ALLIANZ Industrie 4.0 BADEN-WÜRTTEMBERG

Fraunhofer ISI

Industrie 4.0 in Baden-Württemberg

(r)Evolution im Kontext von Nachhaltigkeit und Resilienz

Ort: Stuttgart, Karlsruhe

Datum: Dezember 2023

Impressum

Industrie 4.0 in Baden-Württemberg: (r)Evolution im Kontext von Nachhaltigkeit und Resilienz

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Dr. Christian Lerch, Christian.lerch@isi.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Christian Lerch, Christian.lerch@isi.fraunhofer.de; Angela Jäger Angela.jäger@isi.fraunhofer.de; Djerdj Horvat, Djerdj.horvat@isi.fraunhofer.de; Daniel Berner, Daniel.berner@isi.fraunhofer.de

Verfasst im Auftrag von

Koordinierungsstelle Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg
beim VDMA Baden-Württemberg

Kronenstraße 3, 70173 Stuttgart

Bildnachweis

Deckblatt: Bild generiert durch shutterstock.com/U.P.SD

Zitierempfehlung

Lerch, C.; Jäger, A.; Horvat., D.; Berner, D. (2023): Industrie 4.0 in Baden-Württemberg: (r)Evolution im Kontext von Nachhaltigkeit und Resilienz (Kurzfassung). Stuttgart: Koordinierungsstelle Allianz Industrie 4.0 Baden-Württemberg; Karlsruhe: Fraunhofer ISI.

Veröffentlicht

Dezember 2023

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Überblick zur Studie ... 1

2 Methodologische Grundlagen ... 3

2.1 Erhebung *Modernisierung der Produktion* des Fraunhofer ISI ... 3

2.2 Wesentliche Indikatoren der Studie ... 4

2.2.1 Der I4.0-Readiness-Index des Fraunhofer ISI ... 4

2.2.2 Zwei Indikatoren betrieblicher Nachhaltigkeitsorientierung ... 5

2.2.3 Messung von Resilienz und Vulnerabilität im Verarbeitenden Gewerbe ... 7

2.2.4 Weitere Kenngrößen und Strukturindikatoren ... 11

3 Entwicklung der I4.0-Readiness im Verarbeitenden Gewerbe ... 12

3.1 Die Entwicklung der I4.0-Readiness 2015-2022 ... 12

3.1.1 Entwicklung der I4.0-Readiness im regionalen Vergleich ... 12

3.1.2 Besonderheiten der Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg ... 13

3.2 Strukturelle Bedingungen für die I4.0-Readiness im Verarbeitenden Gewerbe ... 15

3.2.1 I4.0-Readiness nach Betriebsgrößenklassen ... 15

3.2.2 I4.0-Readiness im Branchenvergleich ... 17

3.2.3 I4.0-Readiness entlang der Wertschöpfungskette ... 18

3.2.4 I4.0-Readiness nach Produktionscharakteristika ... 20

3.3 Technologische Fundierung der I4.0-Readiness ... 22

3.3.1 Relevante Technologien im Zeitvergleich ... 22

3.3.2 Verbreitung relevanter Technologien im regionalen Vergleich ... 23

4 Ökologische Nachhaltigkeit und I4.0-Readiness ... 25

4.1 CO_2-Bilanzierung im Verarbeitenden Gewerbe ... 25

4.1.1 Regionaler und struktureller Vergleich der CO_2-Bilanzierung ... 25

4.1.2 CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness ... 27

4.2 Anteil der Energiekosten im Verarbeitenden Gewerbe ... 30

4.2.1 Energiekosten im Verarbeitenden Gewerbe ... 30

4.2.2 Regionaler und struktureller Vergleich der Energiekostenanteile ... 32

4.2.3 Energiekostenanteile und I4.0-Readiness ... 33

5 Resilienz und I4.0-Readiness ... 36

5.1 Resilienz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes ... 36

5.1.1 Bewertung anhand eines Resilienz-Index und regionale Unterschiede ... 36

5.1.2 Strukturelle Bedingungen der Resilienz ... 38

5.2 Vulnerabilität der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes ... 40

5.2.1 Bewertung der Vulnerabilität anhand eines Gesamtindex und regionale Unterschiede ... 40

5.2.2 Strukturelle Bedingungen von Risiken ... 42

5.3 Resilienz und I4.0-Readiness ... 45
5.3.1 Perspektive resiliente Handlungsmöglichkeiten und I4.0 ... 45
5.3.2 Perspektive Vulnerabilität und I4.0 ... 46
5.4 Retrospektiver Exkurs: Vulnerabilität durch Russlandgeschäfte ... 47

6 Fazit zur vierten industriellen (r)Evolution ... 52

7 Abbildungsverzeichnis ... 54

8 Tabellenverzeichnis ... 56

9 Literatur ... 57

1 Einleitung und Überblick zur Studie

Die Industrie 4.0 (I4.0) beschreibt seit 2011 das Leitbild für produzierende Unternehmen und das Verarbeitende Gewerbe. Sie formuliert ein neues Produktionsparadigma, welches auf cyber-physischen Systemen und dem Internet of Things (IoT) basiert. Technologische Grundlage bildet die digitale Vernetzung von Produktionssystemen innerhalb von Betrieben, aber auch über die Unternehmensgrenzen hinaus. Für kaum eine andere Region gehen solch weitreichende Chancen, jedoch auch Herausforderungen mit dieser Entwicklung einher, wie für Baden-Württemberg als führendem Industriestandort in Europa.

Für die Wirtschaft und Politik aus dem Südwesten stellt sich daher die Frage, wie sich die Industrie 4.0 in den vergangenen Jahren entwickelt hat, welche Stärken Baden-Württemberg als I4.0-Standort aufweist und wo Potenziale bestehen, die es noch auszuschöpfen gilt.

Jenseits dieser vierten industriellen Revolution existieren mittlerweile auch weitere globale Trends, die sich direkt auf die Produktion auswirken. Dies ist einerseits der Klimawandel, welcher die Notwendigkeit einer ressourcenschonenden und zugleich CO_2-armen Produktion verstärkt. Andererseits hat die COVID-19-Pandemie den Bedarf einer resilienten Produktion, die auf unvorhersehbare Störereignisse vorbereitet ist, drastisch vor Augen geführt. Folglich ist nicht nur die Entwicklung und der Fortschritt der I4.0 in den letzten Jahren von Interesse, sondern betrachtet wird auch das Zusammenspiel im Hinblick auf ökologische Nachhaltigkeit und Resilienz von Produktionssystemen. Die Studie geht dabei den folgenden drei Leitfragen nach:

1) Wie hat sich die Industrie 4.0 in den vergangenen Jahren und bis 2022 im Verarbeitenden Gewerbe fortentwickelt?
2) Welchen Einfluss nimmt die Industrie 4.0 auf die produktionsrelevanten Trends der ökologischen Nachhaltigkeit und der Resilienz von Produktionsbetrieben?
3) Welche Rolle nimmt Baden-Württemberg als I4.0-Standort ein, welche Besonderheiten, Stärken und Schwächen sind im Land auszumachen?

Um die Entwicklung der Industrie 4.0 im gesamten Verarbeitenden Gewerbe und insbesondere auch in Baden-Württemberg empirisch zu analysieren und daraus Schlussfolgerungen für Politik und Wirtschaft zu ziehen, wurde im Jahr 2015 vom Fraunhofer ISI ein I4.0-Index entwickelt (Lerch et al. 2017; Lerch et al. 2020). Dieser basiert auf zentralen digitalen Technologien der I4.0 und ist in der Lage, den aktuellen Stand und den Fortschritt der Digitalisierung in der Produktion abzubilden. Anhand dieses I4.0-Index können damit Spezifika von Regionen und Bundesländern sowie Branchen dargestellt sowie Unterschiede bei verschiedenen Betriebs- und Produktionscharakteristika untersucht werden (Lerch et al. 2016). Der I4.0-Index wird erneut für die empirischen Analysen dieser Untersuchung herangezogen. Grundlage dieser Studie bildet dabei die repräsentative Industriebefragung *Modernisierung der Produktion* des Fraunhofer ISI. Um die Veränderungen und das Zusammenspiel der verschiedenen Entwicklungen zu betrachten kommen die Erhebungswellen von 2015, 2018 und 2022 zum Einsatz. Diese Befragungen sind auch die Grundlage der bisherigen Studien zum I4.0-Index und enthalten Angaben zu den hierfür notwendigen digitalen Produktionstechnologien.

Die Ergebnisse der Studie zeigen auf, dass sich die Readiness für Industrie 4.0 seit 2015 im Verarbeitenden Gewerbe kontinuierlich weiter verbreitet hat. Seit 2018 ist jedoch im Vergleich zu den Jahren davor ein deutlich verlangsamter Fortschritt auszumachen. So lag dieser zwischen 2015 und 2018 bei 12%, in den Jahren 2018-2022 nur noch bei 5%, bezogen auf die Messung des I4.0-Rea-

diness-Index. Die Dynamik gestaltete sich in diesen beiden Zeiträumen sehr unterschiedlich – möglicherweise auch bedingt durch die COVID-19-Pandemie und den damit verbundenen Einschränkungen.

Baden-Württemberg bleibt trotz unterdurchschnittlichem Fortschritt der letzten Jahre im Vergleich zu Gesamtdeutschland nach wie vor der führende I4.0-Standort in Deutschland, der I4.0-Readiness-Indexwert ist 12% größer als der Gesamtdeutschlands. Die Gründe für diese Führungsrolle sind einerseits, dass insbesondere kleine Betriebe sowie Zulieferer und Industriegüterhersteller im Südwesten bei der I4.0 deutlich stärker aufgestellt sind. Andererseits kommt Baden-Württemberg der hier weit verbreitete Maschinen- und Fahrzeugbau zugute, der eine grundsätzlich hohe I4.0-Orientierung aufweist. Darüber hinaus zeigt sich, dass die I4.0 die ökologische Nachhaltigkeit eher befördert als bremst. Zudem befähigt sie Betriebe, die Resilienz ihrer Produktionssysteme zu erhöhen. Auf Basis der Studienergebnisse lässt sich schlussfolgern, dass die I4.0 und deren konkrete Technologien somit durchaus ein Vehikel darstellen, um Nachhaltigkeit und Resilienz in der Produktion zu stärken.

Die Studie ist wie folgt aufgebaut: Nach der Einleitung wird in Kapitel 2 die durch das Fraunhofer ISI durchgeführte Betriebsbefragung von *Modernisierung der Produktion* sowie deren Verwendung als Datengrundlage für diese Studie beschrieben und die Indikatoren zur Messung der I4.0-Readiness, die Nachhaltigkeitsindikatoren sowie der Index zur Messung der Resilienz dargelegt. Kapitel 3 erläutert die Entwicklung der Industrie 4.0 in den Jahren 2015-2022 und zeigt Unterschiede nach Regionen, entlang der Wertschöpfungskette sowie nach Betriebs- und Produktionscharakteristika auf. In Kapitel 4 wird das Zusammenspiel von Industrie 4.0 und ökologischer Nachhaltigkeit beleuchtet, während Kapitel 5 die Resilienz von Produktionsbetrieben in den Blick nimmt. Ein Fazit wird abschließend in Kapitel 6 gezogen. Die spezifische Perspektive Baden-Württembergs wird explizit in allen Kapiteln im Vergleich zu anderen Regionen bzw. Bundesländern eingenommen.

2 Methodologische Grundlagen

Im Folgenden wird zunächst die Datenbasis für die Analysen dieser Studie vorgestellt. Dem folgend sind die Operationalisierungen zentraler Indikatoren der Analysen detailliert beschrieben.

2.1 Erhebung *Modernisierung der Produktion* des Fraunhofer ISI

Die in dieser Studie dargestellten Analysen zur Entwicklung I4.0-Readiness basieren im Wesentlichen auf Analysen der Erhebung *Modernisierung der Produktion* aus dem Jahr 2022. Zur Analyse der mittelfristigen Entwicklung in den letzten Jahren werden zudem Daten aus den Jahren 2015 und 2018 analysiert.

Die Erhebung *Modernisierung der Produktion* wird seit 1995 regelmäßig alle zwei bzw. drei Jahre vom Fraunhofer ISI durchgeführt und fokussiert Themen zur Wertschöpfung und Innovation in der Produktion. Dabei werden deutschlandweit zufällig ausgewählte Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes zum Stand ihrer Produktion, organisatorischen oder technologischen Erneuerungen oder strategischen Entwicklungen sowie zu verschiedenen weiteren Themen befragt. Seit 2006 deckt diese Erhebung alle Branchen des Verarbeitenden Gewerbes ab.

In jeder Erhebungswelle werden zufällig ausgewählte Betriebe mit mindestens 20 Beschäftigten aller Branchen des Verarbeitenden Gewerbes (Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008, Klassen 10 bis 33) adressiert. Ausgehend von den repräsentativen Stichproben wird regelmäßig ein Rücklauf von 1.200 bis 1.500 Betrieben erreicht. Die Erhebung *Modernisierung der Produktion* ist damit die breiteste und umfangreichste Befragung zu Modernisierungsprozessen im Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland.

Im Ergebnis umfassen die Daten der Jahre 2015, 2018 und 2022 die Angaben von 1.282, 1.256 und 1.334 Betrieben. Die realisierten Stichproben bieten dabei ein repräsentatives Abbild des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland hinsichtlich der Verteilung der Größenklassen, der Branchenstruktur und der regionalen Verteilung. Beispielhaft sei hier auf die Dokumentation von Erhebungsmethodik und -verlauf und Stichprobenziehung zur jüngsten Erhebung verwiesen (Jäger et al. 2022).

Tabelle 1: Fallzahlen für Zeitvergleiche (Verarbeitenden Gewerbe)

Region	2015*	2018*	2022
Baden-Württemberg (BW)	244	235	216
Andere Bundesländer (Andere)	1.014	1.003	1118
Deutschland	1.282*	1.256*	1.334

Anmerkung: *2015 und 2018 konnten jeweils 28 bzw. 18 Betriebe regional nicht zugeordnet werden. Grund ist die Form der postalischen Befragung und kein Indiz für Non-Response. Bei Analysen zum Verarbeitenden Gewerbe in Deutschland wird jeweils auf den gesamten Datensatz der jeweiligen Erhebungswelle zurückgegriffen.
Quelle: Eigene Darstellung, Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015-2022.

Einen Überblick über die Datenverfügbarkeit für Baden-Württemberg und die anderen Bundesländer gibt Tabelle 1. Die in diesem Bericht betrachteten Erhebungswellen enthalten unter anderem Fragen und Indikatoren zu den Themen Industrie 4.0, Digitalisierung, digitale Fabrik sowie der ökologischen Nachhaltigkeit der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes. Dabei erlauben die Datenbasen eine detaillierte Analyse auch mit Blick auf kleinere Betriebe. Es sind Analysen einzelner Kernbranchen möglich sowie Aussagen über den Querschnitt des Verarbeitenden Gewerbes in Deutschland und die Ergebnisse der Befragung sind damit eine wertvolle Quelle für empirisch basierte Erkenntnisse.

2.2 Wesentliche Indikatoren der Studie

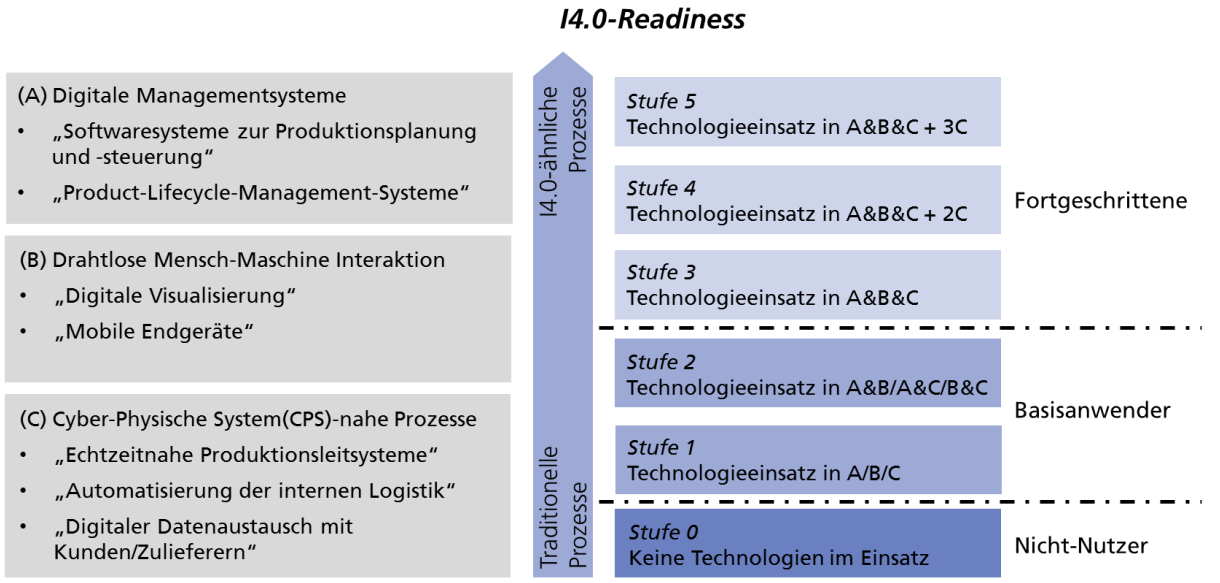
Dieses Kapitel bietet einen Überblick über die zentralen Indikatoren der folgenden Analysen. Neben der Messung der I4.0-Readiness (Kapitel 2.2.1), der Nachhaltigkeit (Kapitel 2.2.2) sowie der Resilienz (Kapitel 2.2.3) sind in Kapitel 2.2.4 auch die wesentlichen strukturellen Indikatoren gelistet.

2.2.1 Der I4.0-Readiness-Index des Fraunhofer ISI

Um die zeitliche Entwicklung der I4.0-Readiness (bzw. Reifegrad-Stufen) im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands und Baden-Württembergs näher beleuchten zu können, wird der I4.0-Readiness-Index des Fraunhofer ISI herangezogen, der bereits in mehreren Studien zum Einsatz kam. Dieser Index bewertet den Stand des Verarbeitenden Gewerbes auf dem Weg hin zur Umsetzung von Industrie 4.0 (Lerch et al. 2016).

Durch die Berücksichtigung der simultanen Nutzung verschiedener Technologien aus mehreren Technologiefeldern wird der Digitalisierungsgrad der Betriebe erfasst, sodass die Industrie 4.0-Readiness von Betrieben, Branchen oder Industrieregionen vergleichend untersucht werden kann. Jäger et al. 2022 bietet einen Überblick über zugrundeliegende Überlegungen sowie die verwendete Unterteilung in Hauptgruppen.

Abbildung 1: Zusammensetzung des I4.0-Readiness-Index des Fraunhofer ISI



Quelle: Eigene Darstellung

Der vom Fraunhofer ISI entwickelte I4.0-Readiness-Index basiert auf sieben digitalen Produktionstechnologien, welche drei separaten Technologiefeldern zugeordnet werden: Die Technologiefelder (A) *Digitale Managementsysteme* und (B) *Drahtlose Mensch-Maschine-Kommunikation* sind dabei IT-nahen Prozessen zugeordnet und können als Grundlagetechnologien auf dem Weg zu Industrie 4.0 betrachtet werden. Die Technologien im dritten Technologiefeld (C) *Cyber-Physical-System (CPS)-nahe Prozesse* enthalten erste Ansätze einer vernetzen Produktion und bedeuten einen größeren Eingriff in traditionelle Produktionsabläufe und -technologien.

Auf dieser Basis wird für diese Studie der Index für die Betriebe hinsichtlich ihres Digitalisierungsgrads in folgende drei Hauptgruppen unterteilt:

- Die Gruppe der *I4.0-Nicht-Nutzer* umfasst alle Betriebe, die keine der sieben digitalen Technologien in ihrer Produktion einsetzen und tendenziell auf traditionelle Produktionsprozesse setzen.
- Die Gruppe der *I4.0-Basisanwender* umfasst alle Betriebe, die mindestens eine digitale Technologie in ein oder zwei Technologiefeldern implementiert haben.
- Zur Gruppe der I4.0-*Fortgeschrittenen* zählen alle Betriebe, die in allen drei Technologiefeldern mindestens eine digitale Technologie einsetzen.

Dieser Index erlaubt es, die Digitalisierungsbereitschaft der Betriebe zu beziffern: Die Gruppe der Nicht-Nutzer steht für Betriebe, die (noch) keine Bereitschaft für eine I4.0 aufweisen. Die Basisanwender weisen im Gegensatz dazu bereits eine gewisse, geringe Bereitschaft für I4.0 auf. Diese Betriebe stehen am Anfang der Digitalisierung produktionsrelevanter Prozesse und setzen in nur zwei der drei Technologiefelder digitale Prozesse ein. Schließlich umfasst die Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen jene Betriebe, welche bereits sowohl IT-nahe Prozesse als auch wenigstens einen CPS-nahen Prozess einsetzen. Zu dieser Gruppe höherer I4.0-Readiness gehören auch die Vorreiter auf dem Weg zur I4.0, welche in allen Technologiefeldern aktiv sind und mindestens drei Technologien der CPS-nahen Prozesse nutzen.

Diese Einteilung des I4.0-Readiness-Indexes wurde in Abweichung zu vorangehenden Veröffentlichungen gewählt, um die Entwicklung in den letzten Jahren sinnvoll visualisieren zu können. Der Unterschied liegt dabei darin, dass die Gruppe an Betrieben mit Technologien aus allen drei Bereichen als Fortgeschrittene-Nutzer abgegrenzt werden. Eine separate Betrachtung der beiden Stufen in der Spitzengruppe war für die zeitliche Entwicklung nicht hilfreich. Um eine konsistente Verständlichkeit im Verlauf des Berichts aufrechtzuerhalten wurde diese Klassifikation auch bei den Analysen verwendet, die sich ausschließlich auf die jüngsten Daten stützen.

2.2.2 Zwei Indikatoren betrieblicher Nachhaltigkeitsorientierung

Der Zusammenhang der I4.0-Readiness und der erreichten ökologischen Nachhaltigkeit der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes kann anhand zweier zentraler Indikatoren untersucht werden, welche geeignet sind, die Umweltauswirkungen der betrieblichen Wertschöpfungsprozesse aus zwei Perspektiven zu erfassen. Im Kontext der ökologischen Nachhaltigkeit steht erstens der Umgang mit CO_2-Emissionen im Zentrum. Dafür wird auf einen zentralen Indikator zurückgegriffen. Zweitens ist die Dimension der Energieeffizienz von Interesse. Hierbei sind zwei Indikatoren von Interesse. Für die Analysen sind damit drei Indikatoren zentral:

1) Binärer Indikator: CO_2-Bilanz erstellt in den letzten fünf Jahren ja/nein,
2) Metrischer Indikator: Anteil der Energiekosten gemessen am Gesamtumsatz (in %),
3) Ordinaler Indikator: Kategorisierung der Betriebe entlang des Anteils der Energiekosten gemessen am Gesamtumsatz in drei Gruppen.

Für die *Perspektive auf den Umgang mit CO_2* kann auf die Information, ob ein Betrieb in den letzten fünf Jahren eine CO_2-Bilanz erstellt hat bzw. erstellen ließ, aus der Erhebungsrunde 2022 zurückgegriffen werden. Mit einer CO_2-Bilanz werden die CO_2-Emissionen erfasst, welche direkt und indirekt durch Aktivitäten am Standort verursacht wurden. Bis 2022 war dies allerdings für die meisten Unternehmen keine verpflichtende Zertifizierung und kann daher als Ausdruck einer Nachhaltigkeitsorientierung eines Betriebs interpretiert werden. Eine CO_2-Bilanz kann, nach (Burritt et al. 2010), zum einen als ein Instrument einer nach außen gerichteten betrieblichen Berichterstattung und damit Information für potenzielle Kunden am Markt verstanden werden. Zum anderen dient eine solche Bilanz auch als eine nach innen gerichtete Informations- und Entscheidungsgrundlage für die Entwicklung potenzieller Maßnahmen zur Emissionsreduktion. Darüber hinaus baut eine Erfassung

der CO_2-Emissionen einer Produktion für einen spezifischen Zeitraum, d.h. die Erfassung der in dieser Zeit durch die Produktion verursachten Emissionen sowie die Emissionen aufgrund der in dieser Zeit benötigten, zugekauften Energie, zwar auf originär in der Verantwortlichkeit des Betriebs liegende Prozesse auf, stellt dennoch in den meisten Fällen einen nicht unerheblichen Aufwand dar. Bis heute gehört die CO_2-Bilanzierung nicht zu den Standardverfahren.

Der Indikator "CO_2-Bilanz erstellt" trennt binär zwischen Betrieben mit einer CO_2-Bilanzierung in der Zeit zwischen 2017 und 2021 und Betrieben ohne diese Bilanzierung. In der Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022 wurde im Anschluss an diese Frage auch nach der tatsächlichen CO_2-Emissionen im Jahr aus Produktion und zugekauften Energien gefragt. Leider bezifferten nur wenige Betriebe diesen Wert, sodass infolgedessen keine darauf aufbauenden Analysen möglich waren.

Als Kontext für Analysen des Indikators CO_2-Bilanz ist noch zu beachten, dass in Zukunft regulatorische Vorgaben die Erstellung einer CO_2-Bilanz stärker bestimmen werden. Im Kontext der Nachhaltigkeitsberichtserstattung wird ab 2024 bzw. 2025 die Pflicht zur Berichterstattung im Rahmen des *Corporate Sustainability Reporting (CSR)* ausgeweitet. Vorgesehen ist dabei, eine CO_2-Bilanz von allen großen Unternehmen einzufordern (IHK München 2023). Für den in der Studie betrachteten Zeitraum waren Unternehmen kaum verpflichtet, eine CO_2-Bilanz zu erstellen, allerdings ist zu erwarten, dass einige der Betriebe bereits vorausschauend Maßnahmen für diese Berichterstattung getroffen haben.

Für die *Perspektive auf den relativen Energiebedarf* wird die Angabe zum "Anteil der Energiekosten gemessen am Gesamtumsatz" verwendet werden. Diese spiegelt den monetären Aufwand für alle Energiebedarfe der Produktion und des Standorts im Verhältnis zur Produktion wider, welcher hier mit dem Gesamtumsatz des Betriebs die Basis bildet, und ist eine klassische Messung für den Energiebedarf eines Betriebs. Im Vergleich von Betrieben vergleichbarer Produktion und Marktposition bietet dieser Indikator auch ein Indiz für die Energieeffizienz. Die Relevanz des Indikators für die Nachhaltigkeitsmessung ergibt sich aus der Schlüsselrolle, welche eine effiziente Energienutzung zur Reduzierung von Umweltauswirkungen der Wertschöpfung spielt.

Für die Analysen wird die Information sowohl in ihrer Messung direkt verwendet und als prozentualer Anteil am Gesamtumsatz berichtet. Zur klareren Deskription kommt zudem eine Kategorisierung in wenig, mittel und hohen Energiekostenanteil zum Einsatz. Dies erlaubt damit eine leichter verständliche Kontextualisierung. Dieser ordinale Indikator unterscheidet zwischen Betrieben mit einem geringen Energiekostenanteil von weniger als 2%, Betrieben mit mittleren relativen Energiekosten bei einem Anteil zwischen 2 und 5% gemessen am Gesamtumsatz sowie Betrieben mit einem hohen relativen Energiekostenanteil von über 5%. Mit der Basis des Medians differenzieren diese Gruppen zwischen Betrieben mit unterdurchschnittlichem, durchschnittlichem und überdurchschnittlichen Energiekostenanteil.

Gleichzeitig trägt die Kategorisierung der doch relativ hohen Item-Missingrate für den metrischen Indikator Rechnung. Über 40% der Produktionsverantwortlichen beantwortete diese Frage nicht, was wesentlich in der digitalen Erhebungsmethode begründet war. Gleichzeitig sind in größeren Betrieben sicherlich auch stärkere Ausdifferenzierungen in den Verantwortungsbereichen anzutreffen, sodass dieser Wert keine große Präsenz für die Befragten hat. Analysen zum Antwortverhalten bestätigen, dass keine systematischen Ausfälle jenseits des beschriebenen Größenunterschieds festzustellen waren.

Bei Betrachtung der Energiekostenanteile ist zu berücksichtigen, dass dieser Indikator stark branchenabhängig ist und bedingt durch die Volatilität der Energiepreise im Zeitverlauf potenziell großen Schwankungen ausgesetzt sein kann. Der Indikator eignet sich daher nur sehr bedingt für

den Vergleich über verschiedene Zeitperioden hinweg. Zudem müssen Analysen des Energiekostenanteils stets unter der Berücksichtigung der jeweiligen Energieintensität einer Branche erfolgen.

