmanagement:** Schwerpunkt in CONTAIN, RESPOND
  - Business Continuity Management **(BCM):** Schwerpunkt in CONTAIN, RECOVER, RESTORE
  - **Resilienzmanagement:** Erstreckt sich über alle Phasen
  - **Notfallmanagement:** Schwerpunkt in CONTAIN, RESPOND

Diese Ansätze bilden das operative und strategische Fundament zur Sicherung von Stabilität und Funktionsfähigkeit in unterschiedlichen Krisenphasen und sind integraler Bestandteil des umfassenden Resilienzverständnisses in *Werk-4.0*.

Einbettung der Resilienzansätze im Projekt Werk-4.0

Im Projekt *Werk-4.0* dient die Resilienzkurve als praxisnahes Modell zur Verortung von Stressoren, Maßnahmen und Wirkungen. Sie beschreibt den Verlauf eines Störungsfalls, von der Belastung über Reaktion und Wiederherstellung bis hin zur Anpassung und Verbesserung, und bietet einen strukturellen Rahmen für die Gestaltung resilienter Produktionssysteme.

Die entwickelten Maßnahmen adressieren zunächst die zentralen Resilienzdimensionen **menschzentriert** sowie **technisch** und entfalten ihre Wirkung entlang der Phasen.

- **1. Prävention und Vermeidung (PREVENT / AVOID) Technische Resilienz**
  Durch eine digital durchgängige Prozesskette und automatisierte Anpassungsmechanismen wird sichergestellt, dass neue Materialien oder Lieferanten ohne manuelle Eingriffe integriert werden können. Dies umfasst:
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Wird ein neuer Klebstofflieferant beauftragt, erfolgt die Integration der Materialdaten direkt im CAD-Modell. Die Klebenähte werden automatisch angepasst, Änderungen in der Robotikprogrammierung werden abgeleitet und potenzielle Prozessstörungen werden vermieden.

2. Schutz und Absorption, Eindämmung und Reaktion (PROTECT – AVOID + ABSORB / CONTAIN / RESPOND)

- **Technische Resilienz:**
  KI-gestützte Anomalieerkennung und flexible Steuerungssoftware identifizieren Abweichungen frühzeitig und ermöglichen schnelle Anpassungen.
  ***Werk-4.0*-Beispiel:** Bei einer Störung im Schraubprozess erkennt ein KI-System fehlerhafte Drehmomente, passt die Parameter automatisch an oder stoppt die Ausführung: die Produktion bleibt stabil und Folgeschäden werden verhindert.

3. Erholung, Wiederherstellung und Anpassung (RECOVER / RESTORE / ADAPT)

- **Technische Resilienz:**
  Adaptive Steuerungsalgorithmen und semantische Datenmodelle rekonfigurieren Systeme selbstständig.
  ***Werk-4.0*-Beispiel: Das digitale Änderungsmanagement** sorgt dafür, dass neue Produktparameter wie Materialeigenschaften oder Taktzeiten in Echtzeit über die gesamte Prozesskette kommuniziert und validiert werden.
- **Menschzentrierte Resilienz:**
  Interaktive Trainingsmodule und

spielerische Prozessgestaltung unterstützen Mitarbeitende beim sicheren Wiedereinstieg.
***Werk-4.0*-Beispiel:** Neue Mitarbeitende oder Rückkehrende werden mithilfe immersiver Lernsysteme zügig eingearbeitet. Einarbeitungszeit und Fehlerquote sinken, Motivation steigt.

4. Überkompensation und gestärkter Wiederaufbau (OVERCOMPENSATE / BUILD BACK BETTER)

- **Menschzentrierte und organisationale Resilienz:** Lernmodule wie der „Resilienzhelfer" fördern individuelle und kollektive Handlungskompetenz.
  ***Werk-4.0*-Beispiel:** Das Tool vermittelt Methoden zur Stressbewältigung und Entscheidungsstärkung, Resilienzkompetenzen werden dauerhaft verankert.

5. Aufnahme, Erholung und Wiederherstellung (ABSORB / RECOVER / RESTORE / OVERCOMPENSATE)

Hier steht die Fähigkeit im Mittelpunkt, Störungen zu absorbieren und die Funktionsfähigkeit rasch wiederherzustellen.

- **Technische Resilienz**: Flexible Steuerungssoftware, automatisierte Datenintegration und KI-gestützte Qualitätsprüfungen ermöglichen eine schnelle Rekonfiguration.
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Bei einer Störung im Schraubprozess erkennt ein KI-System die Anomalie frühzeitig und passt die Parameter automatisch an. Die Produktion kann stabil weiterlaufen.
- **Menschzentrierte Resilienz**: Interaktive Trainingsmodule und spielerische Prozessgestaltung unterstützen Mitarbeitende beim sicheren Wiedereinstieg.
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Neue Mitarbeitende oder Rückkehrende werden mithilfe immersiver Lernsysteme zügig eingearbeitet. Die Einarbeitungszeit und Fehlerquote sinken und die Motivation steigt.

5. Reaktion und Anpassung (RESPOND / ADAPT)

Diese Phase beschreibt die gezielte Anpassung von Prozessen und Rollen an veränderte Rahmenbedingungen.

- **Technische Resilienz**: Adaptive Steuerungsalgorithmen und semantische Datenmodelle rekonfigurieren Systeme selbstständig.
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Das digitale Änderungsmanagement sorgt dafür, dass neue Produktparameter wie Materialeigenschaften oder Taktzeiten in Echtzeit über die gesamte Prozesskette kommuniziert und validiert werden.

6. Kontinuierliche Verbesserung und Widerstandsfähigkeit (BUILD BACK BETTER / PERPETUAL RECONFIGURATION)

Diese Phase steht für die langfristige Stärkung der Resilienzfähigkeit.

- **Menschzentrierte und organisationale Resilienz**: Individualisierte und interaktive Lernmodule fördern individuelle und kollektive Handlungskompetenz.
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Das „Resilienz Helfer“-Tool vermittelt Methoden zur Stressbewältigung und Entscheidungsstärkung. Somit werden Resilienzkompetenzen dauerhaft verankert.

7. Schutz und Eindämmung (PROTECT / CONTAIN)

Diese Querschnittsphase umfasst Managementansätze zur strukturellen Absicherung der Resilienz.

- **Technische Maßnahmen**: KI-gestützte Anomalieerkennung identifiziert Abweichungen frühzeitig und verhindert Folgeschäden.
  ***Werk-4.0*-Beispiel**: Im Schraubprozess erkennt ein KI-System fehlerhafte Drehmomente und stoppt die Ausführung automatisch, sodass Schäden vermieden werden.

