



Industrie 4.0 in Baden-Württemberg

(r)Evolution im Kontext von Nachhaltigkeit und Resilienz

- Kurzfassung -

Ort: Stuttgart, Karlsruhe

Datum: Dezember 2023

Impressum

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

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.jaeger@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: 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

Einleitung	1
Entwicklung und Dynamik der Industrie 4.0 von 2015 bis 2022.....	1
Baden-Württembergs Führungsrolle bei der Industrie 4.0.....	5
Industrie 4.0 und ökologische Nachhaltigkeit	6
Industrie 4.0 und die Fähigkeit zur Resilienz.....	8
Fazit zur vierten industriellen (r)Evolution	9
Literatur	11
Anhang	12

Einleitung

Der Begriff der Industrie 4.0 beschreibt seit 2011 eine zentrale Vision für produzierende Unternehmen und das Verarbeitende Gewerbe. Wie kaum eine andere Region verbindet Baden-Württemberg als führender Industriestandort in Europa solch weitreichende Chancen, jedoch auch Herausforderungen, mit dieser Entwicklung. Die Industrie 4.0 beschreibt ein neues Produktionsparadigma, welches auf cyber-physischen Systemen und dem Internet of Things (IoT) basiert. Technische Grundlage bildet die digitale Vernetzung von Produktionssystemen innerhalb von Betrieben, aber auch über Unternehmensgrenzen hinweg.

Um die Entwicklung der Industrie 4.0 im gesamten Verarbeitenden Gewerbe und insbesondere auch in Baden-Württemberg empirisch analysieren und daraus Schlussfolgerungen für Politik und Wirtschaft ziehen zu können, wurde im Jahr 2015 vom Fraunhofer ISI ein I4.0-Index entwickelt.¹ Dieser enthält sieben zentrale digitale Technologien der I4.0 und ist in der Lage, den aktuellen Stand und den Fortschritt der Digitalisierung in der Produktion nach Regionen, Bundesländern und Branchen, aber auch nach verschiedenen Betriebs- und Produktionscharakteristika darzustellen.² Hieraus sind mehrere Veröffentlichungen entstanden, welche die I4.0 aus verschiedenen Perspektiven betrachten und empirisch analysieren.³

Jenseits der vierten industriellen Revolution existieren weitere globale Trends, die sich direkt auf die Produktion auswirken. Dies ist einerseits der Klimawandel, welcher die Notwendigkeit einer ressourcenschonenden und zugleich CO₂-armen Produktion erweckt. Andererseits hat die COVID-19-Krise den Bedarf

einer resilienten Produktion geschaffen, die auf unvorhersehbare Störereignisse vorbereitet ist. Die vorliegende Studie nimmt daher nicht nur die Entwicklungen der I4.0 von 2015-2022 in den Blick, sondern betrachtet auch deren Zusammenspiel zur ökologischen Nachhaltigkeit und zur Resilienz von Produktionssystemen.

Methodische Grundlage dieser Studie bildet erneut die repräsentative Industriebefragung *Modernisierung der Produktion* des Fraunhofer ISI. Für die Betrachtung der Veränderungen und das Zusammenspiel der verschiedenen Entwicklungen werden die Ergebnisse der Erhebungswellen von 2015, 2018 und 2022 genutzt. Diese Befragung ist auch die Grundlage der bisherigen Studien zum I4.0-Index und enthält die hierfür notwendigen digitalen Produktionstechnologien. Eine ausführliche Beschreibung dieser Befragung findet sich unter unten stehendem Link.⁴

Entwicklung und Dynamik der Industrie 4.0 von 2015 bis 2022

Der I4.0-Indexwert liegt im Jahr 2022 deutschlandweit bei 2,2⁵ (Min: 0; Max: 5). Mit Blick auf den Indexwert der Jahre 2018 (Indexwert: 2,1) und 2015 (Indexwert: 1,8) wird bereits deutlich, dass sich der Fortschritt seit 2018 im Vergleich zum Zeitraum 2015-2018 deutlich verlangsamt hat. Während der digitale Fortschritt im ersten Beobachtungszeitraum (2015-2018) noch bei 12% lag, liegt er im zweiten Zeitraum (2018-2022) bei lediglich 5%. Die Gründe für diese Verlangsamung sind auf unterschiedliche Dynamiken innerhalb der beiden Zeiträume zurückzuführen: So konnten in den Jahren 2015-2018 insbesondere die kleinen Betriebe bei der Digitalisierung ihrer Produktion deutlich gegenüber den Großunternehmen aufholen. Weiterhin

¹ Eine Ausführliche Beschreibung des I4.0 Indexes findet sich bspw. in Lerch/Jäger 2020 bzw. Lerch et al. 2017.

² Vgl. Lerch et al. 2016.