2.2.3 Messung von Resilienz und Vulnerabilität im Verarbeitenden Gewerbe

Zur Bewertung der Resilienz von Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes liegen zwei Perspektiven nahe, zum einen der Blick auf die Fähigkeit eines Betriebs zu resilienter Reaktion sowie zum anderen die Bewertung seiner Anfälligkeit für spezifische Störereignisse. Basierend auf den Daten der Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022 werden dazu zwei zentrale Indikatoren gebildet: Ein Resilienz-Index und ein Risiko-Index. Im Folgenden sind die Operationalisierungen zu beiden Indizes ausgeführt.

Als Resilienz wird die Fähigkeit, unvorhersehbaren Störereignissen, die negative Folgen mit sich bringen, vergleichsweise unbeschadet zu überstehen, bezeichnet. Dies umfasst sowohl präventive Fähigkeiten als auch reaktive Fähigkeiten. Risiken und Chancen einer abrupten Änderung gilt es einerseits frühzeitig vorherzusehen und vorzubeugen, und andererseits gilt es sich von negativen Ereignissen schnell zu erholen und durch Anpassungen gegen solche weitestgehend zu immunisieren. Die Resilienz steigernde Maßnahmen müssen dafür in vielen verschiedenen Bereichen des Unternehmens ergriffen werden (vgl. bspw. Duchek 2020; Seville 2017), da die Resilienz eines Unternehmens im Verarbeitenden Gewerbe im Ergebnis sowohl von der adäquaten internen Organisation und Ausstattung, der Ausgestaltung der Kunden- und Zulieferbeziehungen wie auch von den Ressourcen und Fähigkeiten für Veränderungen abhängt.

Zur vergleichbaren Bewertung der baden-württembergischen Betriebe betrachten wir in dieser Studie Angaben aus der Erhebung zu fünf für die Resilienz eines Betriebs relevanten Handlungsbereiche. Mit dem Blick auf die internen Strukturen sind dies:

1) *Explizitheit interner Strukturen*: Awareness über Prozesse und/oder strukturierte digitale Daten über Prozesse (4 Variablen);
2) *Mitarbeitende*: Organisationskonzepte zur Steigerung von Motivation und Verantwortlichkeiten eingesetzt sowie Perspektiven für Mitarbeitende durch Weiterbildung geboten (6 Variablen).

Mit Blick auf Transparenz und Vertrauensstrukturen zu externen Partnern und absorptive Capacity für externe Informationen sind dies:

3) Transparenz und Vernetzung in der *Supply Chain* (Kooperation mit Zulieferern oder Vertriebspartnern) (2 Variablen);
4) Offenheit für *Innovationsimpulse* und -aktivitäten (Kooperation mit Forschungseinrichtungen oder selber FuE-treibend) (2 Variablen).

Resilienz ist zudem von den Möglichkeiten zu Veränderungen und Anpassungen abhängig:

5) *Ressourcen für Innovation* (Ressourcen und/oder bereits Produktinnovation) (2 Variablen).

Abbildung 2 bietet einen Überblick über die verwendeten Angaben der Betriebe sowie die Schwellenwerte der Indikatoren. Je Handlungsbereich werden jeweils zwei binär kodierte Faktoren betrachtet. In der Kombination kann so zwischen dem Wert 0 (keiner der Indikatoren ist gültig), dem Wert 1 (einer der beiden Indikatoren trifft zu), und dem Wert 2 (beide Indikatoren treffen für den

Betrieb zu) unterschieden werden. Die Ausprägungen aller zugrundeliegender Merkmale ist im Detail mit allen Bausteinen zusammengefasst für den Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes in Baden-Württemberg sowie in den anderen Bundesländern in Tabelle 2 gelistet.

Tabelle 2: Basisindikatoren zum Resilienz-Index (Anteil an Betrieben mit Merkmal)

Explizitheit interner Strukturen	Baden-Württemberg	Andere Bundesländer
Baustein: mit organisationeller Awareness über Prozesse	56%	48%
Standardisierte Arbeitsanweisungen in (mittel)größerem Umfang eingesetzt	40%	35%
Organisatorische Qualitätsinstrumente in (mittel)größerem Umfang eingesetzt	52%	44%
Baustein: Transparenz von Prozessen (Datenverfügbarkeit, da Software)	71%	65%
Einsatz von Software zur Steuerung v. Produktionsprozessen	65%	60%
Einsatz von Software zur Verbesserung oder Entwicklung innovativer Produktionsprozesse	27%	25%
Mitarbeitende		
Baustein: mind. ein Mitarbeitenden orientiertes Organisationskonzept	62%	53%
Prämierung von Innovation und Leistung in (mittel)größerem Umfang	26%	27%
Aufgabenintegration (planende, steuernde und prüfende Verantwortlichkeit bei Werker) in (mittel)größerem Umfang	44%	36%
Baustein: Weiterbildungsangebot für Produktionsbeschäftigte zu Inhalten jenseits der konkreten Tätigkeit	70%	72%
Schulungsangebot mit funktionsübergreifendem Schwerpunkt	50%	42%
Schulungsangebot zu digitalen Systeme/Technologien	34%	33%
Schulungsangebot zu Datensicherheit und Daten-Compliance	50%	51%
Schulungsangebot zu Kreativität und Innovation	28%	26%
Vernetzung in Supply Chain		
Baustein: FuE-Kooperation mit Zulieferen/Kunden	45%	38%
Baustein: Kooperation für Vertrieb	28%	29%
Innovationsimpulse		
Baustein: Kooperation mit Forschungseinrichtung	54%	44%
Baustein: FuE-treibend	43%	35%
Ressourcen für Innovation		
Baustein: mit ROS >= 10%	20%	16%
Baustein: Produktinnovatoren	53%	43%

Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Abbildung 2: Operationalisierung der Resilienz

Handlungsbereiche	Indikatoren	
Explizitheit interner Strukturen	Awareness über Prozesse	Struktur. Daten zu Prozessen
	Standardisierte Arbeits-anweisungen, Instrument zur Qualitätssicherung: mind. 1 Konzept	Einsatz von spezifischer Softwaren in Prozessablauf und Prozessverbesserung mind. für 1 Aufgabenbereich
Mitarbeitende	Einbindung und Förderung der Mitarbeitenden	
	Prämierung herausragender Leistungen oder Aufgaben-integration in (mittel)größerem Umfang: mind. 1 Konzept	Weiterbildungsangbote jenseits der konkreten Tätigkeit für Produktionsbeschäftigte: mind. 1 Angebot
Supply Chain	Schneller Informationsfluss und Vertrauen in der Supply Chain	
	FuE-Kooperation mit Zulieferern/Kunden: ja	Vertriebskooperation: ja
Innovationsimpulse	Investitionen in Forschung und/oder Entwicklung	
	FuE-treibend: ja	Kooperation mit Forschungs-einrichtungen: ja
Ressourcen für Innovation	Hohe finanzielle Ressourcenausstattung	Fähigkeit zur Produktinnovation
	ROS >= 10%	Produktinnovator: ja

Quelle: Eigene Darstellung

Auf dieser Basis wird der *Resilienz-Index* gebildet. Durch eine additive Verknüpfung der Angaben zu den Handlungsbereichen ergibt sich für jeden Betrieb ein Indexwert im Bereich von 0 bis 12. Mit einer Gruppierung können drei Niveaus der Resilienz identifiziert werden:

- bei Werten zwischen 0 und 3 besteht nur eine *geringe* Kapazität, resilient auf Störereignisse reagieren zu können;
- bei Werten zwischen 4 und 6 besteht nur eine *mittlere* Kapazität, resilient auf Störereignisse reagieren zu können;
- bei Werten höher als 6 besteht eine *hohe* Kapazität, resilient auf Störereignisse reagieren zu können.

Eine Bewertung der Resilienz eines Unternehmens erfordert immer auch eine Bewertung möglicher Vulnerabilitäten, denn die Widerstandsfähigkeit eines Unternehmens gegenüber Krisensituationen wird auch wesentlich von der Art des Risikos bestimmt. Inwieweit ein spezifisches, abruptes Störer-eignis im Kontext von Produktion und Vermarktung entweder grundsätzlich abgefedert werden kann oder inwieweit dadurch verursachte mögliche Schäden schnell durch passende Änderungen und Innovationen kompensiert werden können, hängt wesentlich auch von der Natur des Störer-eignisses ab.

Für eine Gesamtbewertung der *Vulnerabilität* baden-württembergischer Betriebe werden drei für das Verarbeitende Gewerbe offensichtliche Risiken betrachtet.

- *Risiko A* bezieht sich auf abrupte Änderungen in Bezug auf den Energiepreis. Eine Krise wird dann insbesondere bei jenen Betrieben ausgelöst, welche einen hohen Anteil der Kosten für die Produktion in den Ankauf von Energie investieren müssen.
- *Risiko B* betrachtet die Vulnerabilität durch lange und instabile Zulieferketten. Betriebe mit einem hohen Anteil an Vorleistungen aus entfernteren und ggf. politisch unsicheren Regionen sind bspw. einem größeren Risiko ausgesetzt.
- *Risiko C* berücksichtigt die Diversität der Produktpalette. Mögliche Änderungen am Markt können zu einer sprunghaften Reduktion der Nachfrage nach einem spezifischen Produkt führen. Betriebe, welche mit Produktvarianten oder verschiedenen Produkten verschiedene Kunden erreichen, sind eher in der Lage, diesen Änderungen zu begegnen.

Abbildung 3 fasst die Überlegungen und die Operationalisierung hier zusammen. Die verschiedenen Risikoniveaus werden numerisch mit 0 (gering), 1 (mittel) und 2 (hoch) bewertet. Die Bewertung des *Risiko A* bzgl. der Energiekosten basiert auf den Angaben zu den Betrieben. Fehlende Informationen sind über Mittelwerte für die spezifische Branche und spezifische Betriebsgrößenklasse angenähert.

Abbildung 3: Operationalisierung der Vulnerabilität mittels eines Risiko-Index

	Risikobewertung		
	anhand konkreter, relevanter Krisenszenarien		
Szenarien	A **Energiekosten**	B **Zulieferketten**	C **Absatzmarkt**
	Kosten für Energie steigen sprunghaft.	Globale Krisen kappen Netzwerke.	Hauptprodukt kann nicht verkauft werden.
Indikator	Energiekosten (%) gemessen als Anteil am Gesamtumsatz	Anteil des Imports von außerhalb EU (%) an gesamten Vorleistungen	Anteil des Umsatzes mit Hauptprodukt (%) am Gesamtumsatz
gering	• Anteil < 2%	• kein weltweiter Import	• < 80% Umsatz durch Hauptprodukt
mittel	• Anteil zwischen 2 und 5%	• weltweiter Import < 30%	• 80 bis 99% Umsatz durch Hauptprodukt
hoch	• Anteil > 5%	• weltweiter Import >= 30%	• 100% Umsatz durch Hauptprodukt

Quelle: Eigene Darstellung

Zur Gesamtbewertung der Vulnerabilität wird eine kombinierte Betrachtung genutzt. Dafür werden die Werte der drei Risiko-Indikatoren addiert, sodass anschließend folgende drei Gruppen gebildet werden können. Dabei ist zusätzlich zur Summe aus den drei Risiken entscheidend, in wie vielen Bereichen ein Betrieb einem hohen Risiko zugeordnet wurde. Die folgende Kategorisierung wird in den Analysen verwendet:

- Von einem *geringen Risikolevel* kann ausgegangen werden, wenn maximal zwei Bereiche mit erkennbarem Risiko behaftet sind, dabei jedoch in keinem Bereich ein hohes Risiko zu verzeichnen ist. Die Indexwerte variieren zwischen 0 und 2, die Anzahl der Toprisiken beträgt 0.
- Ein *mittleres Risikolevel* ist anzunehmen, wenn in maximal einem Bereich ein hohes Risiko konstatiert werden kann oder ein mittleres Risiko in allen drei Bereichen zu verzeichnen ist. Die Indexwerte variieren damit zwischen 2 und 3, die Anzahl der Toprisiken zwischen 0 und 1.
- Schließlich ist von einem *hohen Risikolevel* auszugehen, wenn zwei oder drei Bereiche ein hohes Risiko aufweisen oder alle drei Bereiche von einem mittleren bis hohen Risiko betroffen sind. Die Indexwerte variieren damit zwischen 4 und 6, die Anzahl der Toprisiken zwischen 1 und 3.

2.2.4 Weitere Kenngrößen und Strukturindikatoren

Um Baden-Württemberg im Vergleich zu anderen Gebieten in Deutschland betrachten können, wird im Wesentlichen ein regionaler Vergleich zwischen den Betrieben Baden-Württembergs und den Betrieben der anderen Bundesländer vorgenommen. Zusätzlich kann eine regionale Klassifikation für die Bundesländer Deutschlands verwendet werden. Unterschieden wird dabei zwischen den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Nordrhein-Westfalen, welche aus bundesdeutscher Perspektive den größten Anteil industrieller Produktion beheimaten. Zudem werden vier regionale Gruppen unterschieden: Für die Region *Norddeutschland* sind die Angaben für Berlin, Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern zusammengefasst. Die Region *Nordostdeutschland* umfasst die Angaben aus Bremen, Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein. Die Bundesländer Thüringen, Sachsen und Sachsen-Anhalt bilden die Gruppe *Südostdeutschland*; Hessen, Rheinland-Pfalz sowie das Saarland bilden die Gruppe *Westdeutschland*.

In den *strukturellen Analysen* werden die spezifischen Gegebenheiten der Betriebe berücksichtigt. Unterschieden wird dabei entlang

- der Betriebsgröße als Anzahl der Beschäftigten im Betrieb (klassifiziert in drei bzw. vier Gruppen),
- der Branchenzugehörigkeit basierend auf den Angaben zum Hauptprodukt und zum Hauptmarkt, kodiert entsprechend der Wirtschaftszweigklassifikation NACE Rev. 2 (klassifiziert in sieben Gruppen);
- der Seriengröße zum Hauptprodukt (klassifiziert in drei Kategorien);
- der Komplexität des Hauptprodukts (klassifiziert in drei Kategorien);
- sowie der Position in der Wertschöpfungskette. Hier erfolgt eine Differenzierung nach Zulieferern von Teilen, Komponenten, Systemen in Abgrenzung zu Lohnfertigern, zu Endproduktherstellern von Konsumgütern und zu Endproduktherstellern für Industriekunden (Ausrüster und Hersteller von Betriebsmitteln etc.).

Um beobachtete deskriptive Unterschiede bewerten zu können, werden zum einen statistische Signifikanztests durchgeführt. Zum anderen werden in Ergänzung der Analyse multiple Regressionsmodelle geschätzt, um zu prüfen, ob bestehende Unterschiede auch bei Kontrolle der anderen Strukturmerkmale noch als relevant betrachtet werden sollten, da bekanntermaßen strukturelle Merkmale nicht völlig unabhängig voneinander sind. Diese multivariate Betrachtung ermöglicht damit, Fehlschlüsse zu vermeiden.

In den Regressionen wird die Anzahl an Beschäftigten transformiert mittels des natürlichen Logarithmus, um einen sinkenden Einfluss der steigenden Anzahl zu berücksichtigen. Die Annahme ist, dass der Unterschied zwischen 100 und 101 nicht die gleiche Wertigkeit hat wie ein Unterschied zwischen 1.000 und 1.001 Beschäftigten.

3 Entwicklung der I4.0-Readiness im Verarbeitenden Gewerbe

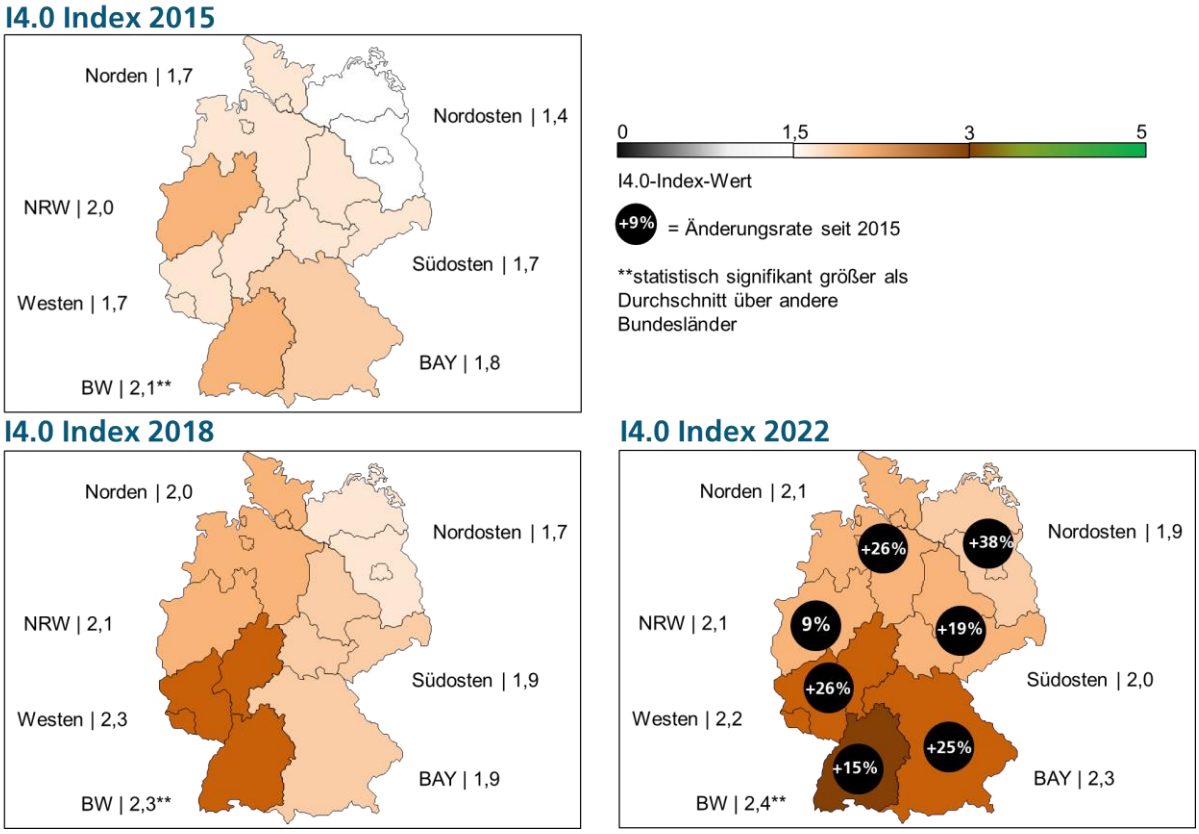
Das folgende Kapitel stellt die Entwicklung der I4.0-Readiness der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe zwischen den Jahren 2015, 2018 und 2022 dar. In Kapitel 3.1 steht die Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg im Vergleich zu den Regionen Deutschlands im Mittelpunkt. Kapitel 3.2 beleuchtet die strukturellen Bedingungen für die I4.0-Readiness im Verlauf der Zeit und abschließend wird in Kapitel 3.3 auf die technologische Fundierung der I4.0-Readiness näher eingegangen.

3.1 Die Entwicklung der I4.0-Readiness 2015-2022

In Kapitel 3.1.1 liegt der Fokus zunächst auf dem regionalen Vergleich, unabhängig von betrieblichen und produktionsbezogenen Merkmalen. Anschließend wird in Kapitel 3.1.2 die Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg im Vergleich zum bundesdeutschen Durchschnitt vorgestellt.

3.1.1 Entwicklung der I4.0-Readiness im regionalen Vergleich

Abbildung 4: Entwicklung der I4.0-Readiness im regionalen Vergleich



Anmerkung: Regionale Unterschiede wurden für jede Erhebungswelle getestet mittels Kruskal-Wallis-Gruppenvergleichen, Signifikanzniveau: $p < 0{,}01$
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

Der Vergleich der I4.0-Readiness-Indexwerte für die sieben Regionen Deutschlands zeigt, dass Betriebe in Deutschland insgesamt eine wachsende Bereitschaft zur Implementierung für Industrie 4.0 relevante Technologien aufweisen. Lag der Indexwert im Jahr 2015 im Durchschnitt noch unter zwei

Punkten, erreichen heute fast alle Regionen Werte über zwei Punkte. Im Durchschnitt stiegen die Indexwerte um 18% (Abbildung 4). Dieser Trend ist ermutigend und deutet darauf hin, dass die deutsche Wirtschaft sich zunehmend den Herausforderungen und Chancen der vierten industriellen Revolution stellt.

Allerdings sind deutliche regionale Unterschiede zu beachten. So verzeichnet Baden-Württemberg einen Indexanstieg um 15%, Bayern hingegen um 25% oder Nordrhein-Westfalen um 9%. Die großen Entwicklungen fanden dabei, über den gesamten Entwicklungszeitraum hinweg betrachtet, meist nachholend statt, d.h. von einem niedrigeren Niveau ausgehend. So zeigte der Nordosten Deutschlands eine deutliche Aufholbewegung bei der I4.0-Readiness, liegt jedoch nach wie vor hinter den führenden Regionen zurück.

Im Jahr 2015 konnte für Baden-Württemberg im Vergleich mit allen anderen sechs Regionen eine deutliche Vorreiterrolle festgestellt werden. 2018 war dieser Vorsprung kaum mehr festzustellen. Allerdings ist für Baden-Württemberg heute wieder ein statistisch signifikanter Abstand zu beobachten. Darüber hinaus heben sich auch Bayern und die westlichen Bundesländer ab. Dies könnte auf die stärkere Konzentration von Industrieunternehmen und die damit ausgeprägtere technologische Ausrichtung in diesen Regionen zurückzuführen sein. Nordrhein-Westfalen hingegen hat im Ranking Plätze eingebüßt, der Indexwert von 2,1 liegt heute unter dem Durchschnitt.

3.1.2 Besonderheiten der Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg

Nach diesem ersten Überblick über den Industrie-4.0-Readiness-Index und die regionalen Unterschiede vertiefen wir die Analysen zu Baden-Württemberg und nehmen die Unterschiede zwischen *Nicht-Nutzern*, *Basisanwendern* und I4.0-*Fortgeschrittenen* in den Blick. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Betrieben aus Baden-Württemberg, deren Angaben mit jenen von Betrieben aus den übrigen Bundesländern verglichen werden. Die Bundesländer, ohne Baden-Württemberg, wurden dafür zu einer Vergleichsgruppe zusammengefasst. Diese Analyse ermöglichte es, die Trends und Muster der industriellen Digitalisierung in Baden-Württemberg im Kontext des gesamten Bundesgebiets zu beleuchten.

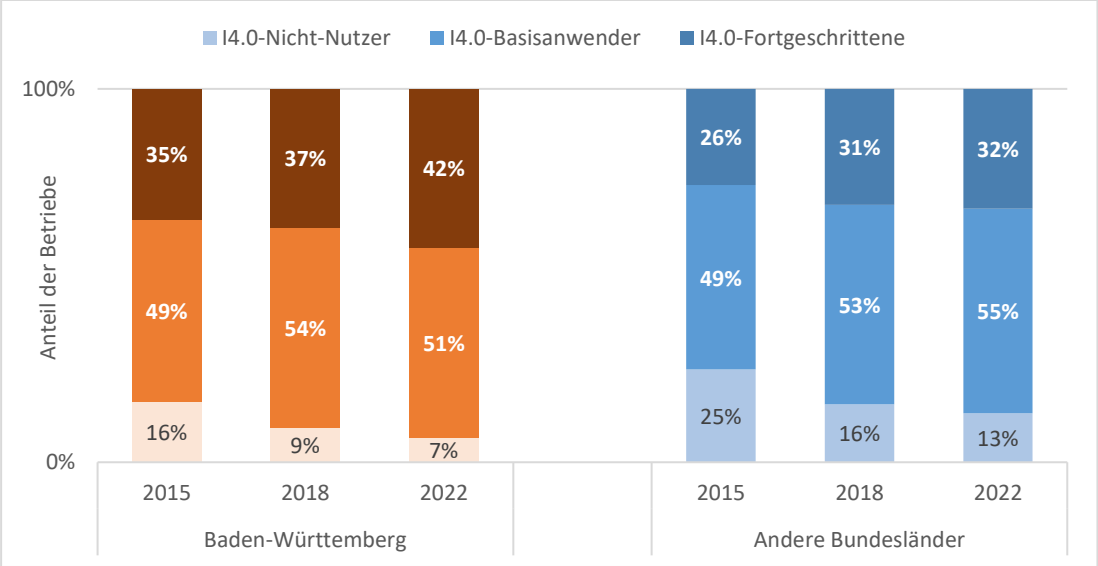
Abbildung 5 zeigt die Entwicklung für beide Gruppen im Zeitraum 2015-2022. Von besonderem Interesse hierbei ist, welcher Anteil der Betriebe jeweils der Gruppe der Nicht-Nutzer, Basisanwender und I4.0-Fortgeschrittenen zuzurechnen ist. Für alle drei Erhebungszeitpunkte war festzustellen, dass die Anteile an Nicht-Nutzer in Baden-Württemberg geringer bzw. der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen höher ausfielen. Es zeigt sich demnach, dass Baden-Württemberg über die betrachteten Zeiträume hinweg kontinuierlich eine höhere Adoption von Industrie-4.0-Technologien aufwies und somit in der Digitalisierung der Produktion im Vergleich zu anderen Bundesländern führend war.

Im Jahr 2015 lag der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen-Nutzer in Baden-Württemberg bei 35%, während 49% der Betriebe I4.0-Basisanwender waren und 16% keine I4.0-Technologien (Nicht-Nutzer) einsetzten. Im Vergleich dazu war in anderen Bundesländern nur jedes vierte Unternehmen I4.0-Fortgeschrittenen-Nutzer, während etwa die Hälfte aller Unternehmen nur die Basistechnologien nutzten und etwa jedes vierte Unternehmen als I4.0-Nicht-Nutzer charakterisiert werden konnte. Hier zeigt sich, dass Baden-Württemberg bereits 2015 einen überdurchschnittlichen Anteil I4.0-Fortgeschrittener im Verarbeitenden Gewerbe aufwies.

Auch für das Jahr 2018 legen die Daten den gleichen Schluss nahe: In Baden-Württemberg hatte sich der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen auf 37% erhöht, während 54% lediglich Grundtechnologien einsetzten und nur noch 9% der Betriebe Nicht-Nutzer waren. In anderen Bundesländern waren es mit 31% etwas weniger I4.0-Fortgeschrittene Nutzer. Der Anteil an Basisanwendern war mit

53% vergleichbar. Der Anteil an Nicht-Nutzern fiel dann entsprechend mit 16% deutlich größer aus. Baden-Württemberg behielt somit seinen Vorsprung in der Nutzung von I4.0-Technologien bei. Deutlich mehr Betrieben war der Einstieg in die Digitalisierung bereits 2018 gelungen, ein größerer Anteil nutzte bereits CPS-nahe Technologien und gehörte damit zu den I4.0-Fortgeschrittenen Nutzern.

Abbildung 5: Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg und anderen Bundesländern im Vergleich



Anmerkung: Unterschiede zwischen Baden-Württemberg und Andere Bundesländer wurden getestet mittels Mann-Whitney-U - Tests. Die I4.0-Readiness unterscheidet sich zwischen beiden Gruppen in allen drei Jahren, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

Schließlich verzeichnete Baden-Württemberg bis zum Jahr 2022 erneut eine Steigerung in der Nutzung von I4.0-Technologien. 42% der Unternehmen konnten dann den I4.0-Fortgeschrittenen zugerechnet werden, 51% waren Basisanwender und nur noch 7% waren Nicht-Nutzer. Für die anderen Bundesländer war ebenfalls ein leichter Anstieg festzustellen. Der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen lag dann bei 32%, 55% der Betriebe nutzten die Basistechnologien und weiterhin 13% waren Nicht-Nutzer. Obwohl der Abstand zwischen Baden-Württemberg und anderen Bundesländern kleiner wurde, liegt Baden-Württemberg weiterhin vorne.

Die herausragende Position von Baden-Württemberg im Bereich der Digitalisierung und der Anwendung von Industrie 4.0-Technologien im Vergleich zu anderen Bundesländern ist dabei wesentlich auf die spezifische Industriestruktur der Region zurückzuführen. In Baden-Württemberg sind traditionell Branchen wie der Fahrzeug- und Maschinenbau stark vertreten und prägen maßgeblich die Industrielandschaft. Bei genauerer Betrachtung der Branchen zeigt sich, dass der Maschinenbau vor allem in der Breite gut aufgestellt ist, während der Fahrzeugbau für eine herausragende Exzellenz sorgt. Die Metallbranche, die ebenfalls in Baden-Württemberg weit verbreitet ist, befindet sich zwar auf einem durchschnittlichen Niveau, jedoch sind gerade im *Ländle* eher I4.0-Fortgeschrittene darunter anzutreffen. Aufgrund dieser spezifischen Branchenstruktur verfügt die Industrieregion Baden-Württemberg über strukturelle Vorteile und erzielt insgesamt einen I4.0-Readiness-Status, der über dem Durchschnitt liegt.