Monitoring und Indikatoren

Ein kontinuierliches Monitoring ist entscheidend, um Resilienzmaßnahmen wirksam zu steuern. Die Auswahl geeigneter Indikatoren erfolgte im Projekt *Werk-4.0* nicht zufällig, sondern systematisch. Jedes Arbeitspaket definierte seine Kennzahlen auf Basis der Ergebnisse des Resilienz-Workshops mithilfe externer Resilienz-Experten. Dort wurden die drei Resilienzdimensionen gemeinsam analysiert und priorisiert. Aus diesen Diskussionen entstanden praxisnahe Messgrößen, die teilweise im Testbetrieb des Reallabors erprobt wurden.

Menschzentrierte Indikatoren:

- Erlernzeit neuer Prozesse
- Fehlerquote
- Subjektive Belastung (NASA-TLX)
- Usability (SUS)
- Kompetenzaufbau
- Informationsflüsse

Technische Indikatoren:

- Maschinenvielfalt
- Anpassungs- und Adaptionsgeschwindigkeit
- Effizienzkennzahlen (Output, Fehlerquote, Durchlaufzeit)

Für die **organisationale Resilienz** wurden im Projekt *Werk-4.0* bislang keine expliziten Indikatoren festgelegt. Dies ist kein Versäumnis, sondern spiegelt die Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts wider. Verzögerungen im Testbetrieb und die begrenzte Zeit im Reallabor erschwerten eine systematische Erhebung. Zudem zeigte sich, dass organisationale Resilienz nicht allein über technische Kennzahlen abgebildet werden kann, sondern qualitative Aspekte wie Zusammenarbeit,

Entscheidungsprozesse und Lernkultur berücksichtigt werden müssen.

Warum ist das wichtig?
Organisationale Resilienz ist messbar, erfordert jedoch ein bewusstes Vorgehen, das partizipativ entwickelt wird. Ihre Wirkung zeigt sich vor allem in Strukturen, Prozessen und der Qualität der Zusammenarbeit, nicht allein in Zahlen. Deshalb sollten Indikatoren sowohl „harte“ Daten (z. B. Reaktionszeiten) als auch weiche Faktoren (z. B. Kommunikationsqualität) erfassen.

Beispielhafte Indikatoren für organisationale Resilienz

1. Reaktionszeit auf Störungen – Wie schnell werden Prozesse angepasst?

Die Reaktionszeit auf Störungen ist ein zentraler Indikator für die Anpassungsfähigkeit einer Organisation. Sie beschreibt, wie schnell Prozesse nach einer unerwarteten Unterbrechung wieder stabilisiert werden können. Eine kurze Reaktionszeit signalisiert klare Entscheidungswege und effiziente Kommunikationsstrukturen, während lange Verzögerungen auf organisatorische Hürden oder fehlende Transparenz hinweisen. In der Praxis lässt sich dieser Wert durch Zeitstempel aus Produktions- oder IT-Systemen erfassen und vor sowie nach der Einführung von Resilienzmaßnahmen vergleichen. *Werk-4.0* zeigte, dass die digitale Vernetzung und ein klar definiertes Änderungsmanagement die Reaktionszeit deutlich verkürzen können.

2. Anzahl und Qualität von Feedbackschleifen zwischen Abteilungen – Indikator für interne Vernetzung.

Die Anzahl und Qualität von Feedbackschleifen zwischen Abteilungen ist ein Indikator für die interne Vernetzung und die Fähigkeit zur gemeinsamen Problemlösung. Häufige und strukturierte Rückmeldungen fördern den Informationsfluss und verhindern Silodenken. Qualität bedeutet dabei nicht nur Häufigkeit, sondern auch die Umsetzung der Rückmeldungen in konkrete Verbesserungen. In *Werk-4.0* wurden regelmäßige interdisziplinäre Reviews durchgeführt, um Erkenntnisse aus dem Reallabor direkt in die Prozessgestaltung zurückzuführen. Solche Formate stärken die Lernfähigkeit und erhöhen die Transparenz im Unternehmen.

3. Beteiligungsquote an Lessons-Learned-Workshops – Grad der Lernorientierung.

Die Beteiligungsquote an Lessons-Learned-Workshops zeigt, wie stark eine Organisation auf Reflexion und kontinuierliche Verbesserung setzt. Hohe Teilnahmezahlen sind ein Zeichen für eine gelebte Lernkultur und Offenheit für Veränderungen. *Werk-4.0* nutzte diese Workshops, um Erfahrungen aus Pilotprojekten wie der Mensch-Roboter-Kollaboration oder der

In-Line Qualifizierung zu teilen. Die aktive Einbindung verschiedener Ebenen, von Shopfloor bis Management, erwies sich als entscheidend für die Akzeptanz und die Wirksamkeit der Maßnahmen.

4. Anteil umgesetzter Verbesserungsvorschläge – Wirksamkeit von Change-Prozessen.

Der Anteil umgesetzter Verbesserungsvorschläge misst die Effektivität von Change-Prozessen und die Glaubwürdigkeit von Beteiligungsformaten. Wenn eingereichte Ideen tatsächlich umgesetzt werden, entsteht Vertrauen und Motivation, sich aktiv einzubringen. *Werk-4.0* dokumentierte Vorschläge aus den Arbeitspaketen und verfolgte deren Umsetzung systematisch. Besonders erfolgreich waren Ansätze, die schnelle Rückmeldungen und transparente Entscheidungsprozesse sicherstellten, um die Dynamik nicht zu verlieren.

5. Kommunikationsqualität (z. B. interne Befragungen) – Transparenz und Informationsfluss.

Die Kommunikationsqualität ist ein weicher, aber entscheidender Faktor für organisationale Resilienz. Sie umfasst die Klarheit, Aktualität und Verlässlichkeit interner Informationen. Unklare oder verspätete Kommunikation erhöht das Risiko von Fehlentscheidungen und verlängert Reaktionszeiten. *Werk-4.0* kombinierte Mitarbeiterbefragungen mit Analysen digitaler Kommunikationskanäle, um Schwachstellen zu identifizieren. Die Ergebnisse zeigten, dass offene Informationspolitik und klare Eskalationswege die Anpassungsfähigkeit erheblich verbessern.

Diese Kennzahlen helfen, organisationale Resilienz aktiv zu gestalten und weiterzuentwickeln.

Wie entwickelt man Resilienz-Indikatoren?

Die Entwicklung und Pflege sollten als **gemeinsamer Prozess** erfolgen – interdisziplinär, transparent und iterativ. *Werk-4.0* nutzte dafür folgenden Workshop-Ansatz:

1. **Startpunkt:** Resilienz-Workshop mit externer fachlicher Begleitung zur Identifikation relevanter Dimensionen.
2. **Ableitung:** Jedes Arbeitspaket definierte eigene Indikatoren basierend auf den Workshop-Ergebnissen und den spezifischen Anforderungen.
3. **Validierung:** Diskussion im Konsortium, um strategische und operative Perspektiven zusammenzuführen.