Ein zusätzlicher, indirekter Faktor ist die Verfügbarkeit hochqualifizierter Arbeitskräfte in der Region sowie eine stärkere kooperative Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Wertschöpfungspartnern. Zum einen beschäftigen Industriebetriebe in Baden-Württemberg im Durchschnitt mehr hochqualifizierte Mitarbeitende, sei es mit Hochschulabschluss oder mit einer Techniker- oder

Meisterausbildung. Die Unternehmen haben demnach eher Zugang zu hochqualifizierten Fachkräften, die bereits mit den neuesten Entwicklungen in der Digitalisierung und Industrie 4.0 vertraut sind bzw. denen der Einstieg in diese Entwicklung leichter fällt. In Bezug auf die Implementierung von Industrie 4.0-Technologien wird dies unterstützend wirken. Zum anderen kooperieren mehr Betriebe aus Baden-Württemberg mit Forschungseinrichtungen oder Zulieferern und Kunden zu Themen der Forschung und Entwicklung. Auch dies erleichtert die Integration neuer Technologien im Produktionsprozess und kann als Zeichen einer starken Innovationskultur interpretiert werden. Dies, gepaart mit gut ausgebildeten Fachkräften, unterstützt auch, dass Baden-Württemberg derzeit noch eine Vorreiterrolle in der digitalen Transformation und der Anwendung von Industrie 4.0-Technologien einnimmt.

3.2 Strukturelle Bedingungen für die I4.0-Readiness im Verarbeitenden Gewerbe

Nach diesem ersten Rückblick auf die Entwicklung der I4.0-Readiness der vergangenen Jahre und die spezifischen Besonderheiten dieser Entwicklung in Baden-Württemberg bietet dieses Kapitel den Einblick in weitere strukturelle Bedingungen für die I4.0-Readiness im Verlauf der Zeit. Die Unterschiede in der I4.0-Readiness-Entwicklung werden zunächst nach unterschiedlichen Betriebsgrößen im Abschnitt 3.2.1 und im Branchenvergleich im Abschnitt 3.2.2 analysiert. Im Abschnitt 3.2.3 folgt dann ein Blick auf die I4.0-Readiness der verschiedenen Betriebe entlang der Wertschöpfungskette des Verarbeitenden Gewerbes. Der Abschnitt 3.2.4 schließt mit der Betrachtung der I4.0-Readiness im Vergleich verschiedener Produktionscharakteristika, wie den Seriengrößen und der Produktkomplexität.

3.2.1 I4.0-Readiness nach Betriebsgrößenklassen

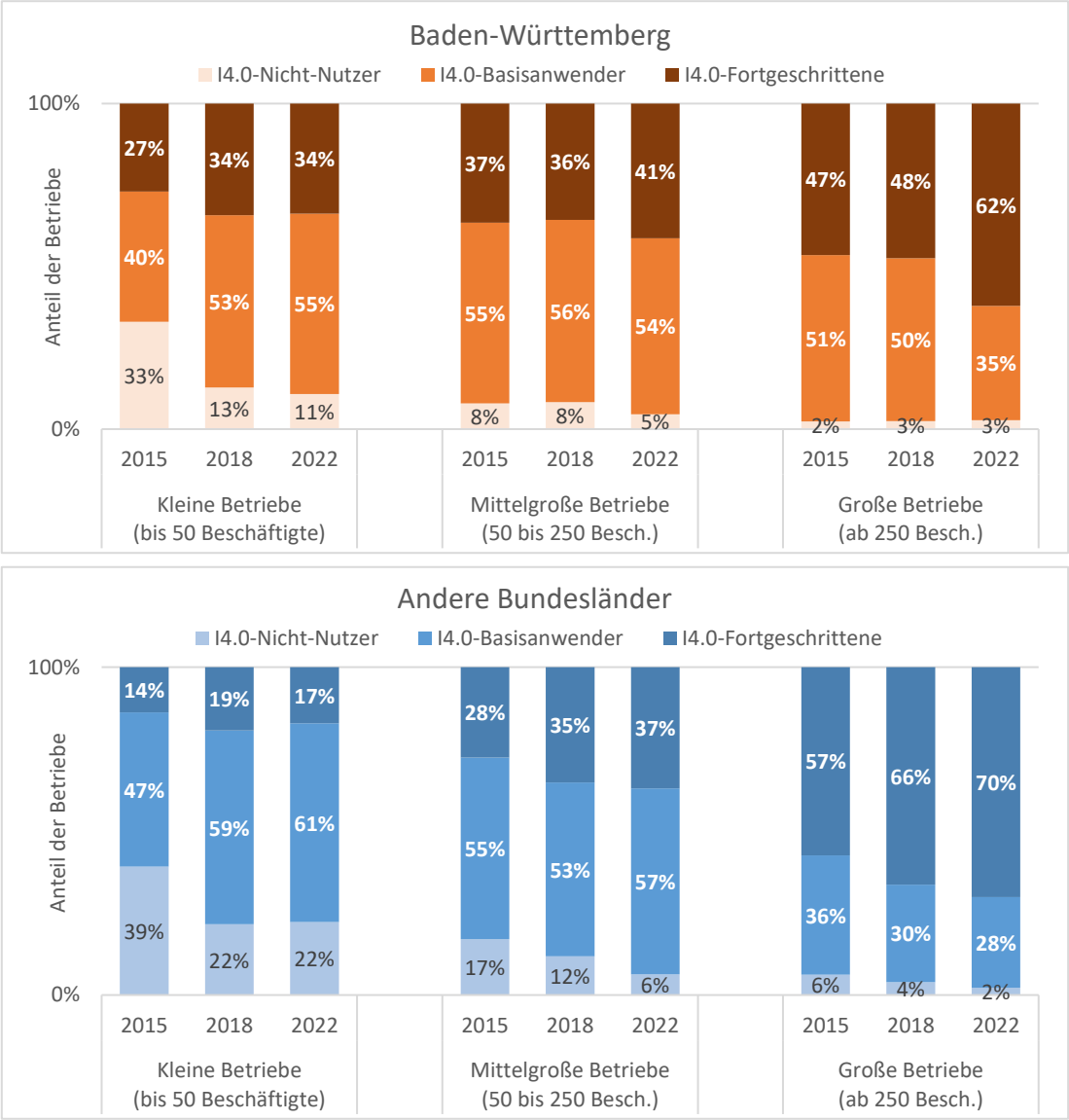
Zum tieferen Verständnis der Entwicklung hilft der Blick auf die Unterschiede zwischen Betrieben unterschiedliche Größe und Ressourcen hinsichtlich der Anwendung von Industrie-4.0-Technologien. Abbildung 6 zeigt die Verbreitung der drei I4.0-Readiness-Hauptgruppen für verschiedene Betriebsgrößenklassen über die drei Erhebungswellen der Jahre 2015, 2018 und 2022. Dabei zeichnet der obere Teil der Abbildung die Entwicklung für Baden-Württemberg, im unteren Teil ist die Entwicklung der Betriebe aus den anderen Regionen dargestellt. Sechs auffällige Befunde möchten wir hier hervorheben:

1) Der erste Eindruck macht deutlich, dass *größere Betriebe* im Vergleich zu kleinen und mittelgroßen Betrieben in deutlich größerem Umfang Industrie 4.0 vorbereitende Technologien implementieren. Der Anteil an I4.0-Fortgeschrittenen ist über alle Ausschnitte hinweg deutlich höher. Dies ist wesentlich durch den Zugang zu entscheidenden Ressourcen zu erklären. Größere Betriebe verfügen in der Regel über erheblich größere finanzielle Mittel, was ihnen die Investition in Industrie 4.0-Technologien erleichtert. Im Gegensatz dazu sind kleinere Betriebe oft aufgrund begrenzter finanzieller, aber auch personeller Ressourcen vergleichsweise eingeschränkter, was ihren Handlungsspielraum für die Implementierung verschiedener Produktions- und Technologielösungen begrenzt. Ein weiterer entscheidender Faktor ist der Zugang zu digitalem Fachwissen. Große Betriebe sind aus verschiedenen Gründen oft attraktiver für qualifizierte IT-Beschäftigte, aber auch für Anbieter von Beratungen, was es ihnen ermöglicht, ihre Industrie-4.0-Initiativen effektiver voranzutreiben. Kleinen Betrieben fehlt hingegen oft der Zugang zu dieser Fachkompetenz, was die Implementierung neuer Technologien erschwert.

2) Bei näherer Betrachtung fällt im Vergleich zwischen den Befunden zu Baden-Württemberg und den Ergebnissen der Betriebe außerhalb Baden-Württembergs auf, dass der *Abstand im I4.0-Readiness-Level bei den großen Betrieben* gegenüber den kleineren Betrieben außerhalb Baden-

Württembergs deutlich stärker ausfällt als bei den Betrieben Baden-Württembergs. Dies ist ein Indiz für einen digital höher entwickelten industriellen Mittelstand im *Ländle* im Vergleich zu dem in anderen Regionen.

Abbildung 6: Entwicklung der I4.0-Readiness nach Betriebsgrößenklassen



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests, getrennt für die drei Erhebungswellen. Die I4.0-Readiness-Levels für Betriebe der drei Betriebsgrößengruppen unterscheiden sich statistisch signifikant in allen drei Jahren, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$. Für Baden-Württemberg war nur für 2015 ($p<0{,}05$) und 2022 ($p<0{,}001$) ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen dem I4.0-Readiness-Levels der drei Betriebsgrößenklassen festzustellen. Im Jahr 2018 waren die beobachteten Unterschiede statistisch nicht signifikant.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

3) Beim Vergleich der I4.0-Readiness zwischen Baden-Württemberg und Betrieben der anderen Regionen wird deutlich, dass die *I4.0-Readiness kleiner Betriebe* in Baden-Württemberg im Vergleich zur I4.0-Readiness ihrer bundesweiten Zwillinge deutlich größer ausfällt. Besonders in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen weisen die kleinen Betriebe Baden-Württembergs bereits im Jahr 2015 einen fast doppelt so hohen Anteil auf als die kleinen Betriebe des übrigen Bundesgebiets. Auch in den folgenden Jahren bleibt dieser Vorsprung erhalten. Gleichzeitig ist der Anteil in der Gruppe der I4.0-Nicht-Nutzer für Baden-Württemberg niedriger als im übrigen Bundesgebiet.

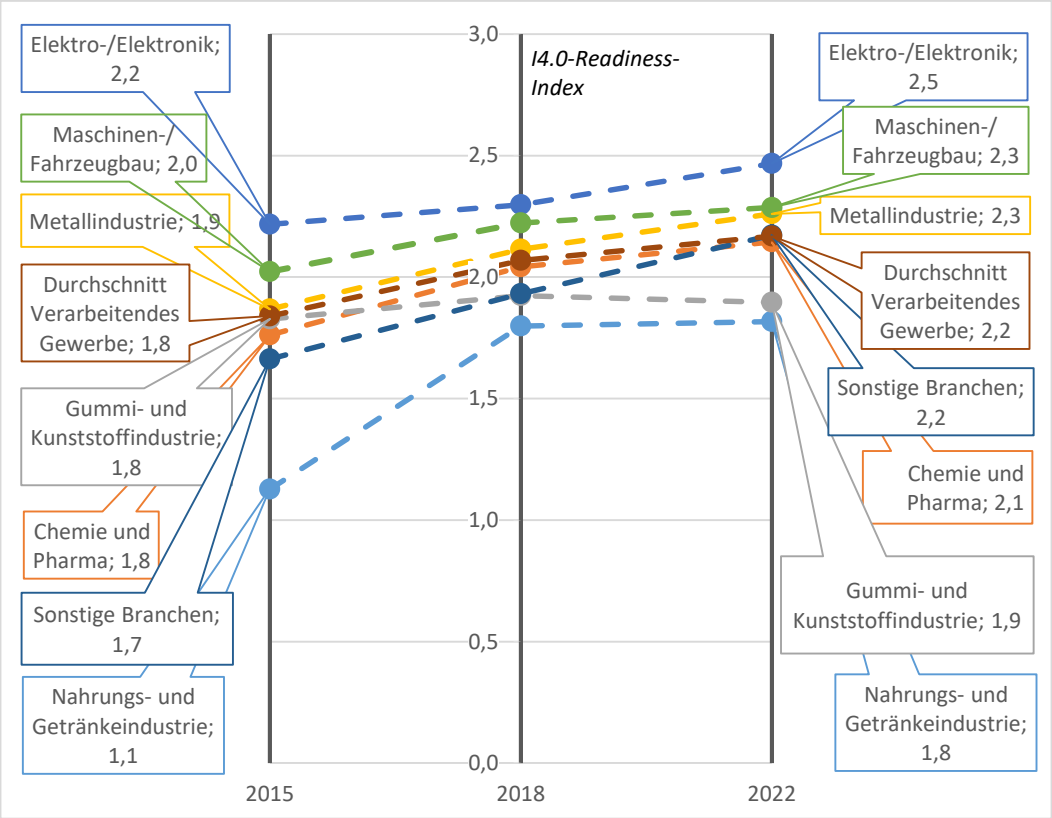
4) Die *Entwicklung im Zeitverlauf* ist vergleichbar für die *kleinen Betriebe* beider Regionen: Zwischen 2015 und 2018 fand der wesentliche Sprung auf eine höhere I4.0-Readiness statt – sowohl in Baden-Württemberg als auch in Gesamtdeutschland. In den folgenden vier Jahren stagnierte die Entwicklung. So wuchs die Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen innerhalb von drei Jahren um 7 bzw. 5 Prozentpunkte an. Zwischen den Jahren 2018 und 2022 blieben diese Anteile nahezu gleich unter den kleinen Betrieben. Gleichermaßen stieg der Anteil der Basisanwender zwischen den Jahren 2015 und 2018 um 13 bzw. 12 Prozentpunkte. In der zweiten Zeitspanne blieben die Anteile nahezu gleich. Im Ergebnis bleibt der Befund von 2015 bestehen, dass die kleinen Betriebe aus Baden-Württemberg auch im Jahr 2022 in der Spitze führend sind.
5) Die *Dynamik bei den mittelgroßen Betrieben* gestaltet sich im Vergleich dazu anders. Im Jahr 2015 waren die mittelgroßen baden-württembergischen Betriebe in den Anteilen der I4.0-Fortgeschrittenen führend, der Anteil an I4.0-Nicht-Nutzern fiel entsprechend geringer aus. Dieser Befund gilt auch für 2022, allerdings schrumpfte der Abstand zu den Betrieben aus den anderen Regionen Deutschlands. Die wesentliche Entwicklung fand in den letzten Jahren statt. Im Gegensatz dazu konnten die mittelgroßen Betriebe der anderen Regionen im Zeitraum von 2015-2018 deutlich aufholen, der Anteil an Fortgeschritten-Nutzern stieg um 8 Prozentpunkte von 28% auf 35%. Damit liegen die beiden Regionen im Jahr 2018 fast gleichauf. Im Zeitraum von 2018-2022 können die mittelgroßen Betriebe der anderen Regionen allerdings kaum weitere Zugewinne in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen erzielen. Die Besonderheit liegt hier darin, dass der Anteil der Nicht-Nutzer stetig von 17% auf 6% zurückging und damit im Jahr 2022 gleichauf mit den baden-württembergischen Betrieben lag. Die mittelgroßen Betriebe der anderen Region sind damit im Vergleich die dynamischere Gruppe.
6) In der Gruppe der *großen Betriebe* findet die wesentliche Entwicklung beim Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen statt. Über den gesamten Zeitraum hinweg stieg dieser Anteil um 15 Prozentpunkte bei den Betrieben aus Baden-Württemberg bzw. 13 Prozentpunkte bei den anderen Betrieben. Damit werden die I4.0-Fortgeschrittenen in beiden Regionen zum Standardmodell für große Betriebe mit einem Anteil von 62% in Baden-Württemberg und 70% im Schnitt in den anderen Regionen.

3.2.2 I4.0-Readiness im Branchenvergleich

Zunächst wird ein Blick auf die Entwicklung der I4.0-Readiness in den verschiedenen Branchen des Verarbeitenden Gewerbes geworfen. Zur leichteren Visualisierung der Ergebnisse wird dabei direkt auf den I4.0-Readiness-Index zurückgegriffen. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen ein generelles Wachstum der I4.0-Indexwerte über die beiden Zeitperioden von 2015-2018 und von 2018-2022.

Als erster Eindruck wird sichtbar, dass in der Periode von 2015-2018 für viele Branchen eine stärkere Zunahme der I4.0-Readiness zu verzeichnen ist als in der Periode von 2018-2022. Die erste Periode kann damit als die dynamischere Periode bezeichnet werden. Im Ergebnis ist die Spanne zwischen den Branchen zum Zeitpunkt 2018 viel kleiner geworden. In der zweiten Periode von 2018-2022 sind nur für wenige Branchen nennenswerte Weiterentwicklungen anhand des I4.0-Readiness-Index festzustellen, was zu einer erneuten Auffächerung der I4.0-Readiness-Levels zwischen den Branchen führt: Während die I4.0-Readiness-Indexwerte im Jahr 2015 noch zwischen 1,1 (Nahrungs- und Getränkeindustrie) und 2,2 (Elektro-/Elektronikindustrie) variierten, fällt diese Spanne im Jahr 2018 merklich geringer aus, was insbesondere auf die Entwicklung in der Nahrungs- und Getränkeindustrie zurückzuführen ist. Im Folgezeitraum zwischen 2018-2022 realisieren insbesondere die Prozessindustrien wie die Gummi und Kunststoffindustrie oder Nahrungsmittel- und Getränkeindustrie keine bzw. kaum eine weitere Zunahme der I4.0-Readiness, hingegen ist in der Elektro- und Elektronikindustrie ein weiterer Anstieg zu verzeichnen.

Abbildung 7: Entwicklung der I4.0-Readiness im Branchenvergleich (im bundesdeutschen Durchschnitt)



Anmerkung: Die Gruppenmittelwerte wurden getestet mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse. Die Branchenmittelwerte unterscheiden sich im Jahr 2022 bei einem Signifikanzniveau von $p<0{,}01$. Im Jahr 2018 bei $p<0{,}05$. Im Jahr 2015 bei $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

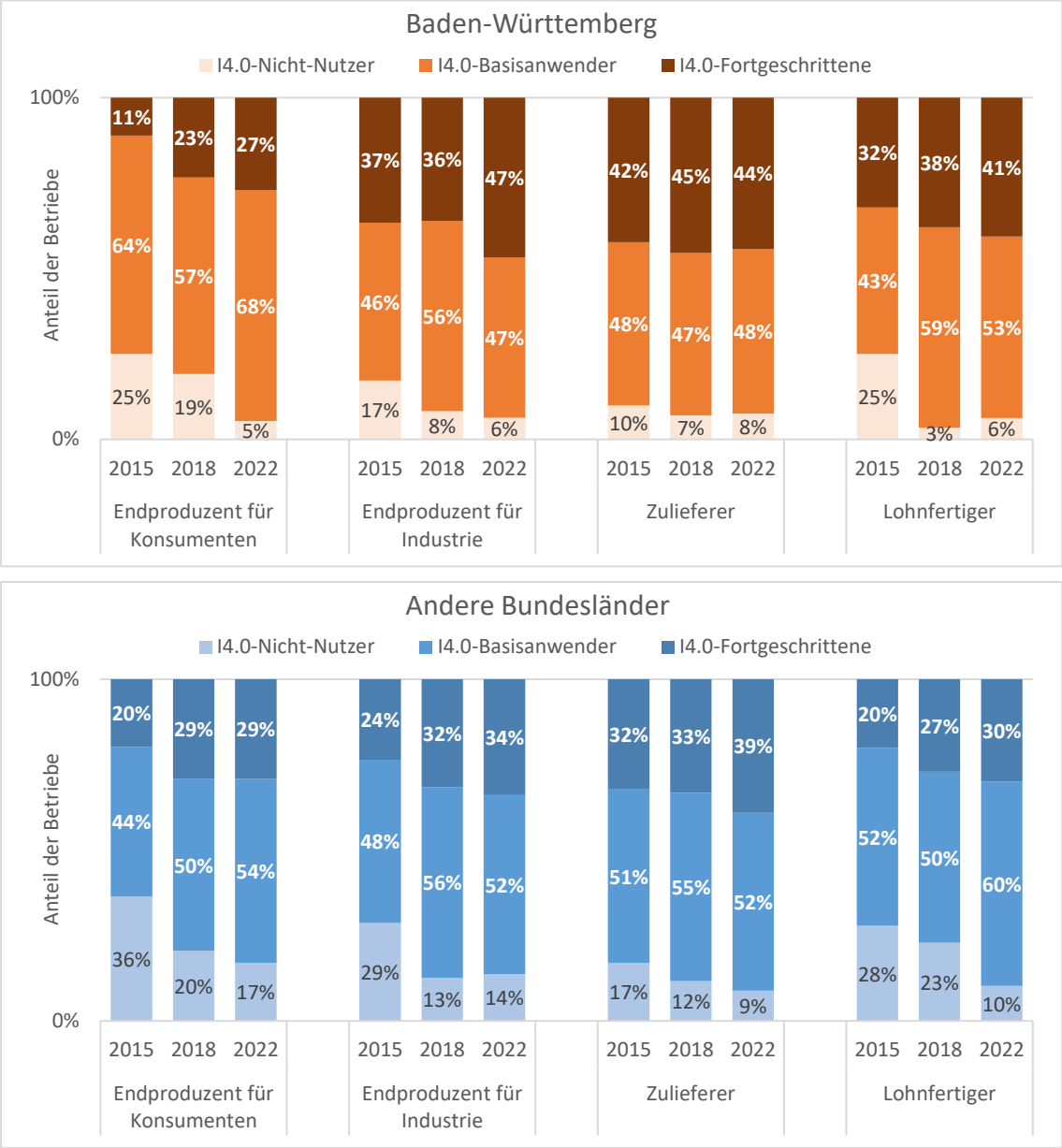
Im Vergleich zwischen den einzelnen Branchen ist festzuhalten, dass die Elektro-/Elektronikindustrie sowie der Maschinen- und Fahrzeugbau bereits im Jahr 2015 vergleichsweise hohe I4.0-Readiness-Indexwerte aufwiesen, welche in den Jahren von 2015-2022 noch größer wurden. Für die hohe I4.0-Readiness in diesen Bereichen kann auf zwei wesentliche Gründe verwiesen werden: Zum einen agieren die Unternehmen aus diesen Branchen nicht nur als Nutzer von I4.0-nahen Technologien, sondern sind auch die wichtigsten Ausrüster für Industrie-4.0-relevanten Technologien im Verarbeitenden Gewerbe insgesamt. Zum anderen zeichnen sich diese Sektoren traditionell durch ihre starke Ausrichtung auf Wettbewerb, Effizienz und Innovation aus. In diesem Zusammenhang spielt die Implementierung von Industrie 4.0-relevanten Technologien eine wichtige Rolle – als ein Faktor zur Steigerung der Produktivität und dadurch für die Erlangung von Wettbewerbsvorteilen.

Schließlich fällt auf, dass der Rückgang der Dynamik für die zweite Periode wesentlich durch die Stagnation in der Nahrungs- und Getränkeindustrie sowie in der Prozessindustrie verursacht wurde. Ein möglicher Grund dafür könnten besondere Belastungen während der Covid-19-Pandemie sein, die hohe Unsicherheiten verursacht hat und somit die Investitionen von Betrieben in die Modernisierung ihrer Produktionsprozesse gebremst haben.

3.2.3 I4.0-Readiness entlang der Wertschöpfungskette

Neben den sektorspezifischen Vergleichen wurden detaillierte Untersuchungen zu Unterschieden zwischen Betrieben an verschiedenen Positionen entlang der Wertschöpfungskette durchgeführt. Unterschieden wird dafür zwischen Herstellern von Konsumgütern, Endproduzenten für Industriekunden, Zulieferer und Lohnfertiger.

Abbildung 8: Entwicklung der I4.0-Readiness entlang der Wertschöpfungskette



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests getrennt für die drei Erhebungswellen. Die I4.0-Readiness-Levels für Betriebe der Endproduzenten sowie der Zulieferer unterscheiden sich statistisch signifikant in allen drei Jahren von den Betrieben der anderen Positionen, bei einem Signifikanzniveau wenigstens $p<0{,}05$. Für Baden-Württemberg gehen diese Unterschiede zurück.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

Abbildung 8 stellt die Befunde zur durchschnittlichen I4.0-Readiness für diese vier Gruppen für die drei Erhebungszeitpunkte dar. Dabei wird zwischen den Befunden für Baden-Württemberg und denen für die anderen Bundesländer unterschieden, um die bestehenden deutlichen Unterschiede transparent abbilden zu können: Zunächst wird ersichtlich, dass der Anstieg der Digitalisierung und die Verbreitung Industrie 4.0-relevanter Technologien entlang der Wertschöpfungskette im Verarbeitenden Gewerbe zu verzeichnen ist. In allen Teilgruppen steigt der Anteil an I4.0-Fortgeschrittenen. Gleichzeitig zeigt sich ein Rückgang des Anteils der Betriebe, die keine der betrachteten Technologien nutzen. Unverändert bleibt, dass die Zulieferer die größte I4.0-Readiness aufweisen, hingegen bleiben die Hersteller von Konsumgütern weiter hinter den anderen Betrieben zurück. Aus zeitlicher Perspektive war hier allerdings in beiden Regionen die größte Dynamik zu beobachten.

Nichtsdestotrotz weisen die Endproduzenten für Konsumgüter auch im Jahr 2022 noch die niedrigsten Anteile an I4.0-Fortgeschrittenen auf.

Im Vergleich zwischen den Regionen wird wiederum deutlich, dass die produzierenden Betriebe in Baden-Württemberg im Durchschnitt über eine höhere I4.0-Readiness im Vergleich zu Betrieben in anderen Regionen Deutschlands. Dies gilt für alle Positionen der Wertschöpfungskette, was insbesondere an den geringen Anteilen an Betrieben ohne eine der untersuchten digitalen Technologien sichtbar wird. Im regionalen Vergleich wird zudem die bereits im Jahr 2015 hohe Digitalisierung bei den Produzenten für Industrieabnehmer sowie den Zulieferern in Baden-Württemberg deutlich.

In der Entwicklung der I4.0-Readiness sind vergleichbare Muster für beide Regionen zu erkennen, was eine Besonderheit für Baden-Württemberg darstellt, angesichts der bereits hohen Ausgangswerte. Im Ergebnis behält Baden-Württemberg damit seine Führungsrolle.

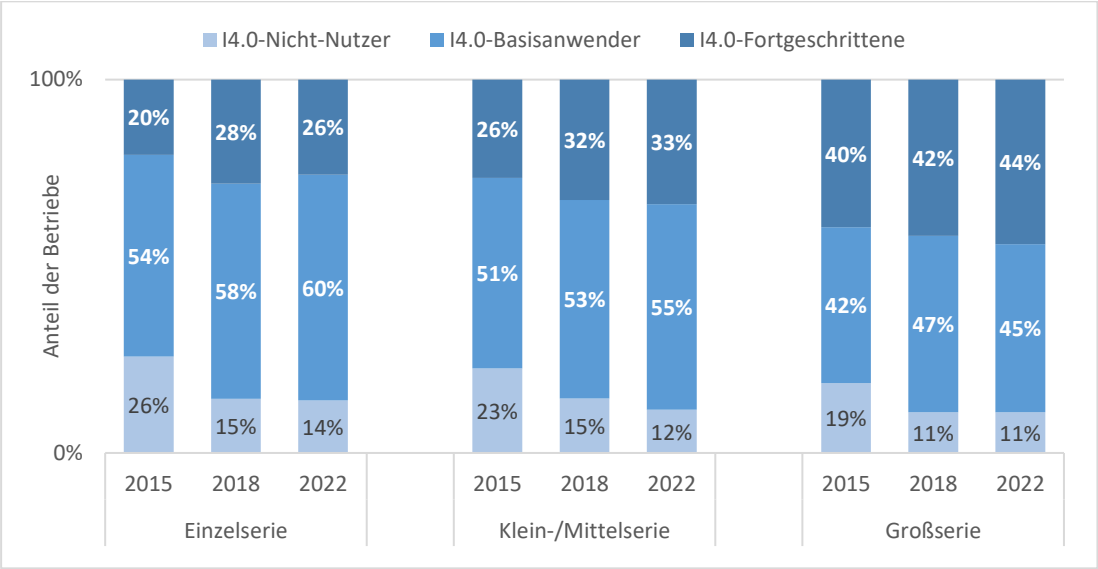
3.2.4 I4.0-Readiness nach Produktionscharakteristika

Für die Entwicklung der I4.0-Readiness bilden die unterschiedlichen Produktionscharakteristika einen wichtigen Rahmen und an dieser Stelle wird auf die unterschiedliche Entwicklung für Betriebe mit verschiedenen Serien- bzw. Chargengrößen einerseits sowie für Betriebe mit verschieden komplexen Produkten andererseits eingegangen.

Die Ergebnisse zur unterschiedlichen Entwicklung für Betriebe mit Einzelfertigung in Abgrenzung zu Betrieben mit einer Produktion in mittlerer Seriengröße oder zu Betrieben mit Großserienfertigung sind in Abbildung 9 dargestellt. Aus zeitlicher Perspektive wird deutlich, dass der Trend zur verstärkten Nutzung von I4.0-Technologien für alle drei Gruppen festzustellen war: Für Einzelfertiger und Hersteller mittlerer Serien stieg der Anteil der I4.0-Basisanwender. Für Hersteller mittlerer und großer Serien sank der Anteil der I4.0-Nicht-Nutzer und es stieg zudem der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen. Dabei fanden diese Entwicklungen in stärkerem Umfang zwischen 2015 und 2018 statt. Aus struktureller Perspektive wird deutlich, dass Betriebe, welche in Großserien fertigen, in deutlich größerem Umfang bereits der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen zugerechnet werden können. Hingegen musste 2015 noch festgestellt werden, dass unter den Einzelfertigern deutlich eher I4.0-Nicht-Nutzer zu finden waren. Dieser Schluss ist 2022 nicht mehr haltbar. Eine Basisdigitalisierung hat mittlerweile über alle drei Gruppen hinweg stattgefunden. Nur noch 14% der Einzelfertiger zählen zu den I4.0-Nicht-Nutzern, während dies noch 11% bei Betrieben mit einer Großserienproduktion sind. Der Vorsprung der Betriebe mit großen Serien liegt heute vor allem im umfangreicheren Einsatz von CPS-Technologien begründet.

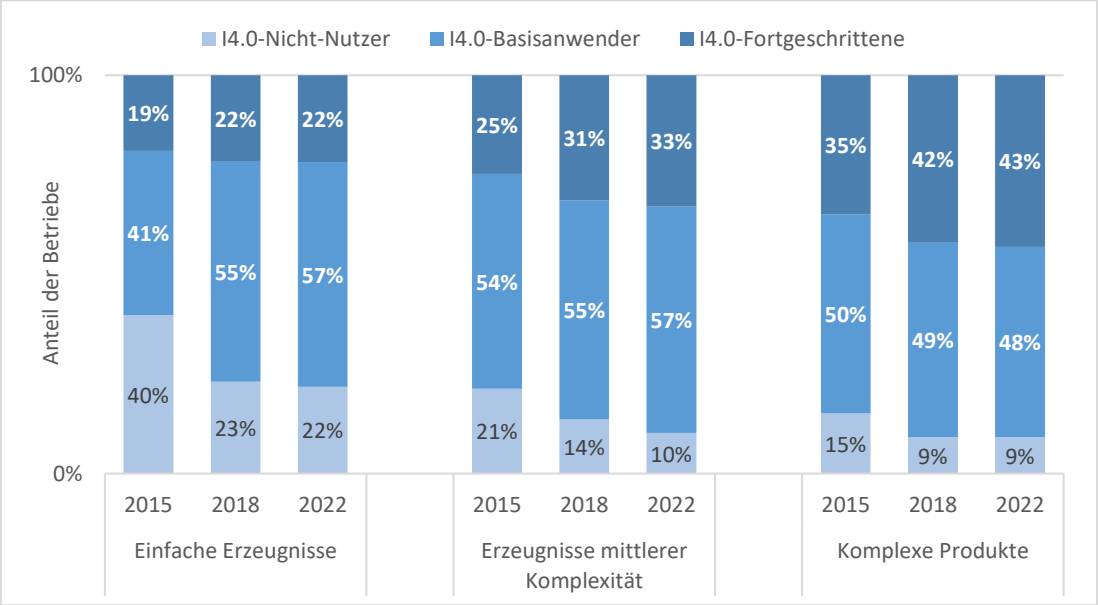
Zusätzlich zur Seriengröße wurde die Entwicklung der I4.0-Readiness nach Produktkomplexität im bundesdeutschen Durchschnitt in den Jahren 2015, 2018 und 2022 analysiert. Abbildung 10 zeigt, dass zu allen drei Erhebungszeitpunkten Betriebe mit komplexen Produkten eher in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen-Nutzer anzutreffen waren. Auch die Hersteller von Produkten mittlerer Komplexität waren im Vergleich zu Herstellern einfacher Produkte eher der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen zuzuordnen. In der grundlegenden Digitalisierung unterschieden sich die beiden Gruppen allerdings kaum.

Abbildung 9: Entwicklung der I4.0-Readiness nach Seriengrößen (im bundesdeutschen Durchschnitt)



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests getrennt für die drei Erhebungswellen. Die I4.0-Readiness-Levels für Betriebe der drei Gruppen unterscheiden statistisch signifikant in allen drei Jahren, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$ (2015, 2022) und $p<0{,}05$ (2018).
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

Abbildung 10: I4.0-Readiness Entwicklung nach Produktkomplexität (im bundesdeutschen Durchschnitt)



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests getrennt für die drei Erhebungswellen. Die I4.0-Readiness-Levels für Betriebe der drei Gruppen unterscheiden statistisch signifikant in allen drei Jahren, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

Aus zeitlicher Perspektive wird eine stärkere Entwicklung zwischen 2015-2018 in allen drei Gruppen der Produktkomplexität deutlich. Die Veränderungen in der Zeit von 2018-2022 hingegen sind minimal in den drei Gruppen.

Beim Vergleich zwischen Betrieben unterschiedlicher Produktkomplexität ist festzustellen, dass Betriebe die Produkte mittlerer Komplexität herstellen, die stärkste Zunahme in der I4.0-Readiness

verzeichnen konnten, gefolgt von Unternehmen, die einfache und komplexe Produkte produzieren. Dies verweist auf die unterschiedlichen Anforderungen und Potenziale für die Digitalisierung, die mit der Produktkomplexität einhergehen.

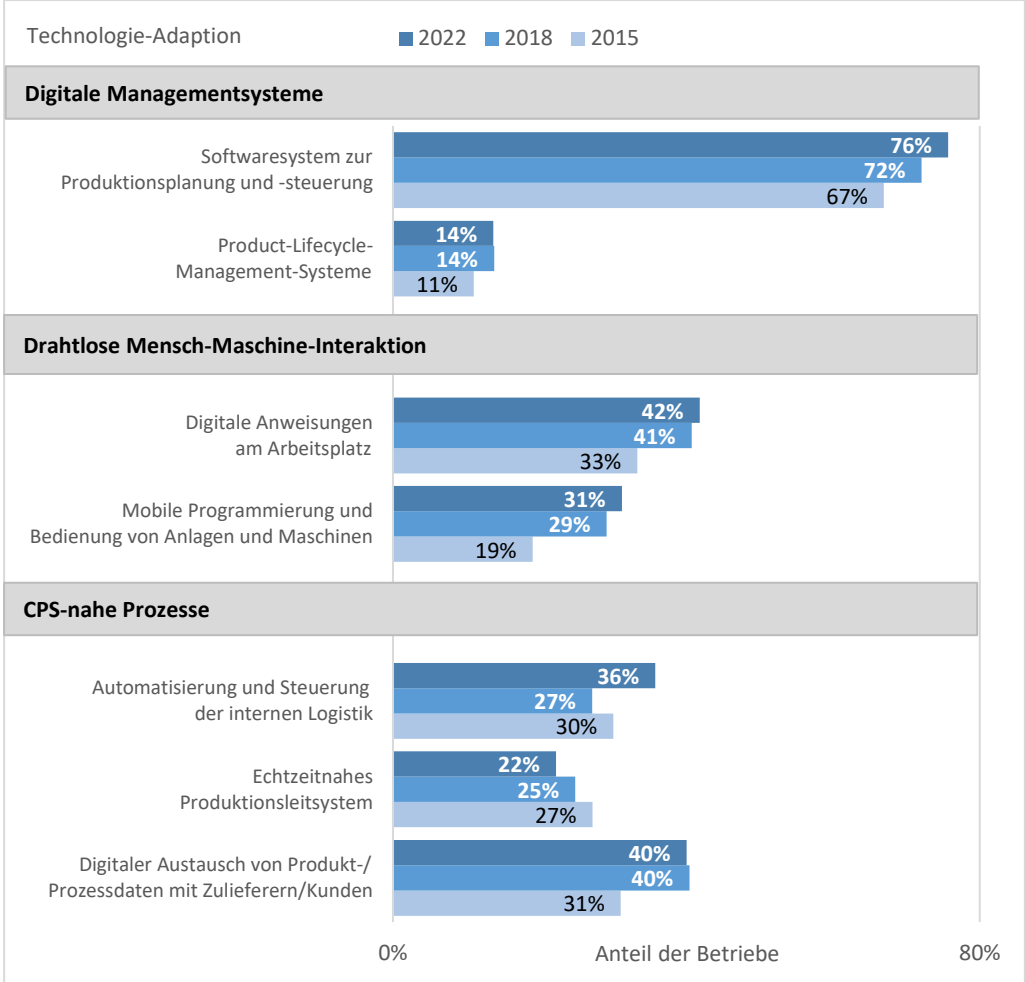
3.3 Technologische Fundierung der I4.0-Readiness

Dieses Kapitel gewährt einen detaillierten Einblick in die Entwicklung der I4.0-Readiness, indem es die Implementierungsdynamiken der einzelnen Technologien, welche im I4.0-Readiness-Index berücksichtigt sind, vertieft beleuchtet. Darüber hinaus wird die Verbreitung der I4.0-Readiness-Technologien im Jahr 2022 zwischen Baden-Württemberg und anderen Bundesländern verglichen und analysiert.

3.3.1 Relevante Technologien im Zeitvergleich

Die Verbreitung einzelner Industrie-4.0-relevanter Technologien zwischen 2015, 2018 und 2022 ist in Abbildung 11 dargestellt. Für die meisten dieser Technologien ist ein positiver Trend sichtbar.

Abbildung 11: I4.0-Readiness-relevante Technologien im Jahresvergleich



Anmerkung: Eine statistische Überprüfung der Unterschiede zwischen den drei Wellen ist anhand der drei Querschnittsanalysen nicht sinnvoll.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, 2018, 2015, Fraunhofer ISI.

So stieg die Nutzung von Softwaresystemen zur Produktionsplanung und -steuerung kontinuierlich und hat im Jahr 2022 einen Anteil von 76% erreicht. Dies unterstreicht die zunehmende Bedeutung

von Softwarelösungen für eine effiziente Produktionssteuerung. Die Verbreitung von Product-Lifecycle-Management-Systemen (PLM-Systeme) hingegen hat kaum zugenommen. Nutzen im Jahr 2015 nur 11% der Betriebe ein solches Tool, sind es seit dem Jahr 2018 14%.

Eine konstante Entwicklung zeigen die Technologien aus dem Bereich der drahtlosen Mensch-Maschine-Kooperation. Heute nutzen etwa zwei von fünf Betrieben digitale Tools zur Kommunikation am Arbeitsplatz. Jeder dritte Betrieb nutzte im Jahr 2022 drahtlose Geräte zur mobilen Programmierung und Bedienung von Anlagen und Maschinen.

Die Verbreitung der Technologien aus dem Bereich der CPS-nahen Prozesse verweist auf interessante Trends, welche zugleich ein uneinheitliches Bild zeichnen. So verzeichnete der digitale Austausch von Produkt- und Prozessdaten mit Zulieferern und Kunden einen deutlichen Anstieg von 31% in 2015 auf 40% im Jahr 2018 bzw. 2022, was auf eine gesteigerte Notwendigkeit der Vernetzung und Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette hinweisen könnte. Die Verbreitung der Lösungen zur Automatisierung und Steuerung der internen Logistik nahm von 30% (2015) auf 36% (2022) leicht zu. Anzunehmen ist hierbei, dass die zur Optimierung der innerbetrieblichen Logistikprozesse vorliegenden Lösungen mittlerweile heute flexibler in die Produktion einzubinden sind. Im Gegensatz dazu ging die Nutzung von echtzeitnahen Produktionsleitsystemen von 27% im Jahr 2015 auf 22% im Jahr 2022 leicht zurück. Dies könnte darauf hindeuten, dass das echtzeitnahe Produktionsleitsystem zumindest aktuell noch nicht für alle Betriebe eine vorteilhafte Anwendung im Kontext der I4.0 zu sein scheint und bspw. prototypische Lösungen, notwendige Lizenzen oder Softwareupdates nicht für den weiteren Betriebsalltag übernommen wurden.

3.3.2 Verbreitung relevanter Technologien im regionalen Vergleich

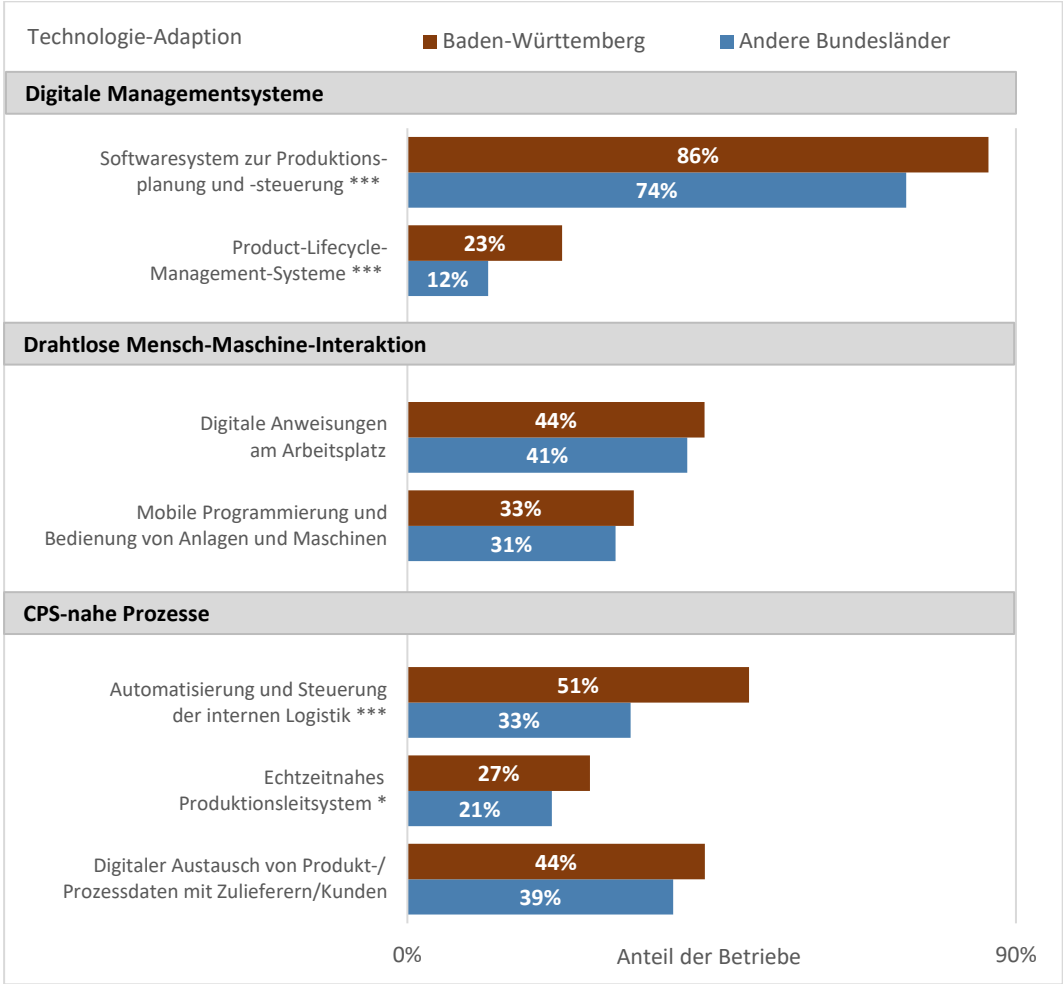
Der Vergleich zwischen Baden-Württemberg und anderen Regionen Deutschlands in Bezug auf die Implementierung von Industrie-4.0-Technologien unterstreicht die herausragende Rolle Baden-Württembergs als Vorreiter auf diesem Gebiet.

Wie in Abbildung 12 deutlich wird, zeichnet sich Baden-Württemberg durch eine fortschrittliche Integration von Technologien aus, die als Grundlage für digitale Managementsysteme dienen. Baden-Württemberg übertrifft andere Regionen mit überdurchschnittlichen 86% bei der Nutzung von Softwaresystemen zur Produktionsplanung und -steuerung im Vergleich zu 74% in anderen Regionen. Auch im Bereich der PLM-Systeme liegen die Unternehmen in Baden-Württemberg deutlich vor.

Die signifikanten Unterschiede erstrecken sich auch auf Technologien, die die Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette verbessern. Der digitale Austausch von Produkt- und Prozessdaten mit Zulieferern/Kunden erreicht in Baden-Württemberg 44%, während andere Regionen einen etwas niedrigeren Anteil von 39% aufweisen. Dies weist auf eine ausgeprägte Ausrichtung Baden-Württembergs auf transparente und vernetzte Lieferketten hin. Ebenso fällt auf, dass Baden-Württemberg mit 27% im Vergleich zu 21% in anderen Regionen einen höheren Einsatz echtzeitnaher Produktionsleitsysteme verzeichnet. Besonders bemerkenswert ist der signifikante Unterschied bei der Automatisierung und Steuerung der internen Logistik, wo Baden-Württemberg mit 51% im Vergleich zu 33% in anderen Regionen deutlich aktiver ist.

In Bereichen der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation sind nur marginal größere Anteil unter den Betrieben aus Baden-Württemberg als bei den Betrieben anderer Regionen festzustellen. Die Verbreitung mobiler Programmierung, Bedienung von Anlagen und Maschinen sowie Tools zur digitalen Kommunikation am Arbeitsplatz unterscheiden sich statistisch nicht belastbar zwischen den untersuchten Regionen.

Abbildung 12: I4.0-Readiness relevante Technologien im Vergleich Baden-Württemberg und andere Bundesländer (2022)



Anmerkung: Getestet wurde der Unterschied in der Nutzung der Technologien zwischen Betrieben Baden-Württembergs und Betrieben der anderen Regionen mittels Mann-Whitney-U -Tests. Signifikanzniveau * p< 0,1, ** p< 0,05, *** p< 0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

4 Ökologische Nachhaltigkeit und I4.0-Readiness

Das folgende Kapitel untersucht den Zusammenhang zwischen der gegenwärtigen Verbreitung der I4.0-Readiness und einem nachhaltigeren Wirtschaften im Verarbeitenden Gewerbe. Der Fokus liegt dabei auf der ökologischen Nachhaltigkeit. Kapitel 4.1 beleuchtet dafür die Verbreitung einer CO_2-Bilanzierung unter Betrieben des Verarbeitenden Gewerbes zum Stand im Jahr 2022 sowie das Zusammenspiel von CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness. Ebenfalls anhand der Daten aus dem Jahr 2022 bietet das Kapitel 4.2 einen Überblick über den relativen Energieverbrauch, wobei auch hierbei der Zusammenhang zur I4.0-Readiness betrachtet wird. Ziel der Analysen ist es, anhand dieser beiden Indikatoren der Frage auf den Grund zu gehen, inwiefern die beiden Teilaspekte der *Twin Transition* (Digitale Transformation und Nachhaltige Transformation) nachweisbare Wechselwirkungen aufeinander ausüben.

4.1 CO_2-Bilanzierung im Verarbeitenden Gewerbe

Ausgehend von der aktuellen Verbreitung der CO_2-Blianzierung im Verarbeitenden Gewerbe werden im Folgenden regionale Unterschiede und die Bedeutung betrieblicher Charakteristiken analysiert. Anschließend steht das Zusammenspiel zwischen I4.0-Readiness und CO_2-Bilanzierung im Mittelpunkt.

Ausgangspunkt der Analysen ist der Befund in Tabelle 3, dass nur 11% der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes berichteten, in den letzten fünf Jahren bis 2022 eine CO_2-Blianz erstellt zu haben. Das heißt, nur einer von zehn Betrieben im Verarbeitenden Gewerbes war in der Lage und zumindest einmal daran interessiert, ihren CO_2-Fußabdruck im Detail zu beziffern. Mit dem Verständnis, dass eine CO_2-Blianz ein Indiz einer ausgeprägten Nachhaltigkeitsorientierung ist, kann diese nur wenigen Betrieben des Verarbeitenden Gewerbes attestiert werden.

Tabelle 3: Verteilung der CO_2-Bilanzen im Verarbeitenden Gewerbe

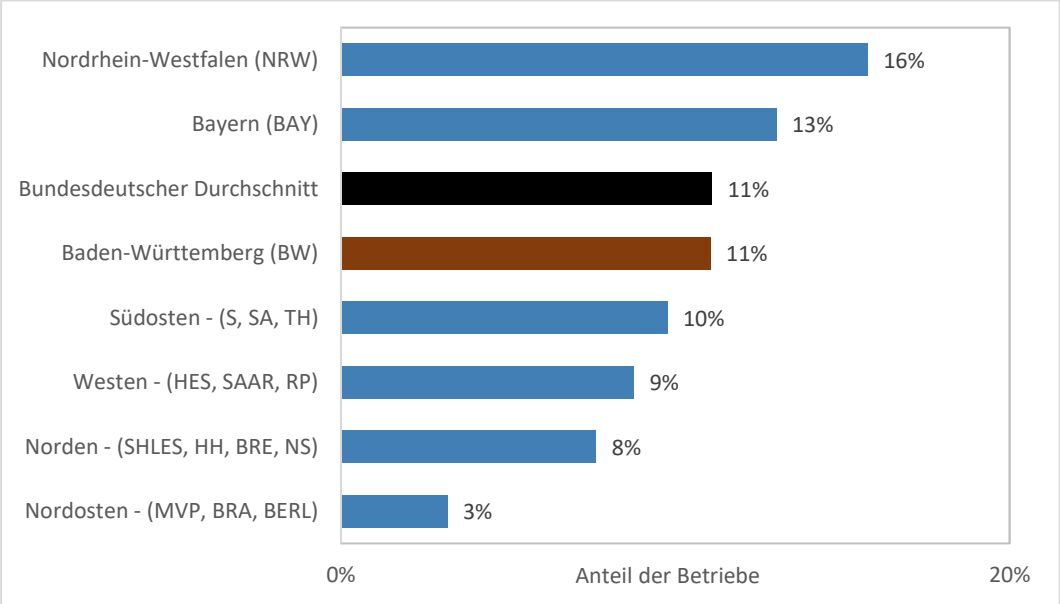
CO_2-Bilanzierung		
CO_2-Bilanz erstellt in letzten fünf Jahren	Nein	89%
	Ja	11%

Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

4.1.1 Regionaler und struktureller Vergleich der CO_2-Bilanzierung

Abbildung 13 bietet den regionalen Vergleich der $C0_2$-Bilanzierung über sieben Regionen Deutschlands hinweg. Hierbei wird deutlich, dass der Anteil an Betrieben, welche in den letzten fünf Jahren eine $C0_2$-Bilanz erstellt hatten, für fünf der sieben Regionen annähernd gleich ist. So liegen die Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg, die südöstlichen Bundesländer (Sachsen, Sachsen-Anhalt, und Thüringen), die Region Westen (Hessen, Saarland und Rheinland-Pfalz) sowie die nördlichen Bundesländer (Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen und Niedersachsen) alle innerhalb einer Spanne von +/-3 Prozentpunkten um den bundesdeutschen Durchschnitt von 11%. Mit einem Anteil von 16% ergibt sich für das Bundesland Nordrhein-Westfalen der höchste Anteil. Am anderen Ende der Skala mit lediglich 3% an Betrieben mit erstellter CO_2-Bilanz liegen die nordöstlichen Bundesländer (Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Berlin). Die Angabe für das Land Baden-Württemberg ist identisch mit dem bundesdeutschen Durchschnitt.

Abbildung 13: Regionaler Vergleich der CO_2-Bilanz-Erstellung



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. Die Verbreitung unterscheidet sich statistisch nicht signifikant zwischen den Regionen. Erst bei Beachtung vielfältiger Faktoren mittels einer multiplen Regression wird erkennbar, dass NRW und der Nordosten bei der Bilanzierung statistisch signifikant vom Mittel abweichen.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

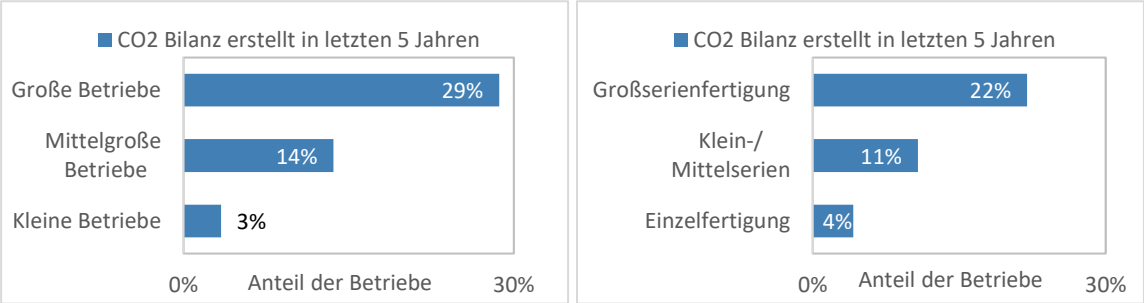
Weitergehende statistische Analysen zeigen, dass diese leichten regionalen Unterschiede wesentlich auf die regionalen Unterschiede in Bezug auf unterschiedliche Betriebscharakteristiken wie Betriebsgröße oder Seriengröße zurückzuführen sind. Lediglich zwischen Nordrhein-Westfahlen an der Spitze und den nordöstlichen sowie den nördlichen Bundesländern am unteren Ende der Verteilung ergeben sich größere, auch in der multivariaten Betrachtung relevante Unterschiede bezüglich der Verbreitung der CO_2-Bilanz-Erstellung. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass den in Baden-Württemberg ansässigen Betrieben keine Vorreiterrolle in der Nachhaltigkeitstransformation des Verarbeitenden Gewerbes mit Blick auf die CO_2-Bilanzierung zukommt.

Die Analyse der Verteilung der Betriebe mit CO_2-Bilanzierung nach verschiedenen Betriebscharakteristiken, wie der Betriebs- und Seriengrößen, der Produktkomplexität sowie der Branchenzugehörigkeit und der Position in der Wertschöpfungskette, verweist auf die Bedeutung sowohl der Betriebsgröße als auch der Seriengrößen für die Verbreitung der CO_2-Bilanzierung. Für beide Kriterien halten die beobachteten Unterschiede auch den statistischen Tests stand. In der Tendenz zeigt sich: Je größer die Betriebe sind bzw. je größer die gefertigten Serien, desto größer der Anteil an Betrieben, welche in den letzten fünf Jahren eine CO_2-Bilanz erstellt haben. Beide Beobachtungen sind in Abbildung 14 dargestellt.

Zu vermuten ist, dass sich diese beiden Zusammenhänge primär auf die Ressourcenausstattung sowie das Vorhandensein (bzw. Nicht-Vorhandensein) von Skaleneffekten bei größeren Serien zurückführen lassen: Zum einen verfügen größere Unternehmen in der Regel über mehr finanzielle und personelle Ressourcen, die es ihnen ermöglichen, ein Umweltberichterstattungswesen aufzubauen und zu etablieren. Angesichts der wahrscheinlich ab 2024 verpflichtenden CO_2-Bilanzen im Kontext der Nachhaltigkeitsberichtserstattung werden auch viele größere Betriebe mit 250 oder mehr Beschäftigten bereits erste Schritte für ein CO_2-Reporting im Betrieb gegangen sein. Im Kontrast dazu stehen kleinere Betriebe oftmals vor der Herausforderung, dass die für eine CO_2-Bilanzierung notwendigen Investitionen sowie die Komplexität und der Aufwand der mit der Datensammlung und -verarbeitung im Rahmen der CO_2-Bilanzierung verbunden ist, eine signifikante Barriere darstellen können.

Zum anderen profitieren Unternehmen mit Großserienfertigung von Skaleneffekten, die es ihnen erlauben, die Kosten für die Erstellung von CO_2-Bilanzen auf eine größere Produktionsmenge zu verteilen. Im Gegensatz dazu wird für Betriebe mit relativ wenig standardisierten Fertigungsprozessen, wie sie vermehrt bei in Einzelserienfertigung produzierenden Betrieben vorkommen können, die Komplexität einer CO_2-Bilanzierung stärker ins Gewicht fallen. Infolgedessen ist die CO_2-Bilanzierung zum einen für kleinere Unternehmen und zum anderen bei Einzelserienfertigung oftmals eine Frage der Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit.