Typische Beteiligte und ihre Rollen

Die Empfehlungen zu Rollen im Resilienz-Monitoring basieren nicht nur auf theoretischen Modellen, sondern auf den praktischen Erfahrungen aus dem Projekt *Werk-4.0*. Dort zeigte sich, dass Resilienz nur dann wirksam verankert wird, wenn strategische, operative und kulturelle Ebenen

zusammenarbeiten. Das Projekt schärfte relevante Rollen für eine ganzheitliche Resilienz-Betrachtung und dessen Management iterativ durch Workshops, Reallabor-Erfahrungen und die Zusammenarbeit im Konsortium.

Top-Management

Definiert die strategische Richtung und stellt sicher, dass Resilienz als Unternehmensziel verankert ist. Es priorisiert Ressourcen, schafft Rahmenbedingungen für langfristige Anpassungsfähigkeit und sorgt dafür, dass Monitoring-Ergebnisse in die Unternehmensstrategie einfließen. Ohne diese Rückendeckung bleiben Indikatoren oft wirkungslos.

Führungskräfte

Bringen die operative Perspektive ein und übersetzen strategische Vorgaben in konkrete Maßnahmen. Sie sind entscheidend für die Umsetzung im Tagesgeschäft, fördern die Akzeptanz im Team und identifizieren praxisnahe Kennzahlen, die den Arbeitsalltag widerspiegeln. Ihre Rolle ist auch, Feedback aus der Belegschaft aufzunehmen und in Verbesserungsprozesse einzubringen.

Risikomanagement und BCM

Diese Bereiche verantworten Kennzahlen zur Krisenreaktion und Ausfallsicherheit. Sie stellen sicher, dass Indikatoren wie Reaktionszeiten oder Wiederanlaufpläne systematisch erfasst werden. Ihre Expertise hilft, Risiken frühzeitig zu erkennen und Resilienzmaßnahmen in Notfall- und Präventionsstrategien zu integrieren.

Qualitätsmanagement und Organisationsentwicklung

Sie sichern Feedback- und Verbesserungsprozesse, sorgen für strukturierte Lessons-Learned-Formate, interne Audits und kontinuierliche Verbesserungszyklen. Zudem unterstützen sie die Entwicklung von Indikatoren, die nicht nur technische Qualität, sondern auch Prozessstabilität und Lernfähigkeit abbilden.

Mitarbeitende

Mitarbeitende tragen praxisnahe Perspektiven bei und erhöhen die Akzeptanz. Sie liefern wertvolle Informationen zu Belastungen, Usability und realen Anpassungsbedarfen. Ihre aktive Beteiligung in Workshops und Feedbackrunden ist entscheidend, um Indikatoren realitätsnah und umsetzbar zu gestalten. Ihre Beteiligung schafft Vertrauen und fördert eine resiliente Kultur.

Ein solches Vorgehen stellt sicher, dass das Monitoring **strategisch relevant, operativ umsetzbar und kulturell verankert** ist.

Praktische Empfehlungen für das Monitoring

Damit Resilienzmaßnahmen nicht nur definiert, sondern auch wirksam umgesetzt werden, braucht es neben aussagekräftigen Indikatoren ein Monitoring, das Fortschritte sichtbar macht und Handlungsbedarfe erkennt. Die folgenden Empfehlungen basieren auf den Erfahrungen aus dem Projekt *Werk-4.0* und zeigen, wie sich Forschungsergebnisse in die Praxis übertragen lassen.

Digitales Dashboard

Ein zentrales Dashboard ermöglicht die automatisierte Integration relevanter Datenquellen, Echtzeit-Überwachung und Schwellenwertalarme.

***Werk 4.0*-Beispiel:** Im Reallabor wurde ein Dashboard entwickelt, das Produktionsdaten wie Fehlerquote, Durchlaufzeit und Adaptionsgeschwindigkeit in Echtzeit darstellte. Schwellenwertalarme signalisierten kritische Abweichungen sofort, sodass Anpassungen direkt eingeleitet werden konnten. Dieses Tool wurde in AP3 (Arbeitspaket 3, „Lernende Produktion“) getestet und diente als Basis für die Bewertung technischer Resilienz.

Regelmäßige Reviews

Monitoring muss in interdisziplinären Review-Formaten diskutiert werden. Regelmäßige Bewertungen sichern, dass Erkenntnisse direkt in Verbesserungsprozesse zurückfließen.

***Werk-4.0*-Beispiel:** Das Konsortium führte regelmäßig Retrospektiven in allen Arbeitspaketen durch, in denen relevante Resilienz-Maßnahmen gemeinsam bewertet wurden. So wurden Ergebnisse aus dem Reallabor mit strategischen Zielen abgeglichen, konkrete Maßnahmen beschlossen und deren Fortschritt verfolgt.

Quantitative und qualitative Methoden

Resilienz ist mehr als Zahlen. Deshalb sollten Kennzahlen mit qualitativen Methoden kombiniert werden.

***Werk-4.0*-Beispiel:** Neben Kennzahlen wie Erlernzeit und Fehlerquote wurden Befragungen zur subjektiven Belastung (NASA-TLX) und Workshops zur Kommunikationsqualität durchgeführt. Diese Kombination zeigte, dass technische Anpassungen nur dann wirksam sind, wenn sie von den Mitarbeitenden akzeptiert werden.

Pilotierung neuer Indikatoren

Indikatoren sind keine statischen Größen. Neue Kennzahlen sollten zunächst im Pilotbetrieb getestet, angepasst und dynamisch erweitert werden.

***Werk-4.0*-Beispiel:** Der digitale Steuerungszwilling ermöglicht die schnelle Rekonfiguration von Prozessen und minimiert Stillstandszeiten. Durchgängige digitale

Informationsflüsse und domänenübergreifende Verwaltung von Änderungen setzen Anpassungen an Maschinenprogrammen schnell, fehlerfrei und konsistent um und machen die Anpassungsgeschwindigkeit messbar.

Kontinuierlicher Prozess

Monitoring folgt dem Zyklus Messung → Maßnahmen → Wirksamkeitsprüfung.

***Werk-4.0*-Beispiel:** Nach Einführung des „Resilienzhelfers“ (Lernmodul zur Handlungskompetenz) sollten Follow-up-Workshops seine Effekte auf Teamkommunikation und Problemlösungsfähigkeit überprüfen. So entsteht ein echter Lernprozess für die gesamte Organisation.

Erfahrungsaustausch

Resilienz lebt vom kollektiven Lernen. Der Austausch von Best Practices und Lessons Learned beschleunigt die Weiterentwicklung.

***Werk-4.0*-Beispiel:** Das Projekt etablierte Konsortialformate, in denen Erkenntnisse aus Testverfahren, z.B. in der In-Line Qualifizierung oder der Mensch-Roboter-Kollaboration, geteilt wurden. Diese Formate förderten den Wissenstransfer im gesamten Konsortium.