Abbildung 14: CO_2-Bilanzierung nach Betriebs- und Seriengrößen



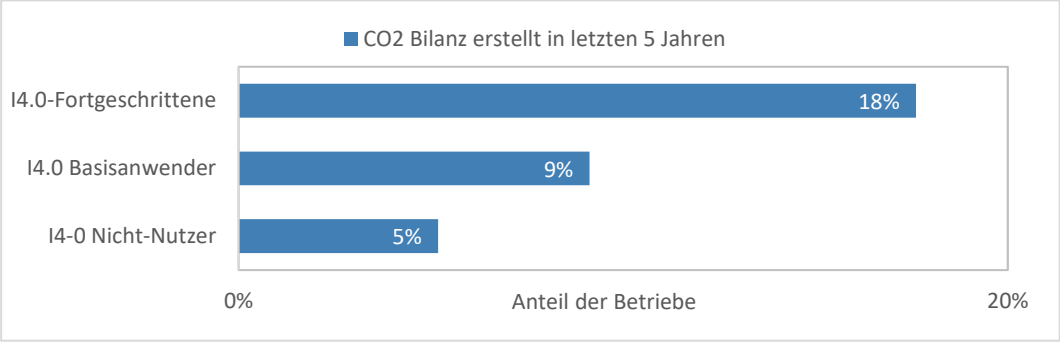
Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. Die Erstellung der CO_2-Bilanz unterscheidet sich bei beiden Differenzierungen statistisch signifikant, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Bezüglich weiterer Struktur- und Produktionscharakteristiken, wie der Branchenzugehörigkeit, der Produktkomplexität oder der Position in der Wertschöpfungskette, zeigten sich keine auffälligen Häufigkeiten in der CO_2-Bilanz-Erstellung. So erstellten Endproduzenten für Konsumgüter, Endproduzenten für Industriegüter oder auch Zulieferbetriebe und Lohnfertiger in den letzten fünf Jahren zu vergleichbaren Anteilen eine CO_2-Bilanz. Daher wird im Folgenden auf eine grafische Darstellung dieser Zusammenhänge verzichtet. Den Ergebnissen zu Folge konnten anteilig vergleichbar viele Hersteller komplexer Produkte wie Hersteller einfacherer Erzeugnisse eine CO_2-Bilanz erstellen. Es scheint demnach keine höheren Herausforderungen für die CO_2-Bilanzeriung in Abhängigkeit der Komplexität des hergestellten Produkts zu geben. Interessanterweise ließen sich auch im Branchenvergleich keine statistisch signifikanten Unterschiede erkennen.

4.1.2 CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness

Vor dem Hintergrund der strukturellen Analysen kann nun der Zusammenhang zwischen CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes untersucht werden. Abbildung 15 zeigt, dass der Anteil an Betrieben mit erstellter CO_2-Bilanz unter jenen Betrieben größer ist, welche eine höhere I4.0-Readiness aufweisen: Betriebe aus der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen erstellen mit einem Anteil von 18% circa doppelt so häufig eine CO_2-Bilanz als Betriebe aus der Gruppe der I4.0-Basisanwender (9%). Im Vergleich zu den I4.0-Nicht-Nutzern ist dieser Anteil sogar mehr als dreifach so hoch.

Abbildung 15: Zusammenspiel CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness



Anmerkung: Der Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. Die Erstellung der CO_2-Bilanz unterscheidet sich statistisch signifikant, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$. Allerdings bei Beachtung vielfältiger struktureller Faktoren mittels einer multiplen Regression wird deutlich, dass I4.0-Readiness kein verlässlicher Prädiktor für eine CO_2-Bilanz ist.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

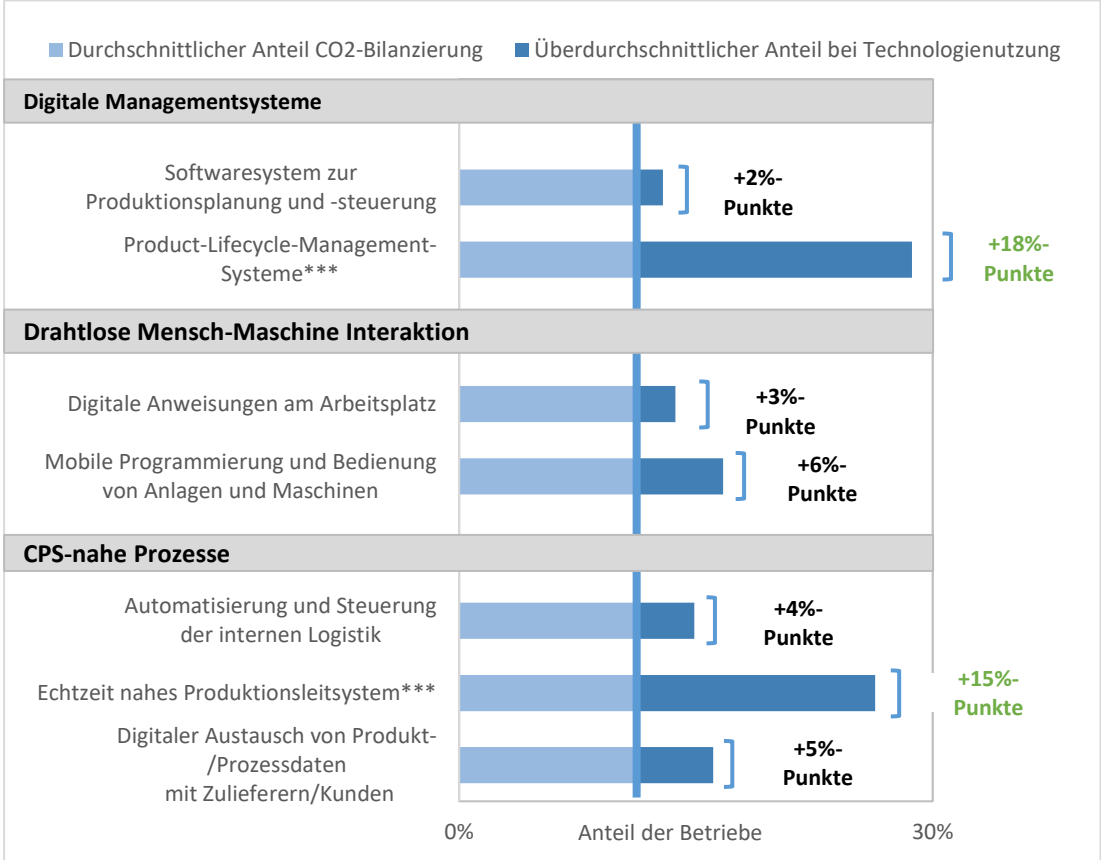
Vertiefende multivariate Analysen ergaben jedoch, dass die Unterscheidung zwischen den verschiedenen I4.0-Readiness-Stufen nach der Kontrolle weiterer Strukturparameter, insbesondere der Betriebs- sowie Seriengröße, keinen entscheidenden Erklärungsbeitrag für die CO_2-Bilanzierung leistet. Vielmehr lassen sich die unterschiedlichen Anteile der Betriebe mit erstellter CO_2-Bilanz für die verschiedenen I4.0-Readiness-Stufen fast komplett auf die höhere Ressourcenausstattung größerer Betriebe sowie die Skaleneffekte einer Produktion mit großen Serien zurückführen. Dies impliziert, dass das Level der I4.0-Readiness eines Betriebs selbst über den Einfluss der Betriebs- und Seriengrößen hinaus keine zusätzliche Auswirkung auf die Fähigkeit eines Betriebs, eine CO_2-Bilanz zu erstellen, aufweist.

Dieser Befund allein bietet noch keine Aussage zu spezifischen technologischen Grundlagen. Ein Blick auf den Einsatz einzelner Technologien bietet hier noch ein differenzierteres Bild: Abbildung 16 zeigt dazu das Zusammenspiel von CO_2-Bilanzierung und der Nutzung der für den I4.0-Index relevanten Technologien. Deutlich wird, dass der Einsatz einiger spezifischer I4.0-Readiness-Technologien mit einem überdurchschnittlichen Anteil an Betrieben mit CO_2-Bilanzierung einhergeht:

Aus dem Bereich der digitalen Managementsysteme ist es die Verwendung von PLM-Systemen und aus dem Bereich der CPS-nahen Systeme der Einsatz echtzeitnaher Produktionsleitsysteme, welche mit einer CO_2-Bilanzierung assoziiert sind. Der Anteil der Betriebe mit einer CO_2-Bilanz ist unter den Betrieben mit PLM-Systemen mehr als dreimal so hoch wie unter den Betrieben, welche angaben, keine PLM-Systeme zu verwenden. Unter den PLM-Nutzern liegt der Anteil an Betrieben mit erstellter CO_2-Bilanz um 18 Prozentpunkte über dem Gesamtdurchschnitt aller Betriebe von 11%. Analog ist für Nutzer echtzeitnaher Produktionsleitsysteme (z.B. MES) der Anteil mit CO_2-Bilanzierung ebenfalls mehr als fast dreifach höher als für Betriebe ohne diese Technologie. Hier liegt der Anteil an Betrieben mit CO_2-Bilanzierung 15 Prozentpunkte über dem Gesamtdurchschnitt.

Auch nach Kontrolle der relevanten Strukturparameter wie der Betriebs- und Seriengröße zeigt sich, dass die Chance der Erstellung einer CO_2-Bilanz bei Betrieben, welche eine der beiden technologischen Lösungen einsetzen, größer ausfällt.

Abbildung 16: Zusammenspiel zwischen CO_2-Bilanzierung und I4.0-Technologien



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Mann-Whitney-U-Tests sowie in multiplen Regressionsmodellen. Der Anteil der CO_2bilanzierenden Betriebe ist größer als bei den Betrieben, die diese Technologie nicht anwenden, bei einem Signifikanzniveau *** $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Das Zusammenspiel zwischen I4.0-Readiness und der ökologischen Nachhaltigkeitsorientierung der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes, gemessen am Anteil der Betriebe mit einer in den letzten fünf Jahren erstellten CO_2-Bilanz, erweist sich damit als komplexer, als auf den ersten Blick erwartet. Die vorausgegangene Analyse verdeutlicht dazu zwei entscheidende Erkenntnisse: Zum einen erweisen sich verschiedene Betriebscharakteristiken, konkret die Betriebsgröße sowie die Seriengröße, als die wahren Treiber hinter einem Großteil des auf den ersten Blick eindeutig erscheinenden Zusammenhangs zwischen I4.0-Readiness und CO_2-Bilanzierung. Zum anderen ist ein relevanter Einfluss der I4.0-Indikator-Technologien auf die Chance, dass ein Betrieb eine CO_2-Bilanz erstellt hat, nur in wenigen Fällen nachweisbar.

Im Ergebnis kann festgehalten werden, dass nur spezifische Aspekte der Digitalisierung die Erstellung einer CO_2-Bilanzierung innerhalb der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes stützen. Daher ist anzunehmen, dass die ausgangs angesprochenen Synergien zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeitstransformation nur dort entstehen können, wo geeignete Technologien zum Einsatz kommen und der Produktionskontext dies zulässt. So verweisen PLM-Systeme oder echtzeitnahe Produktionsleitsysteme auf ein für die CO_2-Bilanzierung so wichtiges Datenmanagement und Kodifizierung von Informationen, welche die Erstellung einer CO_2-Bilanz ggf. entscheidend erleichtern.

4.2 Anteil der Energiekosten im Verarbeitenden Gewerbe

Dieses Kapitel betrachtet den Aspekt der nachhaltigen Energieverwendung in Betrieben des Verarbeitenden Gewerbes. Dazu stehen die relativen Energiekostenanteile am Gesamtumsatz des Jahres 2021 im Mittelpunkt. Ebenfalls betrachtet wird der Zusammenhang zur I4.0-Readiness. Ziel dabei ist es potenzielle Wechselwirkungen der I4.0-Readiness zum Energieverbrauch zu beleuchten.

Ausgehend von einem generellen Überblick zu den Energiekostenanteilen im Verarbeitenden Gewerbe sowie in den verschiedenen Teilbranchen erfolgt die Analyse struktureller Unterschiede über verschiedene regionale und betriebliche Charakteristiken hinweg. Darauf aufbauend wird dann das Zusammenspiel zwischen I4.0-Readiness und den relativen Energiekosten untersucht.

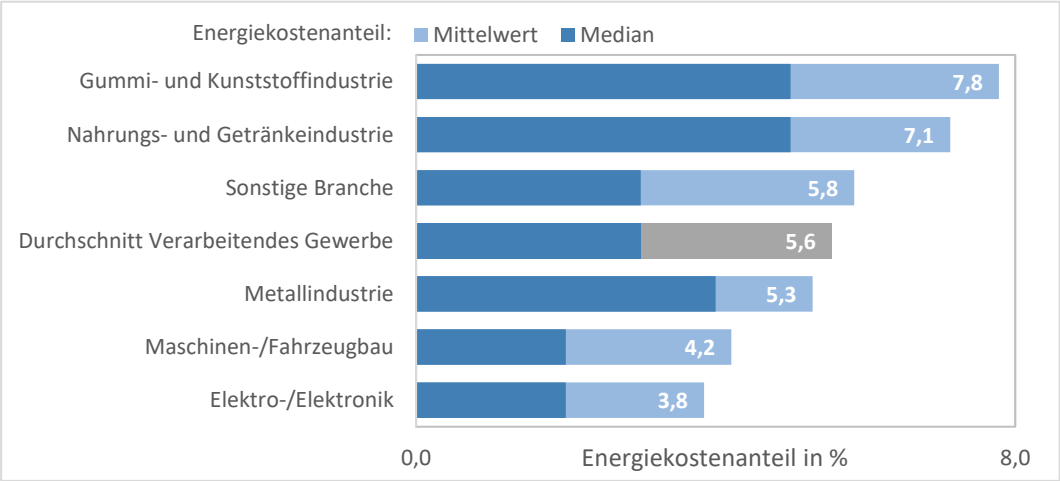
4.2.1 Energiekosten im Verarbeitenden Gewerbe

In der Befragungswelle des Jahres 2022 stellten 712 Betriebe eine konkrete Information zu ihrem Energiekostenanteil des Vorjahres zur Verfügung. Die Analyse dieser Angaben ergab für das Jahr 2021 einen durchschnittlichen Energiekostenanteil von 5,6% gemessen am Gesamtumsatz. Dabei sind allerdings große Variationen zu beobachten. Die Hälfte der Betriebe muss 3% oder weniger für Energiekosten aufwenden, für ein Viertel der Betriebe liegt dieser Anteil sogar unter 1,4%. Gleichzeitig muss jedoch ein weiteres Viertel der Betriebe mindestens 6,5% ihres Umsatzes in Energie investieren, Jeder zehnte Betrieb sogar mindestens 12%.

Im Vergleich zu anderen großen Kostengruppen wie Personalkosten (durchschnittlich 30% des Umsatzes) oder dem Kosten für Vorleistungen (ca. 40% am Umsatz) ist dieser Anteil relativ gering. Für einige Betriebe allerdings sind die Gesamtkosten für die Sicherstellung der Energieversorgung doch erheblich.

Wesentlich für die große Spannweite sind die unterschiedlichen Energiebedarfe der verschiedenen Branchen des Verarbeitenden Gewerbes. Abbildung 17 zeigt den Durchschnitt des Energiekostenanteils für verschiedene Branchen sowohl als Median (dunkler Balken) als auch als Mittelwert (angegebener Wert).

Abbildung 17: Mittelwerte der Energiekostenanteile nach Branchen



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Die relativen Energiekosten unterscheiden sich zwischen den Branchen statistisch signifikant, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

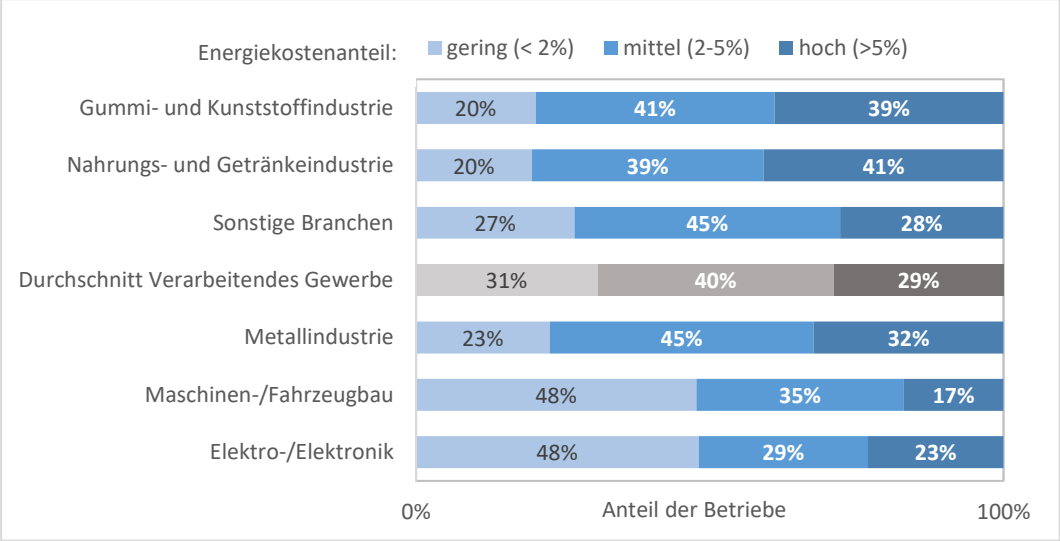
Bei Betrachtung der Mittelwerte für ausgewählte Branchen ergeben sich unterdurchschnittliche Energiekostenanteile für Betriebe der Elektronikindustrie (3,8%) sowie dem Maschinen- und Fahrzeugbau (4,2%). Im Vergleich dazu sind stark überdurchschnittliche Energiekostenanteile in den

Nahrungsmittel- und Getränkeindustrien (7,1%) sowie den Gummi- und Kunststoffindustrien (7,8%) vorzufinden. Die Metallindustrie sowie Betriebe sonstiger Branchen liegen weitestgehend im Gesamtdurchschnitt.

Außer in der Metallindustrie liegt der Median in den einzelnen Branchen deutlich unter dem arithmetischen Mittel. Dies bedeutet, dass in den einzelnen Branchen die Hälfte der Betriebe nur relativ geringe Energiekosten zu verzeichnen hat, im Gegensatz dazu jedoch einige wenige Betriebe der Branchen deutlich höhere Energiekosten stemmen müssen. Damit bleibt festzuhalten, dass es deutliche Unterschiede in den Energiekostenanteilen zwischen den Branchen gibt, jedoch innerhalb der einzelnen Branchen ebenfalls erhebliche Unterschiede, d.h. eine große Spannweite der Energiekostenanteile bestehen. Auch nach Kontrolle relevanter Strukturparameter erweist sich die Branchenzugehörigkeit als eine wesentliche Determinante des Energiekostenanteils eines Betriebs.

Um dieser großen Spannweite einfach im Blick behalten zu können, wird in den folgenden Analysen eine Klassifikation der relativen Energiekostenanteile verwendet. Mit dieser Klassifikation wird unterschieden zwischen Betrieben mit geringen Energiekosten bis 2%, Betrieben mit einem mittleren relativen Energiekostenanteil zwischen 2% und 5% sowie Betrieben mit hohen Energiekosten von über 5% des Umsatzes.

Abbildung 18: Energiekostengruppen nach Branchen



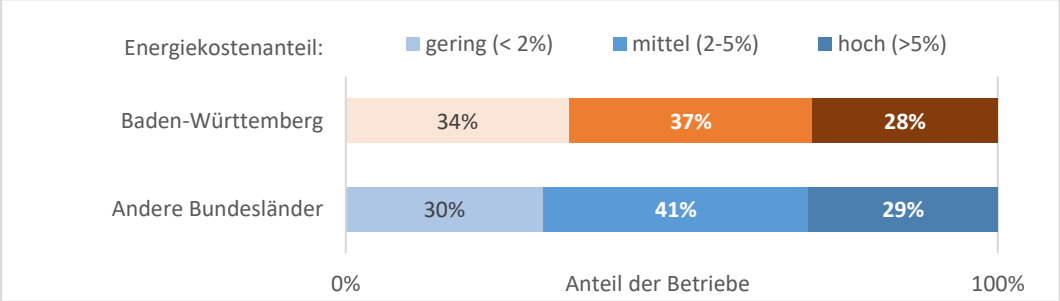
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Wie aus Abbildung 18 deutlich wird, berichteten selbst in den beiden energieintensivsten Branchen (Gummi-und Kunststoffindustrie sowie Nahrungs- und Getränkeindustrie) 20% der Betriebe einen Energiekostenanteil von unter 2%. Gleichzeitig benötigen aber ca. 40% der Betriebe dieser Branche mehr als 5% ihres Umsatzes für die Energieversorgung, wobei viele dieser Betriebe sogar deutlich mehr als 10% des Umsatzes für die Energiekosten ausgeben mussten. Auch in den beiden Branchen mit durchschnittlich niedrigen Energiekosten (Elektro-/Elektronikindustrie sowie Maschinen- und Fahrzeugbau) gibt es noch einen relevanten Anteil an Betrieben mit Energiekosten von über 5% des Umsatzes. Fast die Hälfte der Betriebe dieser Branchen muss jedoch weniger als 2% ihres Umsatzes für Energiekosten ausgeben.

4.2.2 Regionaler und struktureller Vergleich der Energiekostenanteile

Im regionalen Vergleich der Energiekostenanteile (anhand der Klassifikation der relativen Energiekosten in die drei in Abbildung 18 untersuchten Gruppen) ergibt sich ein relativ homogenes Bild über die verschiedenen Regionen Deutschlands hinweg. Der direkte Vergleich zwischen den Energiekostenanteilen der in Baden-Württemberg ansässigen Betriebe mit denen der Betriebe aus den weiteren Bundesländern ergibt eine fast identische Verteilung der Energiekostenanteile auf die drei Energiekostengruppen (Abbildung 19). Zu beobachten sind nur kleine Abweichungen, welche sich in den statistischen Tests als nicht belastbar erweisen. Im Ergebnis ist von keinem regionalen Unterschied in der Höhe der Aufwendungen für die Deckung des Energiebedarfs auszugehen. Auch eine multivariate Betrachtung und Kontrolle weiterer relevanter Strukturmerkmale, wie Produktions- und Betriebscharakteristiken, stützt diesen Schluss.

Abbildung 19: Regionaler Vergleich der Energiekostengruppen



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Mann-Whitney-U-Tests. Kein statistisch signifikanter Unterschied.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

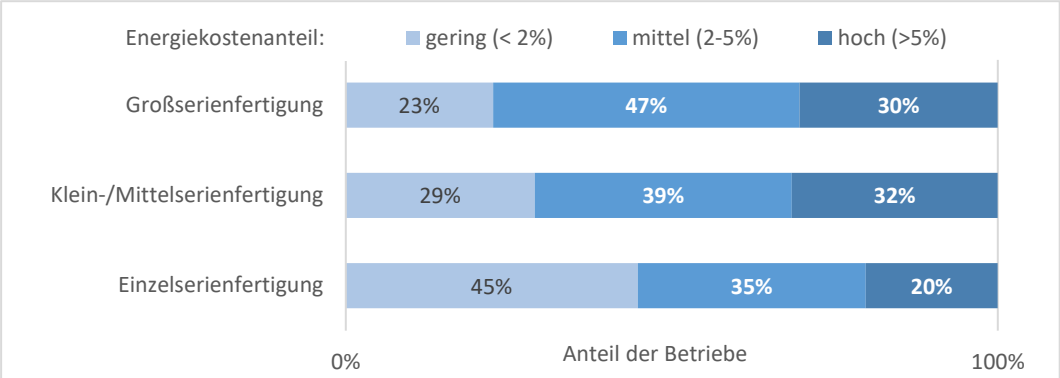
Neben den Analysen zur Auswirkung von Branchenzugehörigkeit sowie Region auf den Energiekostenanteil ist der Einfluss weiterer struktureller Merkmale von Interesse. Insbesondere die Seriengröße für das Hauptprodukt macht einen wesentlichen Unterschied. Sowohl in der bivariaten wie auch der multivariaten Betrachtung erweist sich lediglich die Seriengröße als weitere, zusätzlich relevante Determinante der relativen Energiekosten. Abbildung 20 bildet den Zusammenhang zu den Energiekosten anhand der drei Energiekostengruppen ab:

Während in Betrieben mit Großserienfertigung sowie bei kleinen und mittleren Seriengrößen die Energiekosten kaum voneinander abweichen, ergibt sich ein deutlicher Unterschied zu den in Einzelserienfertigung produzierenden Betrieben. Diese weisen mit 45% einen deutlich größeren Anteil an Betrieben mit geringen Energiekostenanteilen auf, als die beiden zuvor besprochenen Gruppen (23%, respektive 29%). Hintergrund dafür ist zum einen, dass bei Betrieben mit Einzelserienfertigung von einem hohen Anteil an relativ gering standardisierten, eher manuell ausgeführten Tätigkeiten auszugehen ist, welche im Regelfall eine geringere Energieintensität vermuten lassen. Gleichzeitig erfordert diese Produktionsform auch einen relativ höheren Personaleinsatz. Im Gegensatz dazu ist bei Betrieben mit Großserienfertigung davon auszugehen, dass standardisierte und automatisierte Prozesse und Anlagen für größere Losgrößen auch einen höheren Energieverbrauch mit sich bringen sowie ebenfalls potenziell geringere Anteile an personalkostenintensiven, manuellen Fertigungsschritten.

Darüberhinausgehende Auswirkungen struktureller Faktoren waren nicht zu finden. Weder Produktkomplexität noch die Positionierung in der Wertschöpfungskette spielen eine Rolle, was an die Ergebnisse zur CO_2-Bilanzierung erinnert. Jedoch anders als bei den Analysen zur CO_2-Bilanzierung sind auch keine relevanten Unterschiede im Energiekostenanteil zwischen kleineren oder größeren

Betrieben festzustellen; die Anteile an Betrieben mit geringen, mittleren oder hohen Energiekostenanteilen sind über die verschiedenen Betriebsgrößenklassen hinweg gleich dem Durchschnitt des Verarbeitenden Gewerbes. Auf eine grafische Darstellung dieser Werte wird daher verzichtet.

Abbildung 20: Energiekostengruppen nach Seriengrößen

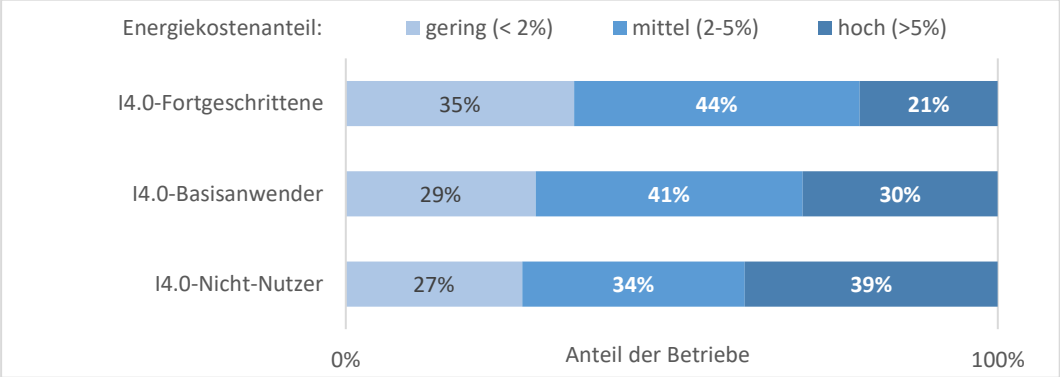


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Die Anteile der Energiekostengruppen unterscheiden sich zwischen den drei Teilgruppen statistisch signifikant, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

4.2.3 Energiekostenanteile und I4.0-Readiness

Betrachten wir nun das Zusammenspiel zwischen I4.0-Readiness und der Verteilung der gruppierten Energiekostenanteile, so treten deutliche Unterschiede zwischen den I4.0-Readiness-Levels zu Tage. Wie in Abbildung 21 veranschaulicht, lässt sich deskriptiv ein klarer Zusammenhang zwischen der I4.0-Readiness einer Produktion und dem Anteil an Energiekosten des Betriebs beobachten: Betriebe mit einer höheren I4.0-Readiness haben im Durchschnitt leicht geringere Energiekostenanteile als Betriebe mit geringerer I4.0-Readiness.