Organisationale Resilienz in der Praxis

Im *Werk-4.0* wurde deutlich, dass organisationale Resilienz auch ohne formale Messgrößen wirksam werden kann, wenn Strukturen geschaffen werden, die Kooperation, Transparenz und schnelle Entscheidungen fördern. Ein zentraler Erfolgsfaktor war das Agile Coaching, das durch Moderation, Konfliktklärung und die Einführung agiler Prinzipien die Zusammenarbeit zwischen den Partnern stärkte und Entscheidungsprozesse beschleunigte (Walk & Lerche, 2025).

Co-Creation-Formate spielten dabei eine wichtige Rolle. Mit dem Format **AP-Connect** wurde ein regelmäßiger Austausch zwischen den Arbeitspaketen etabliert, der Transparenz schuf und Schnittstellenprobleme reduzierte. Das **Decision Boost Panel** ermöglichte schnelle, partizipative Entscheidungen bei dringenden Themen und verkürzte Wartezeiten, die in klassischen Hierarchien oft entstehen. Ergänzend wurden für Querschnittsthemen wie IT-Infrastruktur, Reallabor oder Storytelling eigenständige Verantwortlichkeiten in Form von **Hutträgerschaften** eingeführt. Diese Rollen stellten sicher, dass übergreifende Aufgaben nicht untergingen und regelmäßig in Planungstreffen adressiert wurden.

Die Wirkung dieser Formate war deutlich spürbar. Sie verkürzten Entscheidungszyklen, minimierten Reibungsverluste zwischen Arbeitspaketen und erhöhten die Innovationsgeschwindigkeit. Vor allem zeigte sich, dass Resilienz nicht allein durch technische Redundanzen entsteht, sondern durch die Fähigkeit, Wissen und Entscheidungen schnell zu teilen. Die partizipative Einbindung aller relevanten Akteure. vom Management bis zu den operativen Teams, führte zu höherer Akzeptanz und einer Kultur des gemeinsamen Lernens. Agile Methoden und klare Verantwortlichkeiten schufen flexible Strukturen, die auch bei Unsicherheiten handlungsfähig blieben (Walk & Lerche, 2025).

Damit zeigte sich eine zentrale Erkenntnis: Organisationale Resilienz entfaltet ihre Wirkung vor allem qualitativ: in adaptiven Strukturen, offenen Kommunikationswegen und einer gelebten Kooperationskultur. Auch ohne harte Kennzahlen ist ihre Wirksamkeit erkennbar, etwa in erhöhter Reaktionsgeschwindigkeit und der Fähigkeit, sich dynamisch an neue Herausforderungen anzupassen.

Wirkungsketten der Lösungen im Projekt Werk-4.0

Werk-4.0 entwickelte zahlreiche innovative Lösungen, die gezielt verschiedene Dimensionen der Resilienz stärken. Entscheidend ist dabei das ganzheitliche Zusammenspiel: Technische Innovationen

entfalten ihre Wirkung erst vollständig, wenn sie durch organisatorische Strukturen und menschzentrierte Ansätze ergänzt werden. Die folgenden Beispiele zeigen diese Wirkungsketten konkret – von AR-Werkerassistenz über digitale Prozessketten bis zu neuen Geschäftsmodellen. Sie verdeutlichen, wie sich technische, organisatorische und menschzentrierte Perspektiven gegenseitig verstärken und erst gemeinsam resiliente Produktionssysteme schaffen.

Detaillierte Darstellung der Resilienz-Wirkungsketten

Werk-4.0 entwickelte und erprobte zahlreiche innovative Lösungen, die gezielt verschiedene Dimensionen der Resilienz stärken.

Ein zentrales Beispiel ist die **Werkerassistenz mittels Augmented Reality (AR).** Durch immersive Anleitung und Training werden neue Mitarbeitende oder Rückkehrende nach längerer Auszeit schnell und sicher in neue Prozesse eingeführt. Dies reduziert Kompetenzlücken und Ängste, verkürzt die Einarbeitungszeit und fördert Motivation sowie Fehlervermeidung. Zwar zeigte sich im Rahmen der AP6 Studien, dass Arbeitsbelastung, Handlungskompetenz und Montagezeit der herkömmlichen Lösung (Infozettel) verglichen mit der neuen Lösung (Werkerassistenz mittels AR) vergleichbar sind. Allerdings wurde die Usability als sehr gut bewertet. Folglich kann konstatiert werden, dass die getestete App die aktuelle Lösung ohne Nachteile ersetzen kann, aber weniger „Zettelwirtschaft“ getätigt werden muss.

Entlang der Resilienzkurve adressiert diese Maßnahme vor allem die Phasen Prävention, Reaktion und Anpassung und stärkt die menschzentrierte Resilienz.

Ein weiteres Beispiel ist die **In-Line Qualifizierung,** bei der Qualifizierungsmaßnahmen direkt im Prozess stattfinden und kontinuierliches Lernen ermöglichen. So bleibt der Qualifikationsstand der Mitarbeitenden stets aktuell, was flexiblen Personaleinsatz und emotionale Sicherheit bei Veränderungen fördert. Die Systemstärkung und der Kompetenzaufbau werden durch Indikatoren wie die Anzahl qualifizierter Mitarbeitender oder die Zeit bis zur Informationsweitergabe an die Belegschaft messbar. Auch hier stehen Prävention, Reaktion und Anpassung im Fokus, mit klarer Wirkung auf die menschzentrierte Resilienz.

Gamification-Ansätze, also die spielerische Gestaltung von Änderungsprozessen und Belohnungssysteme, können dazu beitragen, Motivation und Lernbereitschaft zu steigern sowie Stress abzubauen. Erste Tests lassen die Annahme zu, dass sie die mentale Regeneration und Entlastung unterstützen, was sich in einer höheren subjektiven Zufriedenheit und schnelleren Verarbeitung von Veränderungen niederschlägt, insbesondere in den Phasen der Aufnahme, Erholung und Wiederherstellung.

Im Bereich der technischen Resilienz implementierte das Team Lösungen wie **Zero Shot Quality und Explainable AI**. Zero Shot Quality ermöglicht eine automatisierte Qualitätsprüfung von Bauteilen auf Basis synthetischer Daten, wodurch Anpassungen an neue Produkte schnell und

ohne aufwändige manuelle Tests erfolgen können. Dies steigert die Flexibilität und reduziert Fehler, messbar an der Fehlerquote, Durchlaufzeit und Reaktionszeit auf Teileänderungen. Explainable AI sorgt durch transparente, nachvollziehbare KI-Entscheidungen für Akzeptanz und gezielte Fehleranalyse, was Vertrauen aufbaut und die Fehlerbehebung beschleunigt.

Die **digitale Prozesskette** und das digitale Änderungsmanagement sind weitere technische und organisationale Hebel. Durchgängige digitale Informationsflüsse und domänenübergreifende Verwaltung von Änderungen setzen Anpassungen an Maschinenprogrammen schnell, fehlerfrei und konsistent um. Dies erhöht die Effizienz, Flexibilität und Systemstärke, während Indikatoren wie Anpassungsgeschwindigkeit oder die Anzahl validierter Änderungen die Wirkung messbar machen. Besonders das Änderungsmanagement fördert sowohl organisationale als auch technische Resilienz, indem es Transparenz, Interoperabilität und Akzeptanz für Veränderungen schafft.