Abbildung 21: Zusammenspiel zwischen Energiekostenanteilen und I4.0-Readiness

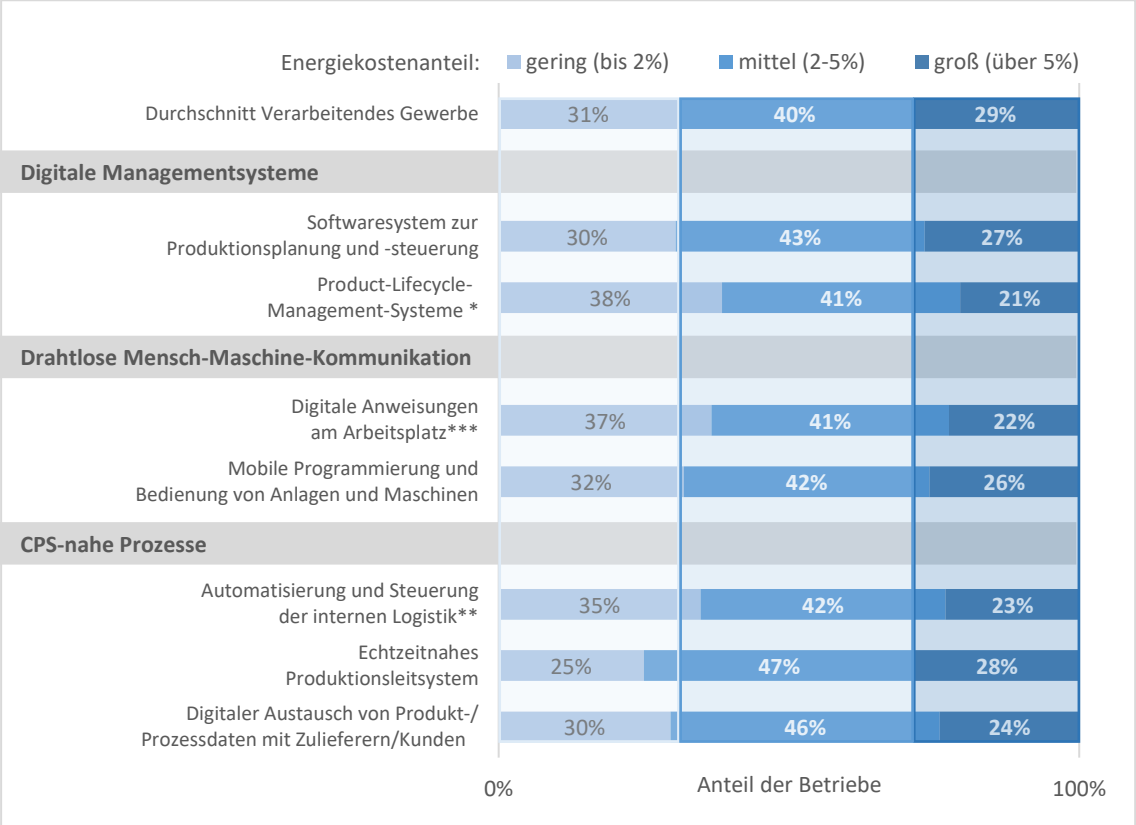


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Die Anteile der Energiekostengruppen unterscheiden sich zwischen den I4.0-Readiness-Niveaus, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Während unter den I4.0-Fortgeschrittenen lediglich etwa ein Fünftel Energiekostenanteile von über 5% aufweisen, sind es unter den I4.0-Basisanwendern sowie den Nicht-Nutzern bereits jeweils 30% bzw. fast 40%. Damit haben die I4.0-Nicht-Nutzer eine doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit, zu den Betrieben mit den höchsten Energiekosten zu zählen als Betriebe aus der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen. Im Gegenzug gehören deutlich weniger Betriebe der beiden niedrigeren I4.0-Readiness-Stufen, I4.0-Basisanwender (29%) und I.4.0-Nicht-Nutzer (29%), zu den Betrieben mit weniger als 2% Energiekostenanteil im Vergleich zu 35% unter den Betrieben der höchsten I4.0-Readiness.

Weiterführende Regressionsanalysen der Unterschiede in den Energiekostenanteilen zeigen jedoch, dass die verschiedenen I4.0-Readiness-Stufen bei Kontrolle des Einflusses weiterer Strukturparameter, insbesondere der Branchenstruktur sowie der Seriengröße, nicht als entscheidende Treiber der Energiekosten zu erkennen sind. Die I4.0-Readiness trägt nicht zur Verbesserung der Modelle zur Erklärung des Energiekostenanteils bei. Vielmehr lässt sich die Chance eines Betriebs, einem der drei Energiekostengruppen zugerechnet zu werden, wesentlich durch die Branchenzugehörigkeit sowie die Seriengröße im Regressionsmodell erklären. Dies impliziert, dass der Anteil an Energiekosten eines Betriebs nicht durch das Level der I4.0-Readiness bestimmt wird. Vergleichbar zu den Ergebnissen zur CO_2-Bilanzierung sind vielmehr strukturelle Faktoren die wahren Treiber des in Abbildung 21 dargestellten Zusammenhangs.

Abbildung 22: Zusammenspiel zwischen gruppierten Energiekostenanteilen I4.0-Technologien



Anmerkung: Getestet wurde der Unterschied in den Energiekostenanteilen bei Nutzung der Technologie im Kontrast zur Nicht-Nutzung mittels Mann-Whitney-Tests. Signifikanzniveau * p< 0,1, ** p< 0,05, *** p< 0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Auch ein Blick auf die Ebene einzelner I4.0-Technologien stützt diese Schlussfolgerung. Abbildung 22 bietet den Überblick zu den Anteilen an Betrieben in den drei Niveaus der Energiekostenanteile in Abhängigkeit von der Nutzung einzelner Technologien. Zur Sichtbarkeit der Abweichung vom Durchschnitt sind zudem die durchschnittlichen Anteile für das Verarbeitenden Gewerbes als Trennlinien abgebildet: Insgesamt werden nur geringe Unterschiede zwischen den Nutzern der verschiedenen Technologien sichtbar. Die Anteile an Betrieben mit wenigen, mittleren oder hohen Energiekostenanteilen variieren nur geringfügig und viele der sichtbaren, kleinen Differenzen halten einer statistischen Prüfung nicht stand. Lediglich bei zwei Technologien sind statistisch signifikante Abweichungen von der durchschnittlichen Verteilung in den Anteilen der Betriebe mit niedriger bzw. hohen Energiekostenanteile festzustellen. Im Detail zeigt sich, dass Betriebe, welche *Digitalen Anweisungen am Arbeitsplatz* einsetzen, häufiger mit einem Energiekostenanteil von weniger als 2%

rechnen können. Ebenso gibt es unter diesen Betrieben weniger Betriebe, welche hohe Energiekostenanteil (>5%) aufweisen. Betriebe, welche *Automatisierung und Steuerung der internen Logistik* hingegen sind seltener in der Gruppe mit hohen Energiekostenanteilen anzutreffen.

Auch unter Berücksichtigung weiterer Strukturparameter bleibt der Einfluss der Nutzung einzelner Technologien auf die Chance, dass ein Betrieb geringe bzw. hohe Energiekostenanteile aufweist-statistisch (fast) ohne Bedeutung. Bei gleichzeitiger Berücksichtigung aller sieben Technologien wird zudem deutlich, dass der Technologieeinsatz zwar in der Differenzierung von geringen vs. mittleren oder hohen Energiekostenanteilen eine Rolle spielt. Diesen multivariaten Analysen zufolge ist die *Digitalisierung der Anweisungen am Arbeitsplatz* oder die *Automatisierung und Steuerung der internen Logistik* mit der Chance, dass der Betriebe nur einen geringen Energiekostenanteil tragen muss, positiv korreliert. Der Einsatz eines Echtzeit-nahen Produktionsleitsystems hingegen ist eher mit mittleren Energiekostenanteilen verbunden. Für die Differenzierung von hohen vs. geringen oder mittleren Energiekostenanteilen hingegen liefert die Berücksichtigung der Technologien keinen Erklärungsbeitrag. Bei einer Kontrolle struktureller Merkmale sind beobachtet kleinere Unterschiede zwischen Technologienutzern und Nicht-Nutzern statistisch nicht belastbar.

Vor dem Hintergrund dieser Befunde kann also festgehalten werden, dass die I4.0-Readiness keinen relevanten Einfluss auf die Höhe des Anteils der Energiekosten hat. Weder geben Betriebe mit hoher I4.0-Readiness bei Kontrolle relevanter Strukturparameter einen größeren Anteil des Umsatzes für die Deckung ihrer Energiekosten aus, noch können diese Betriebe eine systematische Reduktion der relativen Energiekostenanteile erzielen. Aus der Perspektive der Energiekosten lässt sich keine Wechselwirkung zwischen relativem Energieverbrauch und I4.0-Readiness feststellen. Eine höhere I4.0-Readiness trägt weder zu einer Senkung der Energiekostenanteile (und damit nachhaltigeren Energieressourcenverwendung) bei, noch ist sie ein Treiber erhöhter Energiekosten.

5 Resilienz und I4.0-Readiness

In diesem Kapitel 5 stehen die Bewertung der Resilienz von Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes (Kapitel 5.1) sowie mögliche Risiken im Mittelpunkt (Kapitel 5.2). In Kapitel 5.3 ist dem Zusammenhang von Resilienz und I4.0-Readiness gewidmet. Abschließend bietet Kapitel 5.4 einen Rückblick auf die Vulnerabilität in Bezug auf das Russlandgeschäft.

5.1 Resilienz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes

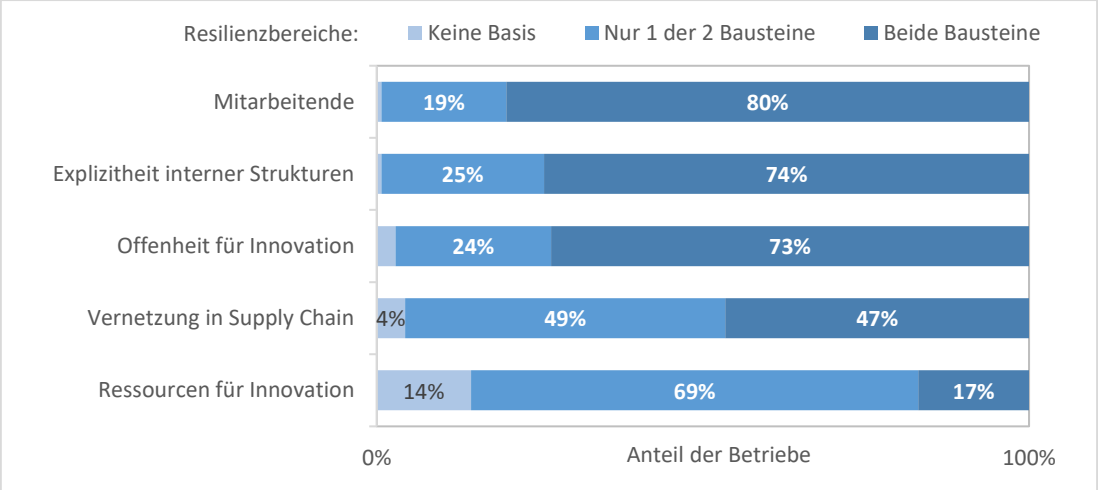
Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über den Resilienz-Index und seine zugrundeliegenden Handlungsbereiche gegeben und die somit beschreibbaren regionalen Unterschiede in der Resilienz der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes dargestellt. Im Anschluss wird die strukturellen Gegebenheiten für die betriebliche Resilienz aus gesamtdeutscher Sicht untersucht.

5.1.1 Bewertung anhand eines Resilienz-Index und regionale Unterschiede

Die Übersicht über die fünf Resilienz relevanten Handlungsbereiche ergibt auf den ersten Blick ein überraschend positives Bild (Abbildung 23).

Erstens, in den meisten Bereichen gibt es nur wenige Betriebe, in welchen diese über keine bzw. kaum Kapazitäten verfügen. Nur im Bereich Ressourcen für Innovation gibt es einen nennenswerten Anteil an Betrieben, die weder über aktuellere Erfahrung mit Produktinnovation verfügen noch einen so großen Überschuss erwirtschaften, der ein schnelles Investieren aufgrund eines überraschend eintretenden gravierenden Änderungsbedarfs möglich erscheinen lassen.

Abbildung 23: Durchschnittliche Resilienz in fünf Resilienz relevanten Handlungsbereichen

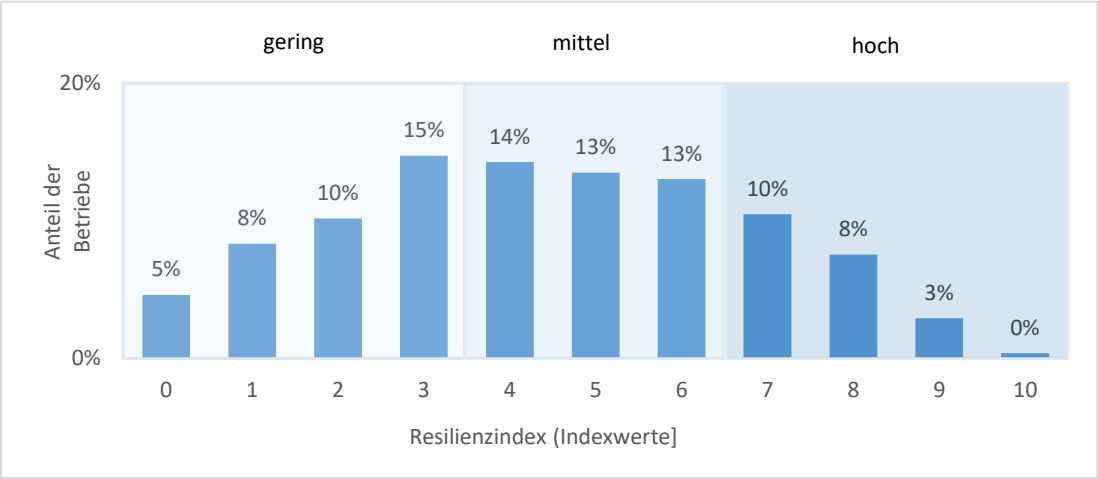


Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Zweitens sind Betriebe bereits in den internen Resilienz-relevanten Handlungsbereichen (Mitarbeitende und Explizitheit der Strukturen) sowie im Handlungsbereich Offenheit für Innovation aktiv. Im Durchschnitt verfügen über drei Viertel der Betriebe über beide Bausteine in den jeweiligen Bereichen. Bei der intensiveren Vernetzung in der Supply Chain wie auch bei den Ressourcen sind dies deutlich weniger Betriebe. Nur knapp die Hälfte der Unternehmen kooperiert mit Partnern im Bereich Vertrieb und kooperiert zudem mit den Partnern entlang der Wertschöpfungskette zu Innovation.

In der Zusammenfassung der fünf Bereiche wird deutlich, dass diese positiven Einzelbilder etwas trügerisch sind (Abbildung 24). Über ein hohes Resilienzniveau mit einem Indexwert größer als sechs Punkte verfügen nur 21% aller Betriebe. Dabei erreichen nur 3% einen Indexwert über acht Punkte. Im Vergleich dazu verfügen zwei von fünf Betrieben (38%) nur über ein geringes Resilienzniveau. Sie erreichen in der Betrachtung der fünf Handlungsbereiche maximal drei Punkte. Ein vergleichbarer Anteil an Betrieben verfügt über ein mittleres Resilienzniveau (40%). Die Verteilung zeigt, dass Betriebe zwar in verschiedenen Bereichen Resilienz relevante Maßnahmen implementiert haben, jedoch nur eine Minderheit der Betriebe kann dazu in vielen Bereichen auf größere Kapazitäten bauen.

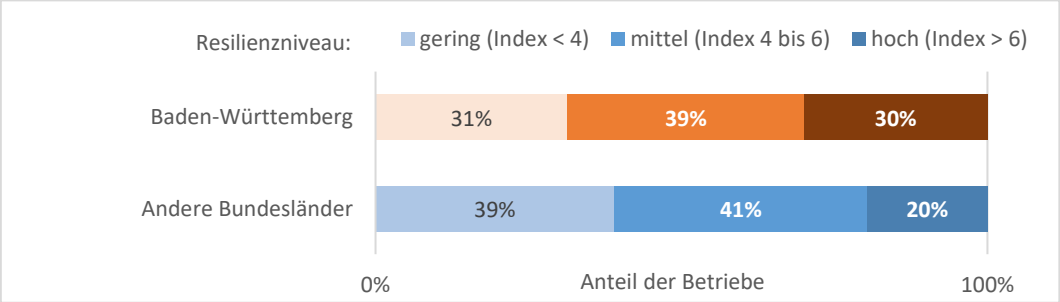
Abbildung 24: Resilienz-Index für das Verarbeitende Gewerbe



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Die sich aus dem Resilienz-Index ergebende dreistufige Kategorisierung ermöglicht einen einfachen regionalen Vergleich der Resilienzniveaus (Abbildung 25).

Abbildung 25: Durchschnittliches Resilienzniveau in Baden-Württemberg und anderen Bundesländern



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Mann-Whitney-U -Tests. Der Resilienz-Index wie auch die Resilienzniveaus unterscheiden sich zwischen beiden Gruppen, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

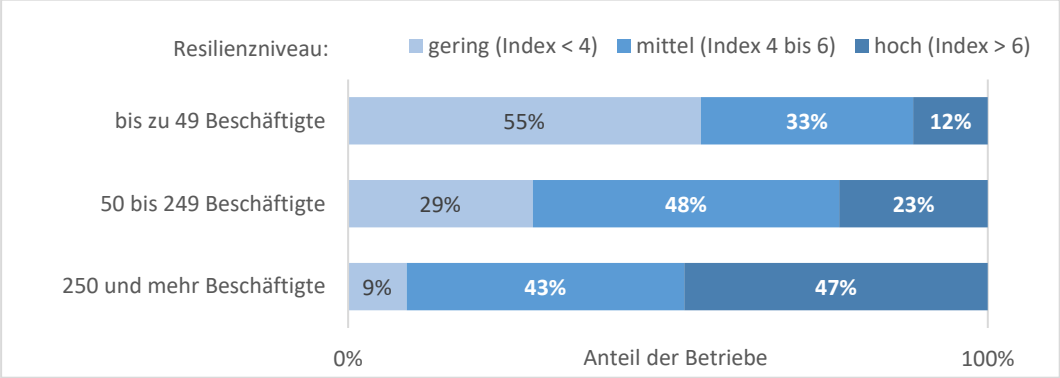
Demnach weisen die Betriebe Baden-Württembergs mit 30% den größten Anteil an hoher Resilienz auf. Gleichzeitig ist der Anteil mit einem geringen Resilienzniveau mit 31% am geringsten. Damit setzt sich diese Region deutlich von den anderen Regionen ab, welche weniger Betriebe mit hoher Resilienz und meist einem größeren Anteil an Betrieben mit geringerer Resilienz beheimaten. Interessanterweise bleibt dieser Vorteil Baden-Württemberger Betriebe auch bei Kontrolle von Betriebsgröße, Branchen, Produktionscharakteristika noch bestehen und auf einem Signifikanz-Niveau

von 10% noch ein Prädiktor für das Resilienzniveau. Die Region ist vor allem für die Differenzierung des hohen Resilienzniveaus von den beiden unteren Levels entscheidend.

5.1.2 Strukturelle Bedingungen der Resilienz

Die Bedeutung struktureller Gegebenheiten für die Resilienz relevanten Handlungsbereiche eines Betriebs zeigt sich bereits bei einem Blick auf den Zusammenhang von Betriebsgröße und Resilienz-Index. Wie in Abbildung 26 deutlich sichtbar, erreicht fast die Hälfte der größeren Betriebe mit mehr als 250 Beschäftigen ein hohes Resilienzniveau. Im Gegensatz dazu erreichen über die Hälfte der kleinen Betriebe mit weniger als 50 Beschäftigten nur ein geringes Resilienzniveau. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle weiterer relevanter Strukturgrößen bleibt dieser Unterschied bestehen. Größere Betriebe sind demnach eher in der Lage, alle fünf Handlungsfelder Resilienz fördernd aufzubauen.

Abbildung 26: Durchschnittliches Resilienzniveau für verschiedene Betriebsgrößenklassen



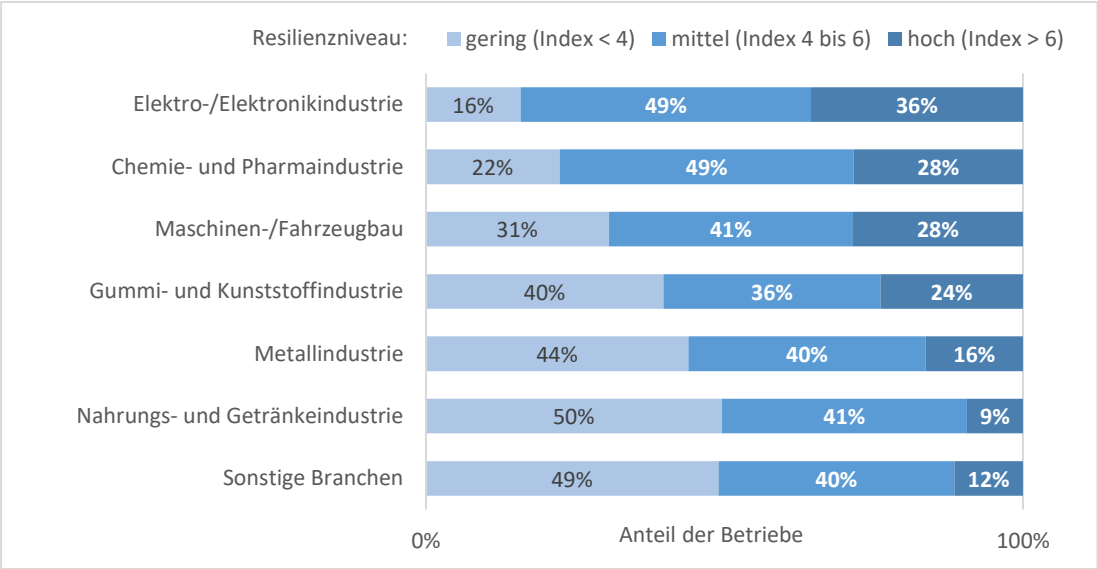
Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Der Resilienz-Index wie auch die Resilienzniveaus unterscheiden sich zwischen den drei Gruppen, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Weniger deutlich fallen die Unterschiede zwischen den verschiedenen Industriebranchen aus, dennoch sind statistisch signifikante Differenzen festzustellen (Abbildung 27). Betriebe der Elektro- und Elektronikbranche erreichen die höchsten Indexwerte beim Resilienz-Index. Ein Drittel dieser Betriebe weist ein hohes und nur 16% weisen eine geringes Resilienzniveau auf. Auch die Chemie- und Pharmaindustrie zeigt im Schnitt hohe Indexwerte, gefolgt von den Betrieben des Maschinen- und Fahrzeugbaus. In allen anderen Branchen fällt der Anteil an Betrieben mit geringem Resilienzniveau deutlich größer aus (31% bis 50%). Die Betriebe der Nahrungs- und Getränkeindustrie erreichen im Durchschnitt die geringsten Indexwerte. In multivariaten Analysen wird deutlich, dass die Branchenzugehörigkeit für die Chance bestimmend ist, kein geringes Resilienzniveau aufzuweisen. Insbesondere die Differenzierung eines hohen Resilienzniveaus ist von diesem Merkmal bestimmt.

Für das Resilienzniveau der Betriebe sind die Produktionsstrukturen ebenfalls entscheidende Faktoren. Die Komplexität des hergestellten Produkts ist direkt mit dem Einsatz Resilienz relevanter Maßnahmen in den Handlungsbereichen verbunden. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle weiterer relevanter Strukturgrößen bleiben diese Unterschiede bestehen. In Abbildung 28 ist dieser Zusammenhang deutlich abzulesen. Während 30% der Hersteller komplexer Produkte ein hohes Resilienzniveau aufweisen und 26% ein geringes Niveau erreichen, sind von den Herstellern einfacher Erzeugnisse nur 11% einem hohen und 58% einem geringen Resilienzniveau zuzuordnen. Im Gegensatz dazu ist die Seriengröße der Produktion wesentlich für die Unterscheidung zwischen den Betrieben mit geringem Resilienzniveau und jenen mit mittlerem und hohen Niveau. Die Hälfte der Einzelfertiger weisen im Schnitt nur ein geringes Resilienzniveau auf, im Gegensatz dazu sind

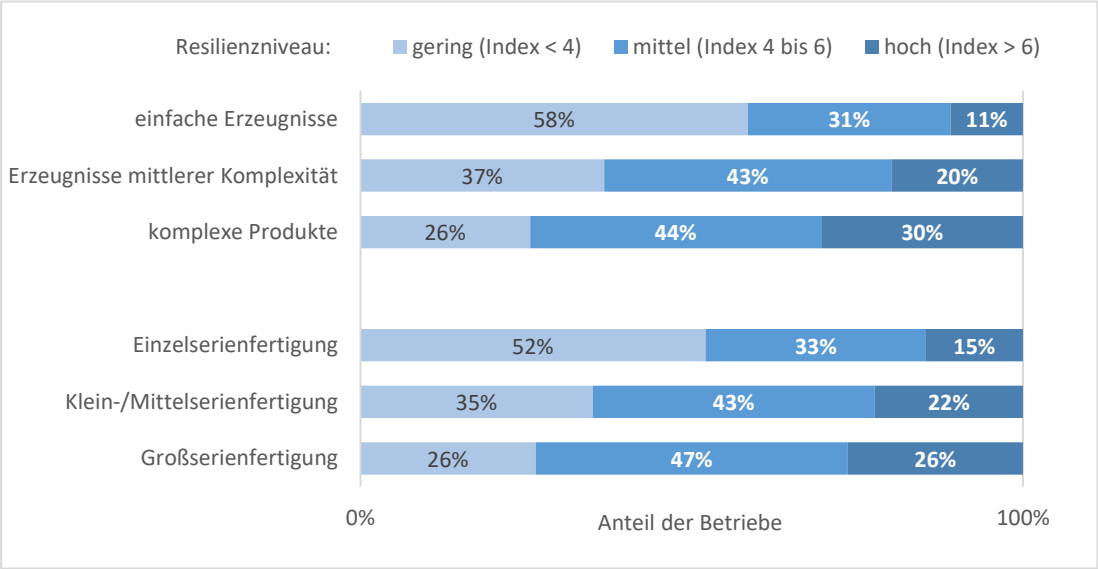
dies nur ein Viertel der Großserienfertiger. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle weiterer relevanter Strukturgrößen bleiben diese Unterschiede bestehen.

Abbildung 27: Durchschnittliches Resilienzniveau in den industriellen Teilsektoren



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Branchenunterschiede bestehen sowohl für den Resilienz-Index wie auch für die Klassifikation der Resilienzniveaus, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Abbildung 28: Durchschnittliches Resilienzniveau nach Produktkomplexität und Seriengröße



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Der Resilienz-Index wie auch die Resilienzniveaus unterscheiden sich jeweils zwischen den drei Gruppen eines Kriteriums, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Deskriptive Besonderheiten für die unterschiedliche Positionierung entlang der Wertschöpfungskette hingegen halten einer multivariaten Betrachtung kaum stand. Daher werden diese Unterschiede hier nicht näher ausgeführt. Bei Zulieferern und Herstellern von Endprodukten für Industriekunden ist zwar ein überdurchschnittlicher Anteil hoher Resilienzwerte festzustellen, jedoch tragen diese Faktoren bei Kontrolle von anderen strukturellen Kriterien nicht zu einer besseren Vorhersage des Resilienzniveaus bei. Bei einer multivariaten Betrachtung bleibt lediglich das Ergebnis

erhalten, dass Betriebe, welche für die Industrie produzieren, im Schnitt unter Kontrolle der weiteren Faktoren eine höhere Resilienz aufweisen. Zur Abgrenzung des niedrigen Resilienzniveaus hingegen trägt diese Unterscheidung nicht bei.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass das Resilienzniveau und die diesem zugrundeliegenden Resilienz stärkenden Maßnahmen in den fünf betrachteten Handlungsfeldern eine starke strukturelle Fundierung haben. Die Chance, dass ein Betrieb ein höheres bzw. niedrigeres Resilienzniveau erreicht, wird (auch) durch Betriebsgröße, Branchenzuordnung, Seriengröße, Komplexität des hergestellten Produkts und Stellung in der Wertschöpfungskette bestimmt. Eine darüberhinausgehende regionale Besonderheit war nicht festzustellen.

5.2 Vulnerabilität der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes

In den vorangegangenen Analysen wurden auf verschiedene Handlungsbereiche zur Analysen der Resilienz von Industrieunternehmen fokussiert. Implizit steht dahinter die Annahme, dass die Widerstandsfähigkeit eines Unternehmens gegenüber Krisensituationen durch generelle Kapazitäten gestärkt werden kann. Interessant ist nun zusätzlich, die Exposition und Vulnerabilität von Industrieunternehmen zu analysieren. Erst ein Störereignis erfordert ja Resilienz von Betrieben.

Die Frage im Folgenden ist daher, inwieweit könnten Betriebe durch spezifische Störereignisse betroffen sein und inwieweit ist dies auf strukturelle Gründe zurückzuführen. Zunächst wird auf drei spezifische potenzielle Risiken eingegangen. Darauf aufbauend wird die allgemeine Vulnerabilität anhand struktureller Kriterien näher beleuchtet.

5.2.1 Bewertung der Vulnerabilität anhand eines Gesamtindex und regionale Unterschiede

Abbildung 29 bietet einen Überblick über die Exposition von drei spezifischen Risiken. Dies sind eine abrupte Änderung im Energiepreis, die abrupte Reduktion der Nachfrage nach einem spezifischen Produkt sowie die plötzliche Disruption von international aufgestellten Zulieferketten. Für alle drei Risiken ist in der Abbildung direkt der Vergleich in der Exposition zwischen den Betrieben aus Baden-Württemberg und jenen aus anderen Bundesländern dargestellt.

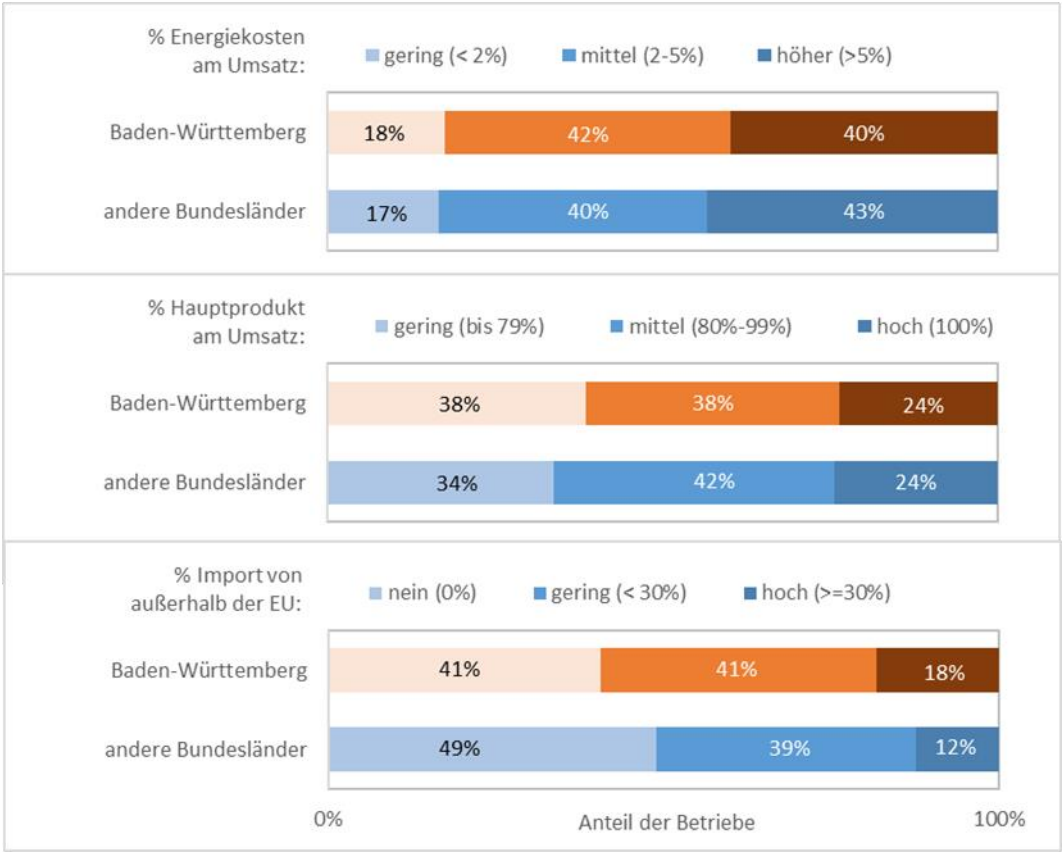
Im Vergleich aller drei potenziellen Störereignisse besteht, erstens, im Bereich Energiekosten das höchste Einzelrisiko. Der Anteil an Betrieben mit einem hohen Risiko liegt bei etwa 40%. Im bundesweiten Durchschnitt betrachtet, müssen etwa zwei von fünf Unternehmen über 5% des Umsatzes für die Energiekosten aufwenden. Für diese Betriebe wäre eine plötzliche Preisexplosion deutlich schwieriger zu kompensieren als für die knapp 20% der Betriebe, welche weniger als 2% ihres Umsatzes für Energie ausgeben müssen. Eine regionale Besonderheit für Baden-Württemberg ist dabei nicht zu beobachten.

Zweitens werden auch für die von einer Marktdisruption ausgehenden Gefahr keine regionalen Unterschiede sichtbar. Im Schnitt agieren knapp ein Viertel der Betriebe mit ihrer Spezialisierung auf das eine Hauptprodukt auf einem vergleichsweise riskanteren Pfad mit Blick auf dieses Szenario. Im Gegensatz dazu haben drei Viertel der Betriebe zusätzlich zu ihrem (dominanten) Hauptprodukt weitere Angebote am Markt etabliert, mit welchen sie auch Umsätze erzielen. Dies lässt es möglich erscheinen, eine sie spezifisch treffende Marktdisruption eher bewältigen zu können, alternative Marktzugänge ausweiten und alternative Produkte anbieten zu können.

Als drittes Einzelrisiko wird die Vulnerabilität gegenüber einer globalen Störung in der Wertschöpfungskette betrachtet. Im Durchschnitt – dem definierten Kriterium folgend – besteht für 13% der Betriebe ein erhöhtes Risiko. Wie aus Abbildung 29 zu ersehen ist, besteht mit 18% der Betriebe aus Baden-Württemberg eine größere Vulnerabilität im Land als in den anderen Bundesländern. In

diesen überschreiten im Schnitt nur 12% der Betriebe den Schwellenwert von einem 30% Importanteil an Vorleistungen von außerhalb der EU. Im Vergleich erweist sich dieser Unterschied als statistisch signifikant. D.h. im Schnitt werden in der Industrie Baden-Württembergs mehr Vorleistungen aus dem weiteren internationalen Raum verwendet. Diese Besonderheit ist allerdings nicht auf eine größere Regionalität der anderen Betriebe zurückzuführen, denn die Importquote der Betriebe anderer Bundesländer ist vergleichbar hoch. Jedoch kommen diese Vorleistungen dann zu einem größeren Anteil aus dem europäischen Ausland.

Abbildung 29: Vulnerabilität der Betriebe aus Baden-Württemberg und anderen Bundesländern entlang drei verschiedener Risiken

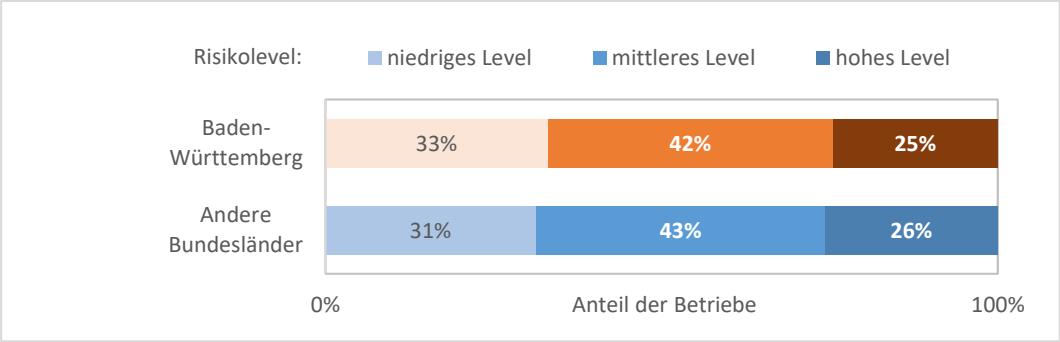


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Mann-Whitney-U-Tests. ** Das spezifische Risikoniveau unterscheidet sich zwischen beiden Gruppen, bei einem Signifikanzniveau p<0,05.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Weiterführende Analysen zeigen, dass die Risiken nur in losem Zusammenhang stehen. So korreliert das Risikoniveau bzgl. des Marktanteils nur sehr wenig (Kendall-Tau-b 0,062, p< 0,1) mit dem Risikoniveau bzgl. der Energiekosten. Zudem ist es sogar negativ korreliert mit dem Risiko einer zu weiten globalen Vernetzung (Kendall-Tau-b -0,098, p< 0,001). Das bedeutet, dass Betriebe, die über 30% ihrer Vorleistungen aus dem weltweiten Ausland erhalten, eher seltener nur mit dem einen Hauptprodukt am Markt sind bzw. jene Betriebe, welche ihren Umsatz zu 100% mit dem einen Hauptprodukt erzielen, importieren seltener Vorleistungen aus fernen Ländern. Ebenso ist das Risiko der globalen Vernetzung negativ mit dem Energiekosten induziertem Risiko korreliert (Kendall-Tau-b -0,127, p< 0,001). Betriebe, welche stärker global Vorleistungen einkaufen, müssen eher weniger Geld in die notwendigen Energiekosten investieren. Anders ausgedrückt nutzen Betriebe mit einem hohen Energiekostenanteil eher Vorleistungen aus dem nahen Ausland, Betriebe mit einem durchschnittlich niedrigen Energiekostenanteil setzen häufiger auf Importe aus dem fernen Ausland.

Die Kombination der drei potenziellen Risiken ermöglicht für jeden Betrieb eine allgemeinere Bewertung der Vulnerabilität anhand eines Risiko-Index. Die durchschnittliche Verteilung der Betriebe aus Baden-Württemberg im Vergleich zu den Betrieben aus den anderen Bundesländern auf die drei Risikolevel ist in Abbildung 30 dargestellt. In dieser Gesamtbetrachtung sind kaum noch Unterschiede festzustellen. Im Durchschnitt über alle Betriebe weisen 33% Baden-Württemberger ein niedriges Risikoniveau und ein Viertel ein hohes Risikolevel auf, während die Betriebe in den anderen Bundesländern sich mit 31% bzw. 26% auf diese beiden Kategorien verteilen. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle der anderen Strukturgrößen sind keine Unterschiede in der Vulnerabilität der Betriebe Baden-Württembergs und anderer Bundesländer festzustellen.

Abbildung 30: Durchschnittliches Risikolevel für Betriebe aus Baden-Württemberg und anderen Bundesländern

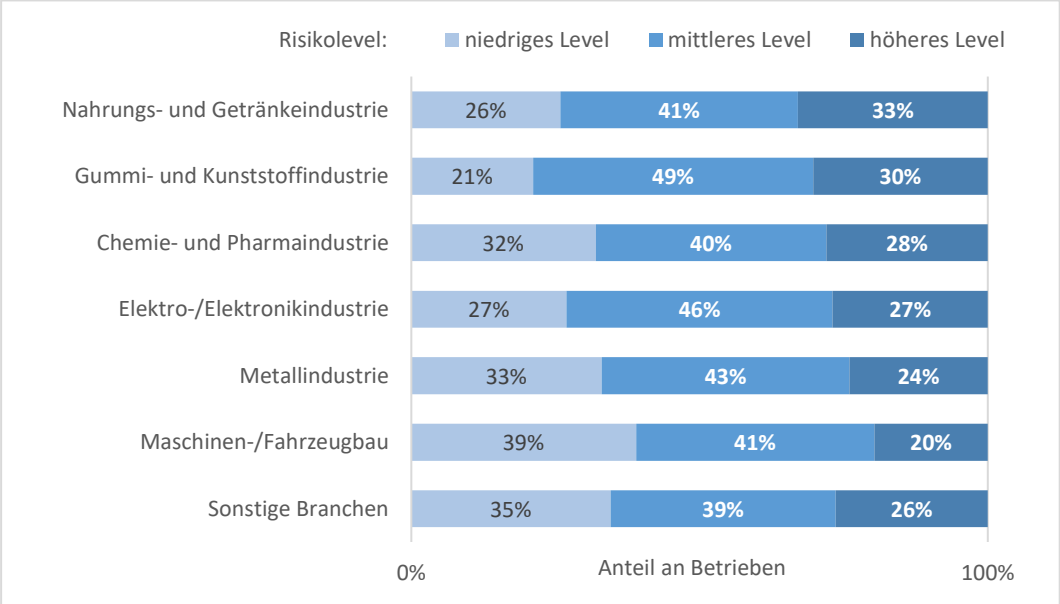


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Mann-Whitney-U-Tests. Kein statistisch signifikanter Unterschied.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

5.2.2 Strukturelle Bedingungen von Risiken

Mit Blick auf strukturelle Merkmale sind wenig klare Zusammenhänge in der Betrachtung des allgemeinen Risikos relevant. So sind zwischen den Branchen nur wenig Unterschiede in der Vulnerabilität zu verzeichnen, wie Abbildung 31 sichtbar macht. Einzig für die Gummi- und Kunststoffindustrie ist ein generell tendenziell höheres Risikoniveau festzustellen. Dies zeigt sich deutlich in dem mit 21% geringem Anteil an Betrieben mit einem geringeren Risikoniveau. Bei Kontrolle von anderen strukturellen Faktoren trägt die Angabe der Branche nicht zu einer besseren Vorhersage bei.

Abbildung 31: Durchschnittliches Risikolevel für Betriebe verschiedener Industriebranchen

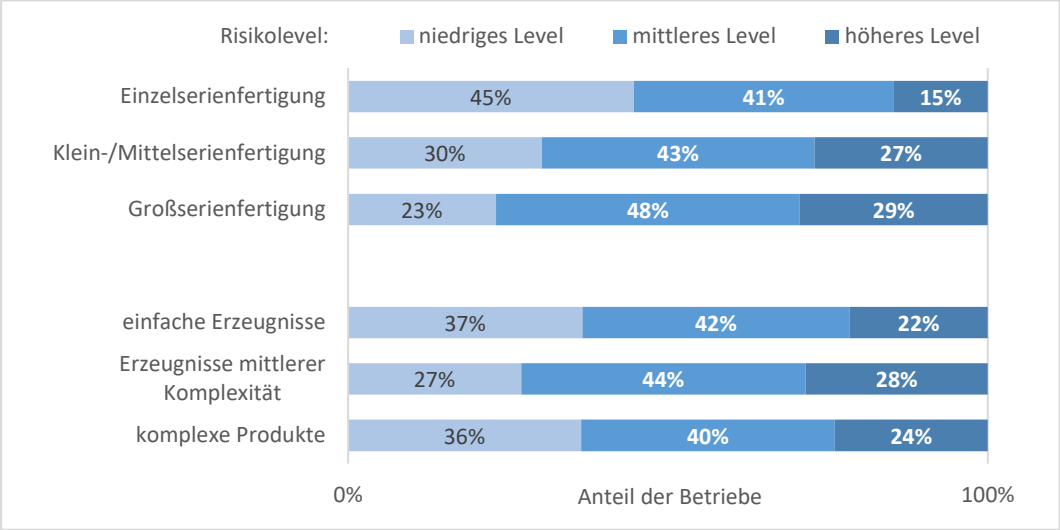


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Das Risikolevel unterscheidet sich zwischen den Branchen, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Vergleichbar bestehen auch zwischen Betrieben unterschiedlicher Betriebsgrößenklassen keine relevanten Unterschiede im allgemeinen Risikoniveau. Zwar ist für die Gruppe der größeren Betriebe mit 250 oder mehr Beschäftigten ein durchschnittlich leicht höherer Anteil (32%) mit hohem Risikoniveau festzustellen im Vergleich zu den Anteilen unter den kleineren Betrieben (26% bzw. 24%). Jedoch lassen statistische Gruppenvergleiche nicht den Schluss zu, dass dies mehr als zufällig ist. Auch in der multivariaten Betrachtung wird deutlich, dass die Betriebsgröße insgesamt für das Risikoniveau keine Erklärung bietet. Auf einem 10% Signifikanzniveau ergibt die Schätzung der Erklärung eines niedrigen Risikoniveaus im Gegensatz zu einem mittleren oder höheren Niveau, dass mit steigender Betriebsgröße die Chance eines niedrigen Risikoniveaus leicht geringer ausfällt.

Im Gegensatz dazu sind die Unterschiede entlang der Produktionsstrukturmerkmale statistisch signifikant, d.h. die Produktionsstruktur ist ein Einflussfaktor für die Vulnerabilität gemessen am Risiko-Index eines Betriebs. Wie in Abbildung 32 zu sehen ist, sind 45% der Betriebe mit Einzelserienfertigung einem geringen Risikoniveau zugeordnet, bei Großserienfertigern liegt dieser Anteil bei nur 23%. Folgerichtig ist der Anteil mit einem hohen Risikoniveau mit 15% sehr gering unter Einzelserienfertigern im Gegensatz zu 29% unter den Betrieben mit einer Großserienproduktion. In multivariaten Analysen bestätigt sich dieses Bild. Insbesondere das Modell zur Erklärung eines niedrigen Risikoniveaus im Gegensatz zu einem mittleren oder hohen Niveau schätzt eine deutlich höhere Chance eines niedrigen Niveaus für Einzelserienfertiger.

Abbildung 32: Durchschnittliches Risikolevel entlang verschiedener Produktionsmerkmale

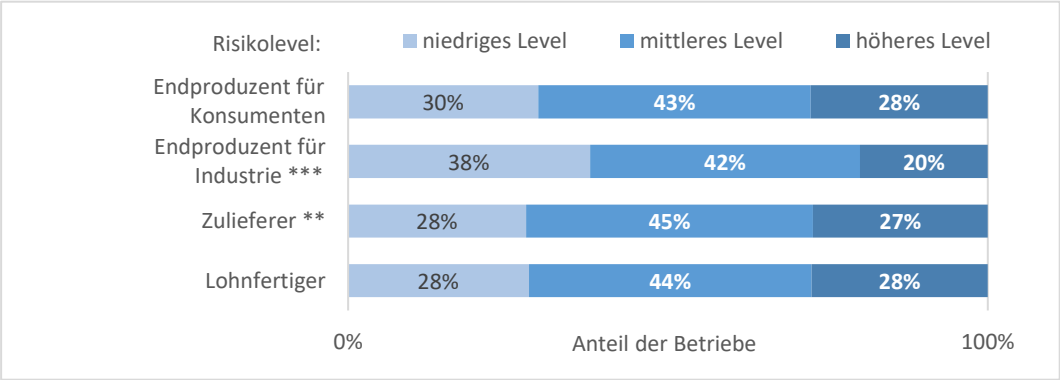


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Das Risikolevel unterscheidet sich jeweils zwischen den drei Gruppen eines Kriteriums, bei einem Signifikanzniveau $p<0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Für die Produktkomplexität ist zwischen den Gruppen ebenfalls ein statistisch belastbarer Unterschied festzustellen, jedoch ist das Bild weniger monoton. Wie die gleiche Abbildung zeigt, ist für Betriebe mit Produkten mittlerer Komplexität der Anteil an einem hohen Risiko mit 28% überdurchschnittlich und der Anteil an einem geringen Risikoniveau mit 27% deutlich unter dem Durchschnitt. Unter den Betrieben mit einfachen Produkten, wie auch Betriebe mit komplexen Produkten, fällt dieser Anteil deutlich größer aus (36% bzw. 37%). In den vertiefenden Analysen zum Risikoniveau der Betriebe wird diese Beobachtung auch unter Kontrolle weiterer Faktoren bestätigt. Die Bedeutung dieses Faktors für die Vorhersage des Risikolevels ist jedoch geringer als der Einfluss der Seriengröße.

Abschließend ist noch zu berichten, dass auch die Stellung in der Wertschöpfungskette das Risikoniveau eines Betriebs mitbestimmt (Abbildung 33). Interessanterweise verzeichnen Betriebe, welche Produkte für andere Industriebetriebe herstellen, einen geringen Anteil (20%) an hohem Risikoniveau auf als Zulieferer (27%), Lohnfertiger (28%) oder Hersteller von Konsumgütern (28%). Der Anteil an Betrieben mit geringem Risikoniveau ist mit 37 bzw. 29% hingegen bei Herstellern für Industrieabnehmer überdurchschnittlich. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle der anderen Strukturgrößen ist festzustellen, dass ein kleinerer Anteil der Betriebe, welche für Industrieabnehmer produzieren, einem hohen Risikolevel ausgesetzt ist.

Abbildung 33: Durchschnittliches Risikolevel entlang der Stellung in der Wertschöpfungskette



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden mittels multipler Mann-Whitney-U-Tests getestet. Das Risikolevel unterscheidet sich jeweils zwischen dem Merkmal und Nichtmerkmal. Statistisch signifikant auf Signifikanzniveau ** p<0,05, *** p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Einbindung in die Wertschöpfungskette und die Produktionscharakteristika eine relevante Rolle für die Bestimmung der Vulnerabilität eines Betriebs spielen. Betriebsgröße und Branchenzuordnung hingegen scheinen keinen nennenswerten Einfluss für ein Gesamtrisiko zu haben. Zu beachten ist dabei jedoch immer, dass eine Bewertung der einzelnen Risiken hinsichtlich struktureller Einflussfaktoren zu anderen Ergebnissen kommen können. Die Aussagen zu einem Gesamtrisiko sind die Folge der verschiedenen Wirkmechanismen.

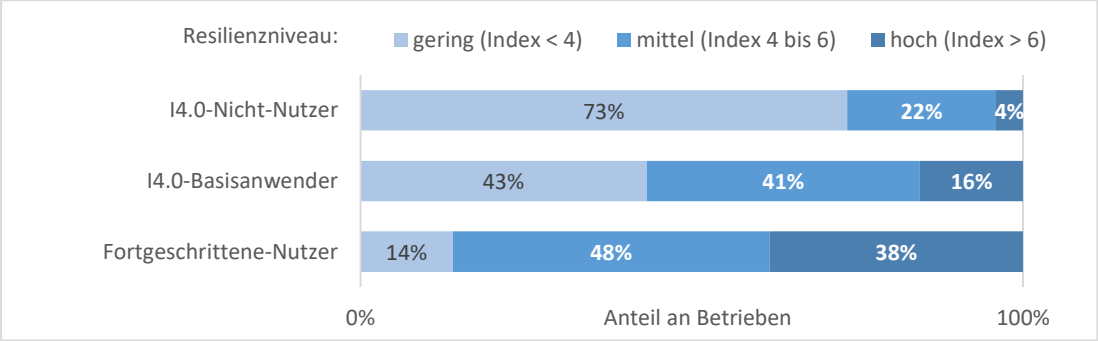
5.3 Resilienz und I4.0-Readiness

Vor dem Hintergrund der dargestellten Strukturanalysen zur Resilienz und Vulnerabilität der Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes kann nun der Zusammenhang zur I4.0-Readiness näher beleuchtet werden.

5.3.1 Perspektive resiliente Handlungsmöglichkeiten und I4.0

Angesichts der berichteten strukturellen Unterschiede im Resilienzniveau ist es nicht überraschend, dass bei Betrieben mit einer hohen I4.0-Readiness auch höhere Resilienzwerte zu beobachten sind. Wie Abbildung 34 zeigt, verfügen 38% aller Betriebe mit einer hohen I4.0-Readiness auch über ein hohes Resilienzniveau. Im Gegensatz dazu weisen 73% der Betriebe ohne jede I4.0-Readiness ein sehr geringes Resilienzniveau auf.

Abbildung 34: Durchschnittliches Resilienzniveau nach I4.0-Readiness



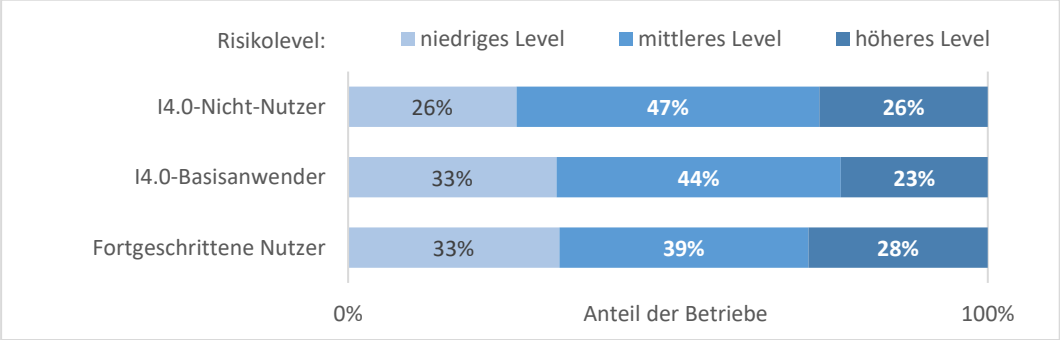
Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Das Risikolevel unterscheidet sich zwischen allen drei I4.0-Hauptgruppen, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Vertiefende Analysen stützen die Schlussfolgerung, dass die I4.0-Readiness einen Einfluss auf das Resilienzniveau hat: Auch unter Kontrolle von Betriebsgröße, Branche, Produktionsmerkmalen und der Stellung in der Wertschöpfungskette ist ein positiver Einfluss der I4.0-Readiness festzustellen. So weisen Betriebe, welche keine der I4.0-relevanten Technologien nutzen, eine 8,4-fache Chance zu einem niedrigen Resilienzniveau auf im Vergleich zu I4.0-Fortgeschrittenen. I4.0-Fortgeschrittene haben zudem eine fast neunfache Chance, ein hohes Resilienzniveau zu erreichen, statt nur einem geringen oder mittleren Niveau. I4-0 Basisanwender haben noch eine 3,8-fach höhere Chance, über ein hohes Resilienzniveau zu verfügen, als Betriebe, die keine der I4.0-relevanten Technologien einsetzen.

5.3.2 Perspektive Vulnerabilität und I4.0

Im Gegensatz zur klaren Verbindung von I4.0-Readiness und dem Resilienzniveau der Betriebe zeigt sich kein spezifischer Zusammenhang zwischen I4.0-Readiness und dem allgemeinen Risikoniveau. Der Anteil an Betrieben ohne jede I4.0-relevante Technologienutzung weist ein hohes Risikoniveau (13%), was vergleichbar ist zum diesem Anteil unter den I4.0-Fortgeschrittenen (16%) (Abbildung 35). Der Grad der Digitalisierung scheint das Risikoniveau in der kombinierten Betrachtung weder relevant zu senken noch relevant zu erhöhen. Auch in einer multivariaten Betrachtung unter Kontrolle der anderen Strukturgrößen ist kein statistisch belastbarer Einfluss festzustellen.

Abbildung 35: Durchschnittliches Risikolevel nach I4.0-Readiness

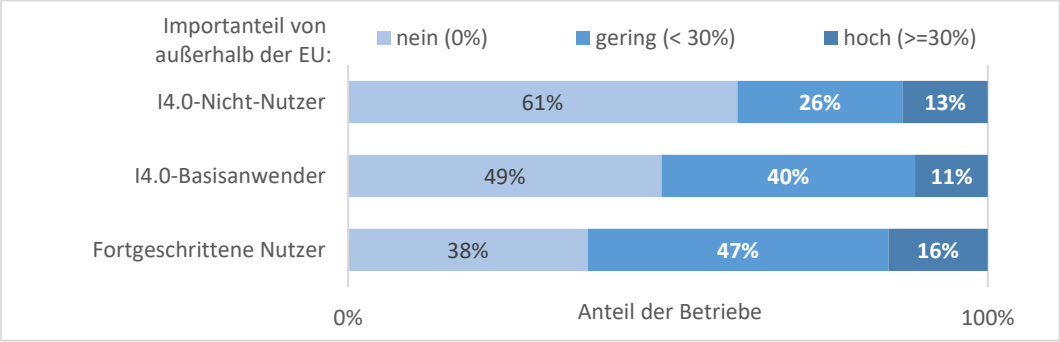


Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Keine statistisch signifikanten Unterschiede.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Angesichts der unterschiedlichen Natur der drei kombinierten Risiken, lohnt es, noch den Zusammenhang von I4.0-Readiness und den einzelnen, spezifischen Vulnerabilitäten zu betrachten. Für alle drei Risikofaktoren wurden bivariate und multivariate Analysen durchgeführt. Hierbei zeigte sich, dass in Bezug auf I4.0-Readiness für das Energierisiko und das Nachfragerisiko kein spezifisches Muster abzulesen ist; auf eine Abbildung wird daher hier verzichtet.

Für das Risiko aufgrund einer weiten globalen Vernetzung hingegen wurde ein spezifisches Muster sichtbar. Wie Abbildung 36 deutlich macht, ist der Anteil an Betrieben ohne jeden Import von außerhalb der EU mit 61% deutlich häufiger bei den Nicht-Nutzern zu finden als bei den Betrieben der I4.0-Readiness in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen. Der Anteil an Betrieben mit einem höheren Risiko ist allerdings für alle drei I4.0-Readiness Gruppen gleichermaßen gering.

Abbildung 36: Durchschnittliches Risikolevel nach I4.0-Readiness



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Tests. Das Risikolevel unterscheidet sich zwischen allen drei I4.0-Hauptgruppen, bei einem Signifikanzniveau p<0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

5.4 Retrospektiver Exkurs: Vulnerabilität durch Russlandgeschäfte

Abschließend wird hier noch als Exkurs die Betroffenheit der Industrie Deutschlands durch die Sanktionen gegenüber Russland im Jahr 2022 untersucht. Die Daten der Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022 ermöglichen einen empirischen Blick zurück auf die Vulnerabilität kurz vor dem Angriff auf die Ukraine. In Tabelle 1 sind zentrale Befunde dazu zusammengefasst, zusätzlich mit der Differenzierung zwischen Baden-Württemberg und den anderen Bundesländern.

Zunächst wird die hohe Vernetzung der Industrie in Deutschland mit dem Ausland deutlich: 87% aller Betriebe des Verarbeitenden Gewerbes importieren einen Teil ihrer Vorleistungen aus dem Ausland und 85% aller Betriebe exportieren einen Teil ihrer Produkte ins Ausland. Dabei bestehen kaum regionale Unterschiede in Bezug auf die Importquote. Hingegen der Anteil exportierender Betriebe in Baden-Württemberg ist mit 90% deutlich höher als in den anderen Bundesländern (84%). Konsequenterweise ist auch der Anteil exportierter Produkte höher. Auch bei Begrenzung auf die exportierenden Betriebe selbst, bleibt dieser Befund. Baden-Württemberger Industrie exportiert in größerem Umfang ins Ausland.