Der **digitale Steuerungszwilling** ermöglicht die schnelle Rekonfiguration von Prozessen und minimiert Stillstandszeiten. So werden die Anpassungsfähigkeit und Systemrobustheit gestärkt, was sich in verkürzten Ausfallzeiten und einer erhöhten Reaktionsfähigkeit auf Änderungen zeigt. Ergänzend dazu sorgen Roboterkamerasysteme und KI-gestützte Anomalieerkennung im Schraubprozess für eine automatische Fehlererkennung und -korrektur, wodurch Prozesssicherheit und Fehlervermeidung weiter erhöht werden.

Auch die Mensch-Roboter-Kollaboration trägt zur Resilienz bei, indem sie flexiblen Personaleinsatz und die Überbrückung von Engpässen ermöglicht. Die Akzeptanz und Wirksamkeit dieser Zusammenarbeit lässt sich etwa an der Produktivität bei Personalausfall oder der Akzeptanz der Werker messen.

Auf organisationaler Ebene stärken neue **Geschäftsmodelle wie XaaS (Everything as a Service) und flexible AMR-Lösungen (autonome mobile Roboter)** die wirtschaftliche und logistische Anpassungsfähigkeit. Sie ermöglichen eine flexible Nutzung und Skalierung von Ressourcen sowie eine effiziente Anpassung der Intralogistik an neue Anforderungen.

Lösungen wie der **Realtime multimodal digital twin (Qualitäts-Tor)** erhöhen die Anpassungsfähigkeit und Fehlervermeidung weiter, indem sie Referenzzustände von Bauteilen in Echtzeit erzeugen und so flexible, robuste Qualitätsprüfungen ermöglichen.

Vom Resilienz-Modell zur Anwendung – Der Resilienzhelfer als Praxisinstrument aus Werk-4.0

Werk-4.0 beschrieb Resilienz nicht nur theoretisch, sondern überführte sie konsequent in die Praxis. Die strukturierte Auswertung der Resilienz-Arbeitsblätter zeigte, wie Stressoren systematisch erfasst, entlang definierter Phasen der Resilienzkurve verortet und durch gezielte Maßnahmen adressiert werden können. Dieser methodische Ansatz, von der Identifikation über die Entwicklung bis zur skizzierten Wirkungsmessung, schärfte nicht nur das Verständnis für Resilienz, sondern legte auch die Grundlage für ein datenbasiertes Monitoring.

Die Projekterfahrung machte jedoch deutlich, dass wirkliche Resilienz erst entsteht, wenn sie im Arbeitsalltag konkret gelebt und aktiv gestaltet wird. Genau an diesem Punkt setzt der „Resilienzhelfer“ an. Er wurde als Lern- und Handlungstool entwickelt, um Mitarbeitende und Teams zu befähigen, flexibel und souverän auf Störungen zu reagieren. Indem er die Prinzipien des Resilienzmodells – Prävention, Dämpfung, Regeneration, Anpassung und Lernen – in konkrete Reflexions- und Trainingsschritte übersetzt und digitale Lernelemente mit Teamreflexionen verbindet, macht er Resilienz zur alltäglichen Kompetenzentwicklung (Pietsch et al., 2025).

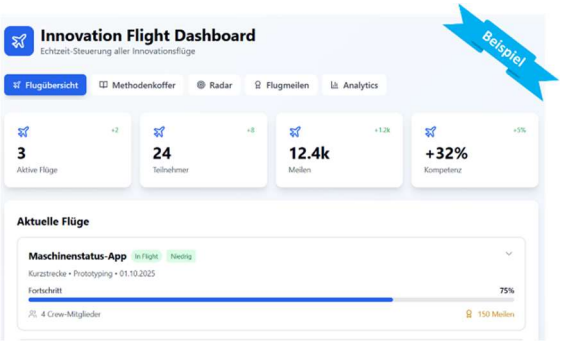


Abbildung 6. Dashboard des Resilienzhelfer-Tools

Die Einführung des Resilienzhelfers markiert damit einen entscheidenden Schritt. Das Projekt dokumentierte die gewonnenen Erkenntnisse nicht nur, sondern überführte sie in ein praxisnahes Werkzeug, das die Umsetzung im betrieblichen Alltag unterstützt. Dabei zeigte sich, dass die Wirkung von Resilienzmaßnahmen deutlich über das reine Messen von Kennzahlen hinausgeht. Entscheidend ist ein Umfeld, das kritisches Hinterfragen von Routinen, das Erkennen und Beseitigen von Hemmnissen, das Lernen aus Fehlern und die Förderung von Innovationsimpulsen ermöglicht. Nur so kann Resilienz strukturell verankert und nachhaltig wirksam werden.

Wie vielfältig der Mehrwert von Resilienz für unterschiedliche Zielgruppen ist, zeigen die Erfahrungen aus *Werk-4.0*: Für das Management bedeutet Resilienz vor allem Steuerbarkeit und Wirtschaftlichkeit, z. B. durch reduzierte Ausfallzeiten, adaptive Systeme und produktive, lernfähige

Teams. Mitarbeitende profitieren von erhöhter Handlungssicherheit, Motivation und Selbstwirksamkeit, da sie durch Assistenzsysteme, klare Kommunikation und gezielte Trainings aktiv in Veränderungsprozesse eingebunden werden. Organisationseinheiten gewinnen an Anpassungsfähigkeit, profitieren von verbesserten Entscheidungswegen und einer transparenteren Zusammenarbeit. Auf systemischer Ebene schließlich wird Resilienz zum Multiplikator: Sie verbindet Stabilität mit Agilität, fördert Innovation und stärkt die Unternehmenskultur.

Der Resilienzhelfer steht somit exemplarisch für den Transfer von Theorie in die Praxis und macht greifbar, wie Resilienz im *Werk-4.0* nicht nur gedacht, sondern tatsächlich gelebt und gestaltet wird. Das methodische Vorgehen zum Resilienzhelfer kann bei (Pietsch et al., 2025) nachgelesen werden.

Resilienz-Dividende und Transfer – Was Werk-4.0 zeigt

Ein zentrales Ziel von *Werk-4.0* war es, die sogenannte Resilienz-Dividende sichtbar zu machen, d.h. den langfristigen Nutzen, den Unternehmen aus Investitionen in resiliente Strukturen ziehen können. Gemeint ist nicht nur die gestärkte Anpassungs- und Reaktionsfähigkeit, sondern auch ein messbarer wirtschaftlicher und organisatorischer Mehrwert.

Auch wenn im Projektverlauf keine vollständige betriebswirtschaftliche Auswertung möglich war, wurden Methoden entwickelt, mit denen Unternehmen die Wirkung von Resilienzmaßnahmen, wie dem Resilienzhelfer, eigenständig bewerten können. Dazu zählen die Monetarisierung relevanter Indikatoren wie Fehlerquote oder Stillstandszeiten, Vorher-Nachher-Vergleiche, Schadensvermeidungssimulationen und die Gegenüberstellung von Investitionen und Nutzen. Ein einfacher Business Case kann zeigen, nach welcher Zeit sich Maßnahmen amortisieren, z. B. durch vermiedene Ausfallkosten oder Produktivitätsgewinne.

Ein Beispiel: Die Einführung eines AR-gestützten Assistenzsystems für Werkertraining mit Investitionskosten von 80.000 € führte zu einer um 30 % verkürzten Einarbeitungszeit und einer um 25 % reduzierten Fehlerquote. Allein durch die schnellere Einarbeitung bei 20 Neueinstellungen pro Jahr ergibt sich eine jährliche Einsparung von 15.000 €, ergänzt durch weitere 10.000 € durch geringere Nacharbeit. Die Amortisation erfolgt nach rund 3,5 Jahren, qualitative Effekte wie Motivation und Flexibilität nicht eingerechnet.

Unternehmen können solche Modelle auf weitere Maßnahmen übertragen, etwa auf In-Line Qualifizierung oder digitales Änderungsmanagement. Entscheidend ist, direkte und indirekte Effekte gemeinsam zu betrachten, um den tatsächlichen Mehrwert ganzheitlich zu erfassen.

Die Erfahrungen aus *Werk-4.0* zeigen, dass Resilienz gestaltbar und messbar ist, ihre Umsetzung bzw. Stärkung aber auch Herausforderungen mit sich bringt.

Erkenntnisse aus Werk-4.0 – Herausforderungen, Learnings und strategische Perspektiven

Die Entwicklung und Umsetzung von Resilienzmaßnahmen im Projekt *Werk-4.0* hat gezeigt, wie anspruchsvoll es ist, Resilienz im industriellen Kontext wirksam zu gestalten. Dabei wurden zentrale Herausforderungen sichtbar, aber auch wertvolle Erkenntnisse gewonnen, die als Impulse für zukünftige Projekte dienen können.

Ein zentrales Spannungsfeld war die **konzeptionelle Verortung** von Resilienz, denn als mehrdimensionales Prinzip lässt sie sich nur bedingt in klassische Kennzahlen fassen. Als mehrdimensionales Prinzip ließ sie sich nur bedingt in klassische Kennzahlen fassen. Die Entwicklung geeigneter Indikatoren erwies sich als kontextabhängig und komplex. Gleichzeitig war die Hypothesenbildung im Reallabor herausfordernd, da zahlreiche Einflussfaktoren gleichzeitig wirkten und sich gegenseitig überlagerten. Auch die **Zusammenarbeit** im Konsortium erforderte ein hohes Maß an Abstimmung: unterschiedliche Erwartungen, Kommunikationsbedarfe und Prioritäten mussten ausbalanciert werden. Die Etablierung gemeinsamer Entscheidungslogiken und Rollen half, diese Spannungsfelder produktiv zu gestalten. Ein gemeinsames Verständnis von Resilienz wurde methodisch erarbeitet und bildete die Grundlage für die Integration in technische, organisatorische und menschzentrierte Arbeitspakete.

Es wurde sehr deutlich, dass Resilienz kein Zustand, sondern vielmehr ein dynamischer Prozess ist. Sie entfaltet ihre Wirkung nur im Zusammenspiel aller Ebenen – organisatorisch, technisch und menschzentriert. Einzelmaßnahmen bleiben wirkungslos, wenn sie nicht systemisch eingebettet sind. Die Orientierung an den Phasen der Resilienzkurve, von Prävention über Reaktion bis zur Erholung, erwies sich als hilfreich für die gezielte Gestaltung von Unterstützungsmechanismen. Der Wandel vom klassischen Produktionswerk hin zum resilienten Kompetenzwerk markiert dabei den Kern der Transformation.

Für zukünftige Projekte lassen sich daraus zentrale Lessons Learned ableiten: Resilienz sollte bereits im Projektantrag mitgedacht und verankert werden, vergleichbar mit Querschnittsthemen wie Nachhaltigkeit oder Digitalisierung. Die kontinuierliche Erhebung und Reflexion von Resilienz Indikatoren ist essenziell, um Entwicklungen sichtbar und steuerbar zu machen. Dabei empfiehlt sich eine Priorisierung der Indikatoren entlang bestehender Managementsysteme wie Risikomanagement oder Business Continuity Management, um Synergien zu nutzen und Doppelstrukturen zu vermeiden. Die Etablierung eines klaren Resilienzmanagements mit definierten Rollen, Zuständigkeiten und einer lernorientierten Unternehmenskultur ist Voraussetzung für nachhaltige Wirkung.

Die nachhaltige Verankerung von Resilienz erfordert zudem eine **kontinuierliche Weiterentwicklung**. Das bestehende Indikatoren-Set sollte regelmäßig überprüft, validiert und gezielt erweitert werden, insbesondere mit Blick auf die organisationale Resilienz. Monitoring- und Feedbackprozesse helfen, die Wirkung langfristig zu beobachten und gezielt weiterzuentwickeln. Dazu gehören regelmäßige

Datenauswertungen, qualitative Rückmeldungen aus den Fachbereichen und die Ableitung konkreter Verbesserungsmaßnahmen.

Die im Projekt gesammelten Erfahrungen bieten eine wertvolle Grundlage, um Good Practices zu identifizieren, zu dokumentieren und in die Resilienzstrategie und Managementsysteme des Unternehmens zu integrieren. Ein kontinuierlicher **Erfahrungsaustausch** zwischen den Projektpartnern und weiteren Akteuren der Branche sowie ein echtes **Netzwerklernen** unterstützen eine gemeinsame Lern- und Entwicklungskultur und stärkt die Resilienzfähigkeit im gesamten Netzwerk.

Diese Erkenntnisse münden in eine zentrale Schlussfolgerung. Resilienz ist kein einmaliger Kraftakt, sondern ein fortlaufender Entwicklungsprozess, der auch über das Projektende hinaus aktiv gestaltet werden muss. Nur wenn Strukturen, Prozesse und Indikatoren kontinuierlich gepflegt und weiterentwickelt werden, kann Resilienz dauerhaft Wirkung entfalten.

Resilienz als strategisches Prinzip und Zukunftsinvestition

Die Erfahrungen aus *Werk-4.0* verdeutlichen, dass Resilienz weit mehr ist als eine Reaktion auf Krisen. Sie ist ein zukunftsweisendes Prinzip für industrielle Wertschöpfung. Während klassische Systeme auf Robustheit und das Aushalten von Belastungen setzen, geht Resilienz einen entscheidenden Schritt weiter. Sie befähigt Organisationen, sich flexibel anzupassen, aus Herausforderungen zu lernen und auch unter unsicheren Bedingungen leistungsfähig zu bleiben. Damit wird Resilienz zum Motor für Innovation, Anpassungsfähigkeit und nachhaltigen Erfolg.