Für den Anteil der Betriebe, die aus Russland importieren oder nach Russland exportieren, ergibt sich ein vergleichbares Bild, allerdings auf deutlich geringerem Niveau. 9% aller Betriebe importierte aus Russland, 16% exportierte nach Russland. Relevante regionale Unterschiede sind hierbei nicht festzustellen. Interessanterweise gab nur ein Betrieb an, ausschließlich auf Importe aus Russland zu bauen, nur 11 Betriebe exportierten ausschließlich nach Russland. Der Angriff auf die Ukraine und die folgenden Sanktionen stellten für diese wenigen Betriebe einen enormen Einschnitt dar. Die anderen Betriebe waren zumindest teilweise betroffen. Jeder elfte Betrieb bei den Vorleistungen, jeder sechste Betrieb beim Absatz. Allerdings relativiert der Blick auf den Umfang von Import und Export dieses Ergebnis deutlich.

Für jene Betriebe, die durch Export oder Import mit Russland verbunden waren, sind drei zentrale Befunde zu berücksichtigen. Zum einen waren diese Betriebe insgesamt sehr stark in den internationalen Austausch eingebunden. Im Durchschnitt importierten sie 50% ihre Vorleistungen und exportierten 58% ihrer Güter. Ihre Handelsbeziehungen bestanden sowohl in der EU als auch weltweit.

Zum anderen wird deutlich, dass im Spiegel der Volumina nur sehr wenige Betriebe in einem größeren Umfang von Importverboten betroffen waren: Der Anteil der Importe aus Russland betrug im Schnitt 8% bzw. die Hälfte dieser Betriebe importierte nur 5% ihrer gesamten Vorleistungen aus Russland. Auf Basis der vorhandenen Daten ist allerdings nicht abschätzbar, inwieweit es sich hierbei um sehr spezifische, seltene Vorleistungen handelte.

Schließlich ergibt sich mit Blick auf die Exportvolumina eine weitere Nuance: Jene Betriebe, die nach Russland exportierten, erzielten nur 5% ihres Umsatzes mit Verkäufen nach Russland. Zwar erzielte jeder sechste Betrieb Umsätze in Russland, jedoch waren dies nur sehr kleine Anteile im Vergleich zum Gesamtumsatz. Eine zentrale Gefährdung ist damit hier nicht zu erkennen.

Tabelle 4: Betriebe mit Import aus und Export nach Russland

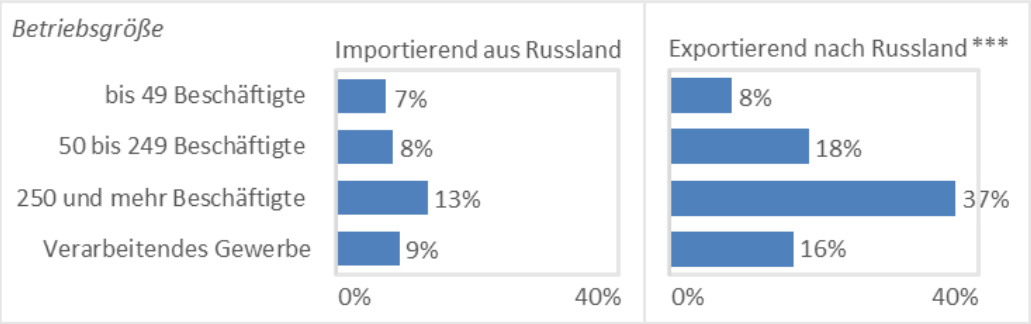
	Baden-Württemberg	anderes Bundesland	Deutschland
Import			
Anteil an importierenden Betrieben	86%	87%	87%
Anteil der importierten Güter an allen Vorleistungen (%)	31,9 (23,5)	31,3 (20,0)	31,4 (20,0)
mit Import aus Russland (2021)	10%	8%	9%
wenn betroffen			
Importanteil (%) (	55,0 (50,0)	48,7 (50,0)	49,9 (50,0)
Anteil Importe aus Russland (%)	7,9 (5,0)	7,7 (5,0)	7,8 (5,0)
Export			
Anteil an exportierenden Betrieben **	90%	84%	85%
Anteil der exportierten Güter, gemessen am Umsatz (%) ***	37,6 (39,0)	30,6 (22,0)	31,9 (25,0)
mit Export nach Russland (2021)	18%	16%	16%
wenn betroffen			
Exportanteil (%)	59,3 (55,5)	57,1 (55.0)	57,5 (55,0)
Anteil Export nach Russland (%)	4,9 (3,0)	5,3 (3,0)	5,2 (3,0)

Anmerkung: Signifikanzniveau * p< 0,1, ** p<0,05, ** p< 0,01. Für Anteile an importierten Vorleistungen bzw. Anteil an exportierten Gütern sind der arithmetische Mittelwert wie auch in Klammern der Median angegeben.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Einige zusätzliche interessante Befunde seien noch berichtet: Ein detaillierterer Blick zeigt, dass vor dem Angriff gegen die Ukraine insbesondere größere Unternehmen in einer Wertschöpfungskette mit Russland eingebunden waren (Abbildung 37). Dies wird daran deutlich, dass ein großer Anteil der Betriebe mit mehr als 250 Beschäftigten (37%) einen Teil ihrer Produkte nach Russland verkaufte, während dies kleinere Betriebe deutlich seltener taten (8%). Für den Anteil aus Russland importierender Betriebe fällt dieser Unterschied weniger stark aus: Zwar kauften größere Betriebe (13%) eher Vorleistungen aus Russland als kleinere Betriebe (7%), der beobachtete Unterschied ist hier statistisch nicht signifikant.

Für Baden-Württemberg ergibt sich vom Grundsatz ein vergleichbares Ergebnis. Gerade der Zusammenhang des Exportierens nach Russland und der Betriebsgröße ist gleich. Für den Anteil der aus Russland importierenden Betriebe aus Baden-Württemberg ist wie auch für das Verarbeitende Gewerbe in Deutschland insgesamt kein systematischer Zusammenhang zur Betriebsgröße festzustellen. Auffällig ist allerdings, dass gerade unter den kleineren Baden-Württemberger Betrieben mit einem Anteil von durchschnittlich 13% erstaunlich viele aus Russland importierten.

Abbildung 37: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt nach Betriebsgrößenklassen



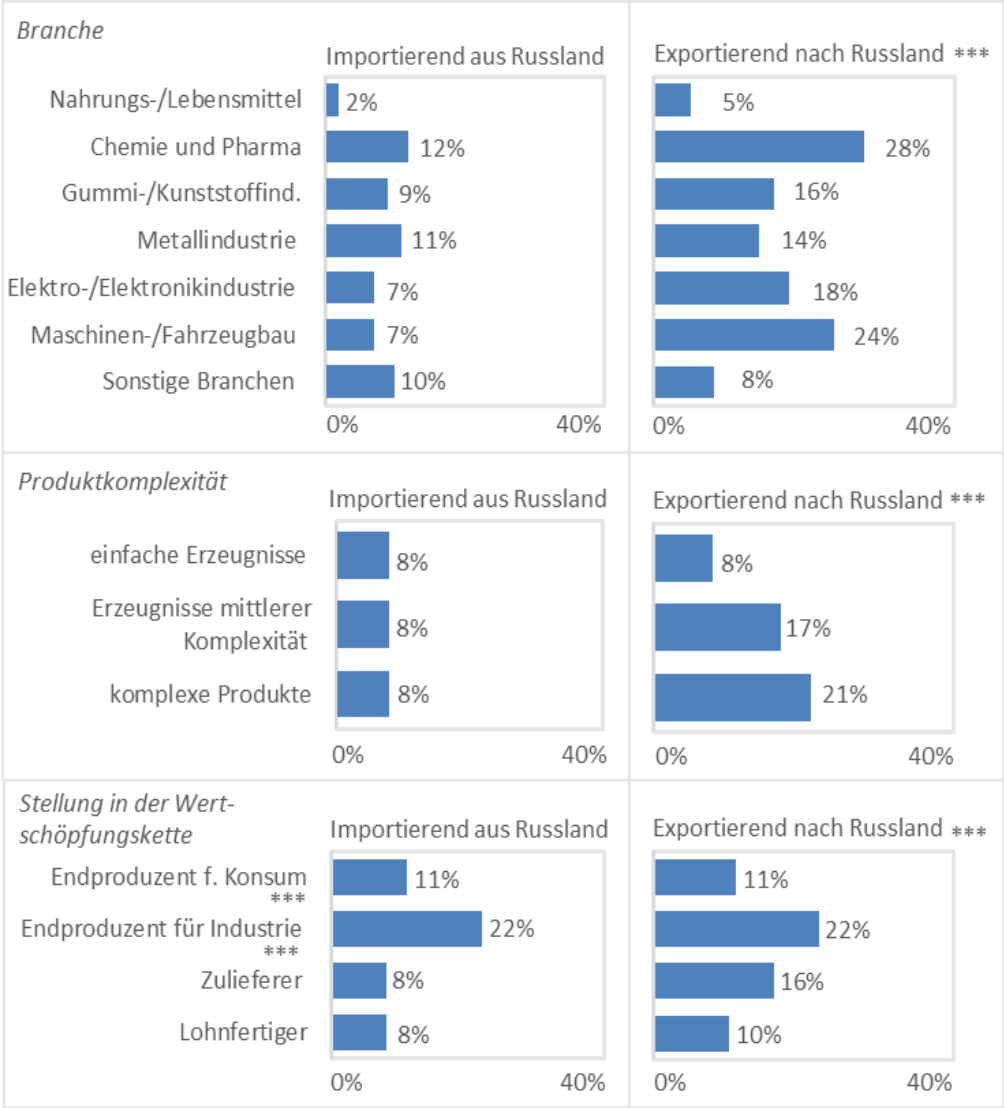
Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. *** Statistisch signifikanter Unterschied Signifikanzniveau p < 0,01.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Der Blick auf die konkreten Industriebranchen (Abbildung 38) zeigt, dass vor allem Betriebe der Chemie- und Pharmaindustrie (28%) sowie des Fahrzeug- und Maschinenbaus (24%) nach Russland exportierten. Über ein Viertel dieser Betriebe hatte Kunden in der Russischen Föderation. Im Gegensatz dazu verkauften nur wenige Betriebe der Nahrungsmittelindustrie an Kunden in Russland (8%). Für die Importquote sind kaum relevante Differenzen festzustellen. Lediglich die Spezifik der Nahrungsmittelindustrie wird hier ebenfalls sichtbar: Nur 2% der Betriebe der Nahrungsmittelindustrie importierte Vorleistungen aus Russland. Alle anderen Branchen weisen eine mehr oder weniger durchschnittliche Importquote zwischen 7% und 12% auf.

Strukturelle Unterschiede in Bezug auf die Exportquote sind auch in den weiteren Analysen festzustellen (Abbildung 38). Insbesondere Produzenten für andere Industriebetriebe verkauften einen Anteil ihrer Produkte in Russland (22%). Dabei verkaufte ein größerer Anteil an Herstellern komplexer Produkte nach Russland (21%) als Hersteller einfacher Produkte (8%). Diese Produkte werden sowohl in Großserie wie auch in Einzelproduktion hergestellt. Im Gegensatz dazu bleibt die Importquote in diesen Vergleichen strukturell unspezifisch: Sowohl einfache als auch komplexe Produkte aus einer Großserienfertigung oder eine Einzelproduktion griffen auf Vorleistungen aus Russland zurück. In Bezug auf die Stellung in der Wertschöpfungskette sind die festzustellenden Unterschiede nur auf einem 10%-Niveau statistisch signifikant. Es deutet sich an, dass Betriebe, welche Endprodukte für andere Industriekunden produzieren, eher Importe aus Russland nutzten als Zulieferer, wenn auch dieser Unterschied nur auf einem 10%-Niveau statistisch signifikant ist.

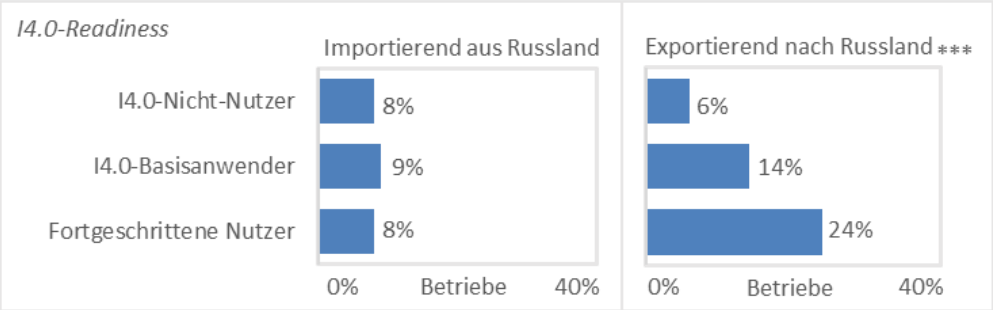
Konsequenterweise besteht deskriptiv kein Zusammenhang zwischen der I4.0-Readiness eines Betriebs und der Wahrscheinlichkeit, dass dieser Betrieb Vorleistungen aus Russland importierte. Dieses Ergebnis bleibt auch unter Kontrolle relevanter Strukturmerkmale unverändert. Hingegen erzielten Betriebe mit einer hohen I4.0-Readiness eher einen Produktabsatz in Russland (24%) als Betriebe mit einer weniger digitalisierten Produktion (6%) (vgl. Abbildung 39). Auch in den multiplen Regressionsanalysen zur Erklärung, ob ein Betrieb Produktabsatz in Russland erzielte oder nicht, liefert die I4.0-Readiness zusätzlich zu Betriebsgröße und Branche einen Erklärungsbeitrag – allerdings nur auf einem Signifikanzniveau von 10%. Deutlich wird, dass für Betriebe mit hoher I4.0-Readiness eine zweifach höhere Chance bestand, nach Russland zu exportieren.

Abbildung 38: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt nach Branchen, Produktkomplexität und Stellung in der Wertschöpfungskette



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. *** Statistisch signifikanter Unterschied Signifikanzniveau $p < 0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

Abbildung 39: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt für I4.0-Readiness-Hauptgruppen



Anmerkung: Gruppenunterschiede wurden getestet mittels Kruskal-Wallis-Quadrat-Tests. *** Statistisch signifikanter Unterschied Signifikanzniveau $p < 0{,}01$.
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022, Fraunhofer ISI.

6 Fazit zur vierten industriellen (r)Evolution

Mit Blick auf die vorangegangenen Kapitel, welche die Entwicklungen der Industrie 4.0 seit 2015 betrachten sowie das Zusammenspiel mit ökologischer Nachhaltigkeit und Resilienz, lässt sich ein Fazit ziehen und die wesentlichen Lessons Learned für Baden-Württemberg ableiten.

Insgesamt zeigt sich, dass die Entwicklung in Richtung Industrie 4.0 in Deutschland seit 2015 kontinuierlich voranschreitet. Dabei lassen sich jedoch zwei unterschiedliche Dynamiken bis ins Jahr 2022 feststellen: So fand zwischen 2015 und 2018 der I4.0-Fortschritt eher in der Breite des Verarbeitenden Gewerbes statt, schwächere Unternehmensgruppen konnten insbesondere Basisanwendungen implementieren und den Schritt in die Transformation zu Industrie 4.0 vornehmen. So konnten sie zu den stärker digitalisierten Unternehmen aufschließen und die digitale Kluft, die noch im Jahr 2015 bestand, teilweise schließen. Seit 2018 findet die digitale Entwicklung jedoch bei einem deutlich geringeren Anteil an Betrieben statt, was insbesondere auf Großunternehmen zutrifft. Diese fokussierten auf die gesamte technologische Breite der I4.0, wodurch es aktuell eine breite Masse an Großbetrieben gibt, die in den verschiedensten Technologiefeldern der I4.0 aktiv ist und diese für ihre Produktion nutzt. Diese Konzentration hat jedoch zur Folge, dass sich der I4.0-Fortschritt von ehemals 12% (2015-2018) auf lediglich 5% (2018-2022) reduziert.

Mit den zwar konstanten, aber vergleichsweise moderaten Wachstumsraten der letzten sieben Jahre fügt sich damit die Entwicklung der I4.0-Readiness in den durchschnittlichen Modernisierungsprozess der Produktion ein. Ein überproportionales Wachstum konnte entlang der I4.0-Technologien bspw. gegenüber anderen Produktionstechnologien nur sehr bedingt festgestellt werden. Folglich lässt sich konstatieren, dass es sich bei den I4.0-Fortgeschrittenen in den letzten Jahren eher um evolutorische Entwicklungen als um revolutionäre Durchbrüche handelt. Der Rückgang in der zweiten Periode lässt sich vermutlich auf die erschwerten Produktions- und Geschäftsbedingungen während der COVID-19-Krise zurückführen, was sicherlich die Investition in neues (digitales) Produktionsequipment gerade bei kleinen und mittleren Betrieben senkte. Ob die digitale Entwicklung in Richtung I4.0 in den kommenden Jahren wieder mehr Fahrt aufnehmen wird oder es bei einem lediglich sehr konzentrierten und relativ langsamen Fortschritt bleiben und ein Wachstum von rund 5% über mehrere Jahre hinweg zum *New Normal* werden wird, bleibt noch abzuwarten.

Für Baden-Württemberg stellen sich diese Entwicklungen der I4.0 in den letzten Jahren grundsätzlich ähnlich dar. Allerdings nimmt der Südwesten nach wie vor die I4.0-Führungsrolle in Deutschland ein und kann einen Vorsprung in der I4.0-Readiness von rund 12% des Indexwerts gegenüber den anderen Regionen in Deutschland aufweisen. Die Stärke des Südwestens ist auf die außergewöhnlich hohe I4.0-Readiness der kleinen Betriebe zurückzuführen, die überdurchschnittlich starken Zulieferer und Industriegüterhersteller sowie auf den in Baden-Württemberg weit verbreiteten Maschinen- und Fahrzeugbau. Die Spitzenposition lässt sich somit zumindest teilweise auch über die industrielle Struktur und den spezifischen Branchenzuschnitt Baden-Württembergs erklären.

Die Schwächen Baden-Württembergs liegen darin, dass in den letzten Jahren vergleichsweise wenige Großunternehmen in die gesamte Technologiebreite der I4.0 investierten. Ebenso auffällig ist, dass Technologien aus dem Bereich der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation im Vergleich zu den anderen Technologiefeldern wenig verbreitet sind. Ein wichtiger Aspekt ist insgesamt der vergleichsweise schwache I4.0-Fortschritt der letzten Jahre. Baden-Württemberg weist mit 15% digitalem Wachstum seit 2015 die zweitschwächste Entwicklung im regionalen Vergleich auf. Infolgedessen konnten insbesondere Bayern und der Westen, die ein um 10 Prozentpunkte höheres Wachstum erzielten, weitgehend zu Baden-Württemberg aufschließen. Folglich sollte der Versuch für die kommenden Jahre darin bestehen, die Nutzerquote von digitalen Technologien zu erhöhen

und somit das I4.0-Wachstum zu stärken. Der relativ größte Nachholbedarf besteht für den Südwesten bei den Großunternehmen, den Konsumgüterherstellern sowie bei der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation.

Dem Einsatz von Industrie 4.0 wird gemeinhin auch ein positiver Zusammenhang zur Nachhaltigkeit und zur Resilienz unterstellt. Bei der ökologischen Nachhaltigkeit zeigt sich jedoch, dass dieser positive Einfluss nicht per se existiert, sondern lediglich auf wenigen einzelnen digitalen Technologien beruht und stark von strukturellen Merkmalen wie Betriebs- und Seriengröße sowie Branche abhängig ist. Die Herausforderung besteht folglich darin, digitale Technologien technisch und organisatorisch so auszugestalten, dass sie die ökologische Nachhaltigkeit von Betrieben unterstützen können. Ökologische Verbesserungen gehen somit nicht grundsätzlich mit der I4.0 einher, sondern müssen zukünftig bei der Entwicklung und Implementierung von I4.0-Technologien viel stärker und explizit mitgedacht werden.

Baden-Württemberg liegt hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit in der Produktion genau im bundesdeutschen Durchschnitt. Insofern bestehen mit Blick auf den CO_2-Ausstoß und den Energieverbrauch der Produktionsbetriebe ebenso Ausbaupotenziale wie in anderen Bundesländern. Baden-Württemberg sollte hier die Chance seiner I4.0-Spitzenposition nutzen und digitale Technologien konkret verstärkt mit nachhaltiger Produktion verknüpfen.

Bei den Fähigkeiten zur Resilienz von Produktionsbetrieben bei Störereignissen zeigt sich hingegen ein direkter Zusammenhang zur I4.0. Eine höhere I4.0-Readiness geht mit stärkeren resilienten Fähigkeiten einher. Dies ist vermutlich auf eine höhere digitale Vernetzung entlang der Supply Chain eines Unternehmens zurückzuführen sowie auf eine verbesserte Informationslage im eigenen Produktionsumfeld. Infolgedessen können Produktionsbetriebe sowohl bei der Früherkennung als auch bei der Behebung von externen Störereignissen bessere Fähigkeiten entwickeln.

Mit Blick auf eine resiliente Produktion ist Baden-Württemberg etwas besser aufgestellt als die anderen Regionen Deutschlands. Dies hat erneut strukturelle Gründe, kann jedoch sicherlich auch auf die I4.0-Spitzenposition Baden-Württembergs zurückzuführen sein. Durch den gezeigten Zusammenhang von I4.0 und Resilienz sollte demnach Baden-Württemberg auch hier diesen Effekt gezielt nutzen und als führender I4.0-Standort den gleichzeitigen Ausbau resilienter Fähigkeiten von Produktionsbetrieben unterstützen.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die I4.0 seit 2015 moderate Fortschritte macht und dabei die ökologische Nachhaltigkeit eher befördert als bremst. Zudem befähigt sie Betriebe, die Resilienz ihrer Produktionssysteme zu erhöhen. Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse stellt die I4.0 und deren konkreten Technologien somit durchaus ein Vehikel dar, um Nachhaltigkeit und Resilienz in der Produktion zukünftig zu stärken. Daraus ergibt sich die Herausforderung, digitale Technologien nicht nur mit Blick auf die I4.0 zu forcieren, sondern diese noch stärker als Lösungs- und Gestaltungsansatz für eine verbesserte ökologische Nachhaltigkeit und den Ausbau resilienter Fähigkeiten zu nutzen. Durch die gezeigten Zusammenhänge von I4.0, Nachhaltigkeit und Resilienz ergeben sich für Baden-Württemberg als führendem I4.0-Standort zusätzliche Potenziale, die zugunsten der Produktionsbetriebe gehoben werden sollten. Zugleich sollte der Südwesten darauf achten, dass die geringen Wachstumsraten der I4.0 in den letzten Jahren, sich zukünftig wieder steigern lassen.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammensetzung des I4.0-Readiness-Index des Fraunhofer ISI 4

Abbildung 2: Operationalisierung der Resilienz 9

Abbildung 3: Operationalisierung der Vulnerabilität mittels eines Risiko-Index 10

Abbildung 4: Entwicklung der I4.0-Readiness im regionalen Vergleich 12

Abbildung 5: Entwicklung der I4.0-Readiness in Baden-Württemberg und anderen Bundesländern im Vergleich 14

Abbildung 6: Entwicklung der I4.0-Readiness nach Betriebsgrößenklassen 16

Abbildung 7: Entwicklung der I4.0-Readiness im Branchenvergleich (im bundesdeutschen Durchschnitt) 18

Abbildung 8: Entwicklung der I4.0-Readiness entlang der Wertschöpfungskette 19

Abbildung 9: Entwicklung der I4.0-Readiness nach Seriengrößen (im bundesdeutschen Durchschnitt) 21

Abbildung 10: I4.0-Readiness Entwicklung nach Produktkomplexität (im bundesdeutschen Durchschnitt) 21

Abbildung 11: I4.0-Readiness-relevante Technologien im Jahresvergleich 22

Abbildung 12: I4.0-Readiness relevante Technologien im Vergleich Baden-Württemberg und andere Bundesländer (2022) 24

Abbildung 13: Regionaler Vergleich der CO_2-Bilanz-Erstellung 26

Abbildung 14: CO_2-Bilanzierung nach Betriebs- und Seriengrößen 27

Abbildung 15: Zusammenspiel CO_2-Bilanzierung und I4.0-Readiness 28

Abbildung 16: Zusammenspiel zwischen CO_2-Bilanzierung und I4.0-Technologien 29

Abbildung 17: Mittelwerte der Energiekostenanteile nach Branchen 30

Abbildung 18: Energiekostengruppen nach Branchen 31

Abbildung 19: Regionaler Vergleich der Energiekostengruppen 32

Abbildung 20: Energiekostengruppen nach Seriengrößen 33

Abbildung 21: Zusammenspiel zwischen Energiekostenanteilen und I4.0-Readiness 33

Abbildung 22: Zusammenspiel zwischen gruppierten Energiekostenanteilen I4.0-Technologien 34

Abbildung 23: Durchschnittliche Resilienz in fünf Resilienz relevanten Handlungsbereichen 36

Abbildung 24: Resilienz-Index für das Verarbeitende Gewerbe 37

Abbildung 25: Durchschnittliches Resilienzniveau in Baden-Württemberg und anderen Bundesländern 37

Abbildung 26: Durchschnittliches Resilienzniveau für verschiedene Betriebsgrößenklassen 38

Abbildung 27: Durchschnittliches Resilienzniveau in den industriellen Teilsektoren 39
Abbildung 28: Durchschnittliches Resilienzniveau nach Produktkomplexität und Seriengröße 39
Abbildung 29: Vulnerabilität der Betriebe aus Baden-Württemberg und anderen Bundesländern entlang drei verschiedener Risiken 41
Abbildung 30: Durchschnittliches Risikolevel für Betriebe aus Baden-Württemberg und anderen Bundesländern 42
Abbildung 31: Durchschnittliches Risikolevel für Betriebe verschiedener Industriebranchen 43
Abbildung 32: Durchschnittliches Risikolevel entlang verschiedener Produktionsmerkmale 44
Abbildung 33: Durchschnittliches Risikolevel entlang der Stellung in der Wertschöpfungskette 45
Abbildung 34: Durchschnittliches Resilienzniveau nach I4.0-Readiness 45
Abbildung 35: Durchschnittliches Risikolevel nach I4.0-Readiness 46
Abbildung 36: Durchschnittliches Risikolevel nach I4.0-Readiness 47
Abbildung 37: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt nach Betriebsgrößenklassen 49
Abbildung 38: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt nach Branchen, Produktkomplexität und Stellung in der Wertschöpfungskette 50
Abbildung 39: Anteil aus/nach Russland importierender und exportierender Betriebe getrennt für I4.0-Readiness-Hauptgruppen 51

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fallzahlen für Zeitvergleiche (Verarbeitenden Gewerbe) 3
Tabelle 2: Basisindikatoren zum Resilienz-Index (Anteil an Betrieben mit Merkmal) 8
Tabelle 3: Verteilung der CO_2-Bilanzen im Verarbeitenden Gewerbe 25
Tabelle 4: Betriebe mit Import aus und Export nach Russland 48

9 Literatur

Burritt, R. L.; Schaltegger, S. (2010): Sustainability accounting and reporting: fad or trend? In: Accounting, Auditing & Accountability Journal, 23 (7), S. 829–846. https://doi.org/10.1108/09513571011080144.

Duchek, S. (2020): Organizational resilience: a capability-based conceptualization. In: Business Research, 13 (1), S. 215–246. https://doi.org/10.1007/s40685-019-0085-7.

IHK München (2023): Nachhaltigkeitsberichterstattung CSRD: Was gilt wann für wen? Online verfügbar unter https://www.ihk-muenchen.de/de/Service/Nachhaltigkeit-CSR/Nachhaltigkeitsberichterstattung/.

Jäger, A.; Maloca, S. (2022.): Dokumentation der Umfrage Modernisierung der Produktion 2022,. Karlsruhe.

Lerch, C.; Jäger, A. (2020): Industrie 4.0 quo vadis? Neuere Entwicklungen der vierten industriellen Revolution im Verarbeitenden Gewerbe. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://doi.org/244154.

Lerch, C.; Jäger, A.; Maloca, S. (2017): Wie digital ist Deutschlands Industrie wirklich? Arbeit und Produktivität in der digitalen Produktion. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. https://doi.org/172769.

Lerch, C.; Jäger, A.; Meyer, N. (2016): I4.0-Readiness – Baden-Württemberg auf dem Weg zur Industrie 4.0? Karlsruhe. Online verfügbar unter https://www.i40-bw.de/wp-content/uploads/Studie_I4.0_Readiness_Fh_ISI_publiziert.pdf.

Seville, E. (2017): Resilient organizations. How to survive, thrive and create opportunities through crisis and change. London: Kogan Page. ISBN: 9780749478551.