Die Resilienz-Dividende zeigt sich nicht nur in der Bewältigung von Störungen, sondern vor allem im gestärkten Umgang mit Wandel. Unternehmen, die Resilienz als strategisches Fundament integrieren, schaffen die Grundlage dafür, nicht nur auf Störungen zu reagieren, sondern aktiv Chancen zu nutzen, neue Wege zu gehen und ihre Wettbewerbsfähigkeit langfristig zu sichern.

Von der Erkenntnis zur Anwendung

Die im Projekt entwickelten Methoden und Modelle sind auf andere industrielle Kontexte übertragbar. Bewertungsansätze, Szenarien und Zielbildprozesse bieten eine Blaupause für eigene Resilienzinitiativen und gerade der Austausch zwischen Industrie und Wissenschaft hat sich als wertvoll erwiesen. Andere Unternehmen sind eingeladen, sich an Netzwerken zu beteiligen und gemeinsam Good Practices zu entwickeln.

Technologien wie digitale Zwillinge, KI-Inspektoren oder Werkerassistenzsysteme

bieten Anknüpfungspunkte für Pilotprojekte. Die in diesem White Paper vorgestellte Systematik kann als Ausgangspunkt für ein kontinuierliches Resilienzmanagement dienen. Workshops, Partnerschaften mit Forschungseinrichtungen und eigene Reallabore helfen, innovative Ansätze praxisnah zu erproben und dauerhaft in die industrielle Praxis zu überführen.

Der Austausch und das Ausprobieren sind besonders wichtig, denn **Resilienz entfaltet ihre Wirkung auch im Netzwerk.** Einzelne Unternehmen profitieren, wenn sie Erkenntnisse teilen, gemeinsam Lösungen entwickeln und voneinander lernen. Transferformate wie Konsortial-Workshops, branchenübergreifende Arbeitskreise oder digitale Wissensplattformen beschleunigen die Verbreitung wirksamer Praktiken.

Dabei gilt, dass erst die bewusste Verknüpfung mit Co-Creation und Nutzerzentrierung Resilienzmaßnahmen wirksam werden lässt und nachhaltig verankert. Co-Creation ermöglichte echte Zusammenarbeit und förderte eine offene Lernkultur. Nutzerzentrierung stellte sicher, dass Lösungen an den tatsächlichen Bedürfnissen der Mitarbeitenden ansetzen, und erhöhte die Akzeptanz neuer Technologien. Die Integration beider Ansätze sorgte dafür, dass Resilienz im *Werk-4.0* nicht nur konzipiert, sondern konkret erlebbar wurde – durch Formate wie die In-Line Qualifizierung oder den „Resilienzhelfer". Diese Verbindung stärkte die organisationale, technische und menschzentriert Resilienz gleichermaßen. Rückkopplung aus Co-Creation-Prozessen und die konsequente Einbindung der Nutzer:innen führten zu einer stetigen Weiterentwicklung der Maßnahmen und machten Resilienz zur gelebten Praxis.

Ausblick – Einladung zur Mitgestaltung

Der Weg zu resilienten Produktionssystemen verbindet technologische Innovation, organisatorisches Lernen und menschzentrierte Gestaltung. Die im Projekt entwickelten Ansätze – von digitalen Zwillingen über In-Line Qualifizierung bis zu Co-Creation-Formaten – sind Bausteine, die sich flexibel kombinieren und an spezifische Anforderungen anpassen lassen. Resilienz wird so zum strategischen Prinzip, das nicht nur Krisen bewältigt, sondern Wandel aktiv gestaltet.

Werk-4.0 versteht sich als Impulsgeber für eine resilientere Industrie und fördert Austausch, Kooperation und Weiterentwicklung zwischen Forschung und Praxis.

Glossar

Zentrale Begriffe dieses White Papers

Adaptionsgeschwindigkeit
Kennzahl für die Zeit, die ein Produktionssystem benötigt, um nach einer Störung oder Änderung wieder in einen stabilen Betriebszustand zu gelangen. Misst die operative Flexibilität.

Business Continuity Management
Managementsystem zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit bei Störungen und Krisen.

Co-Creation
Gemeinsame Entwicklung von Lösungen durch verschiedene Stakeholder (Industrie, Forschung, Mitarbeitende), um Akzeptanz, Vertrauen und kollektives Lernen zu fördern.

Digitale Zwillinge
Virtuelle Abbilder physischer Systeme, die Simulationen und Szenarioanalysen ermöglichen, um Anpassungsfähigkeit und Resilienzmaßnahmen ex-ante zu testen.

Handlungskompetenz
Die Fähigkeit von Mitarbeitenden und Teams, in komplexen und unsicheren Situationen eigenständig und wirksam zu agieren.

Lagging Indicator
Kennzahl, die die Reaktion auf eine bereits eingetretene Störung misst (z. B. Time-to-Recover, Fehlerquote).

Leading Indicator
Frühwarnkennzahl, die potenzielle Risiken oder Anpassungsbedarfe prognostiziert, bevor eine Störung eintritt (z. B. Sensordaten, Mustererkennung).

Lessons Learned
Strukturierte Reflexion nach Projekten oder Störungen, um Erfahrungen zu dokumentieren und Verbesserungsmaßnahmen abzuleiten.

Monitoring
Kontinuierliche Erfassung und Auswertung von Kennzahlen zur Resilienzleistung, um Fortschritte sichtbar zu machen und Handlungsbedarfe frühzeitig zu erkennen.

NASA-TLX (NASA Task Load Index)
Instrument zur Messung der subjektiven Arbeitsbelastung.

Nutzerzentrierung
Ansatz, der die Perspektive der Anwender systematisch in die Entwicklung von Prozessen, Technologien und Organisationsstrukturen integriert, um Akzeptanz und Praxistauglichkeit sicherzustellen.

Reallabor
Das *Werk-4.0* Reallabor ein zentraler Bestandteil des Projektes und dient als Test- und Demonstrationsumgebung für die Produktion der Zukunft.

Resilience Triangle
Grafische Darstellung des Leistungsabfalls und der Erholungskurve eines Systems nach einer Störung. Die Fläche unter der Kurve zeigt den Grad der Resilienz.

Resilienz
Die Fähigkeit eines Produktionssystems, auf unerwartete Ereignisse flexibel und vorausschauend zu reagieren, Störungen zu absorbieren und daraus Verbesserungen abzuleiten. Im Unterschied zur Robustheit setzt Resilienz auf aktive Anpassung, Lernfähigkeit und Selbstoptimierung.

Resilienz-Dividende
Mehrwert, der durch resiliente Strukturen entsteht – nicht nur in Krisen, sondern auch im Normalbetrieb, etwa durch höhere Flexibilität, Innovationsfähigkeit und Prozessstabilität. Im Projekt *Werk-4.0* bedeutet dies die Erfassung und Bewertung des kollektiven Resilienzbeitrags aller Partner – als Ergebnis einer integrierten Strategie, die Prozesse, Strukturen und Kooperationen widerstandsfähiger und zukunftsfähiger macht.
Die durch *Werk-4.0* angestoßene Verbindung von technischen Innovationen und sozialen Prozessen eröffnet neue Perspektiven für die zukunftsfähige Gestaltung industrieller Produktionssysteme. Besonders hervorzuheben ist, wie die konsequente Einbindung verschiedener Stakeholder in die Entwicklung und Erprobung von Resilienzmaßnahmen eine offene Dialogkultur und ein gemeinsames Verantwortungsbewusstsein fördert. Daraus entstehen praxisnahe Lösungen, die flexibel auf spezifische Herausforderungen reagieren und

kontinuierlich weiterentwickelt werden können. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass eine nachhaltige Resilienz nicht allein durch technische Optimierung, sondern vor allem durch die Integration organisationaler Lernprozesse und die Stärkung menschlicher Handlungskompetenz erreicht wird. Damit schafft *Werk-4.0* die Grundlage für eine neue Generation von Produktionssystemen, die Wandel als Chance begreifen und durch ihre Anpassungsfähigkeit sowohl im Krisenfall als auch im Alltag bestehen können.

Robustheit
Eigenschaft eines Systems, Belastungen ohne strukturelle Veränderungen zu überstehen. Fokus liegt auf Stabilität und Durchhalten, nicht auf Anpassung oder Weiterentwicklung.

Reifegradmodell
Ein Reifegradmodell zur Messung von Resilienz im industriellen Kontext ist ein strukturierter Bezugsrahmen, der den Entwicklungsstand von Organisationen oder Prozessen anhand definierter Stufen beschreibt, um die Fähigkeiten zur Widerstandsfähigkeit und Anpassung systematisch zu bewerten und gezielt zu verbessern.

Scorecard/ Resilience Balanced Scorecard
Instrument zur aggregierten Bewertung von Resilienz anhand mehrerer Dimensionen wie Robustheit, Agilität, Adaptivität und Visibilität. Ermöglicht Managemententscheidungen auf Basis gewichteter Indizes.

Time-to-Recover (TTR)
Performance-basierte Metrik, die die Dauer bis zur Wiederherstellung der ursprünglichen Leistungsfähigkeit nach einer Störung angibt.

Quellen

Bruckler, M., Wietschel, L., Messmann, L., Thorenz, A., & Tuma, A. (2024). Review of metrics to assess resilience capacities and actions for supply chain resilience. *Computers & Industrial Engineering, 192*, 110176.

Internationale Organisation für Normung. (2017). Security and resilience - Organizational resilience - Principles and attributes (22316:2017).

Knapp, D., & Richter, D. (2023). Evaluierung von Entscheidungsunterstützung durch das Cynefin-Framework. Informationswissenschaft im Wandel. Wissenschaftliche Tagung 2022 (IWWT22). https://doi.org/10.5281/zenodo.7457722

Knüpper, J., Haas, A., Lüdemann-Ravit, B., Schmitt, F., Grieser, P., Hanzelmann, A., Schleipen, M., & Genikomsidis, D. (2025). Measuring Resilience: A New Perspective on Assessing Production Facilities Through an OEE Based Resilience Metric. Advances in Automotive Production Technology – Digital Product Development and Manufacturing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88831-1_16

Kohl, H. (Director). (2021). White Paper »RESYST«: Resiliente Wertschöpfung in der produzierenden Industrie – innovativ, erfolgreich, krisenfest. In *Fraunhofer*. Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. https://doi.org/10.24406/publica-fhg-301287

Lerche, L., Reuter, S., & Pietsch, K. (2025). Experimentelle Untersuchung des Effekts der In-Line-Qualifizierungs-App aus dem Projekt Werk 4.0 bei Montagetätigkeiten auf Handlungskompetenz, Arbeitsbelastung und Unterstützungsbedarf. Anhang zum Whitepaper „Nutzerzentrierung als strategisches Prinzip für resiliente Produktionssysteme – Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt Werk 4.0“. Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V. https://wvsc.berlin/pub/experimentelle-untersuchung-des-effekts-der-in-line-qualifizierungs-app-aus-dem-projekt-werk-4-0-bei-montagetaetigkeiten-auf-handlungskompetenz-arbeitsbelastung-und-unterstuetzungsbedarf/

Pietsch, K., Reuter, S. & Walk, A.-C. (2025). Nutzerzentrierung als strategisches Prinzip für resiliente Produktionssysteme – Erfahrungen und Erkenntnisse aus dem Projekt Werk 4.0. Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V. https://wvsc.berlin/pub/nutzerzentrierung-als-strategisches-prinzip-fuer-resiliente-produktionssysteme-erfahrungen-und-erkenntnisse-aus-dem-projekt-werk-4-0/

Rincón-Guio, C., & Sarache, W. (2024). Mapping the multifaceted landscape of resilience in manufacturing strategy: a systematic literature review and future research avenues. *Journal of Industrial Integration and Management, 9*(02*)*, 157-193.

Schmitt, K., Bischoff, K., & Wolf, C. (2025). Resilient Production based on standardized, semantic, and interlinked Data Foundation. 2025 IEEE 30th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). https://doi.org/10.1109/ETFA65518.2025.11205705

Stachowiak, A., & Pawłyszyn, I. (2021). From Fragility through Agility to Resilience: The Role of Sustainable Improvement in Increasing Organizational Maturity. *Sustainability*, *13*(9), 4991. https://doi.org/10.3390/su13094991

Wachter, C., Beckschulte, S., Hinrichs, M. P., Sohnius, F., & Schmitt, R. H. (2024). Strategies for Resilient Manufacturing: *A Systematic Literature Review of Failure Management in Production. Procedia CIRP, 130*, 1393-1402

Walk, A.-C., Lerche, L. (2025). Vom Mindset-Clash zur gemeinsamen Innovationskultur: Agile Zusammenarbeit in Verbundprojekten. Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V. https://wvsc.berlin/pub/vom-mindset-clash-zur-gemeinsamen-innovationskultur-agile-zusammenarbeit-in-verbundprojekten/

Das Projekt Werk-4.0

Konsortialpartner

Förderung

Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) in der Förderrichtlinie „Digitalisierung der Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie“ im Förderrahmen „Zukunftsinvestitionen Fahrzeughersteller und Zulieferindustrie“ gefördert und vom Projektträger VDI Technologiezentrum GmbH betreut.

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Impressum

Herausgeber

Werner-von-Siemens Centre for Industry and Science e.V.

Rohrdamm 88

13629 Berlin, Deutschland

Autorinnen

Ulrike Munz, Heike Kühn

Kontakt

forschung@wvsc.berlin

Website

https://wvsc.berlin/

https://wvsc.berlin/projekt/werk4-0/

Veröffentlichung

Dezember 2025

Bildrechte

Titelbild: Abbildung von compleneo consulting GmbH