³ <https://www.i40-bw.de/studien/>

⁴ <https://www.isi.fraunhofer.de/de/themen/wertschoepfung/erhebung-modernisierung-produktion.html#1>

⁵ Gerundet auf eine Nachkommastelle

waren es in diesem Zeitraum vormals schwächere Unternehmensgruppen, die sich stärker digitalisierten. Dadurch ist der Zeitraum zwischen 2015 und 2018 größtenteils von einem Einstieg einer breiten Masse an Betrieben in I4.0-Basisanwendungen geprägt, wodurch der digitale Fortschritt in die Breite getragen wurde. Die Entwicklung 2018-2022 stellt sich jedoch genau gegenläufig dar. Während sich die kleinen und mittelgroßen Betriebe (KMU) kaum verbessern konnten, waren es insbesondere Großbetriebe, die verstärkt auf digitale Spitzenanwendungen setzten und in ihrer Produktion einführten. Der digitale Fortschritt fällt somit für den Zeitraum 2018-2022 für das Verarbeitende Gewerbe insgesamt relativ gering aus, da sich dieser insbesondere auf wenige Großbetriebe konzentriert.

Diese insgesamt schwächere Entwicklung seit 2018 ist vermutlich auf die COVID-19-Krise, mit einhergehenden Einschränkungen bei der Produktions- und Geschäftstätigkeit zurückzuführen. Durch schwächere Umsatzentwicklungen zeigten sich sicherlich gerade KMU weniger investitionsfreudig, was einen geringeren Modernisierungsgrad des Produktions equipments zur Folge hatte. Vermutlich konnten Großunternehmen aufgrund ihrer besseren Ressourcenausstattung die Folgen der Lock-Downs besser überwinden und der Digitalisierung auch während der Krise eine höhere Aufmerksamkeit schenken.

Weitere Erkenntnisse zum I4.0-Fortschritt über die beiden Beobachtungszeiträume sind auch entlang der Branchen des Verarbeitenden Gewerbes auszumachen (vgl. Abb. 12, im Anhang). Während im Jahr 2015 eine große Bandbreite hinsichtlich der I4.0-Readiness vorlag (Elektroindustrie: 2,2; Nahrungs- und Getränkeindustrie: 1,1), verdichtete sich das Feld bis ins Jahr 2018 deutlich. Die führenden Branchen hatten sich kaum verbessert, Nachzügler hingegen konnten aufholen und einen überdurchschnittlich hohen I4.0-Fortschritt

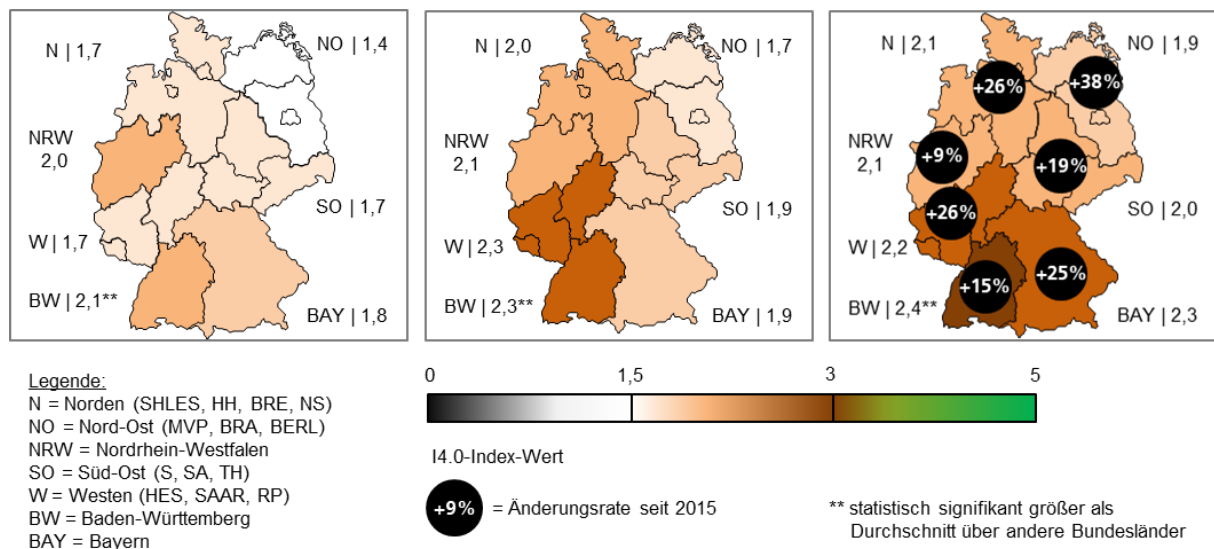
verzeichnen. Zwischen 2018 und 2022 fächerte sich das Feld hingegen weiter auf, da sich in dieser Periode auch führende Branchen verbessern konnten. Die Spanne reicht damit wieder von der Elektroindustrie: 2,5 bis zur Nahrungs- und Getränkeindustrie: 1,8 im Jahr 2022. Insgesamt sind jedoch keine größeren Verschiebungen bei der I4.0-Readiness zwischen den einzelnen Branchen festzustellen. Die Elektroindustrie sowie der Fahrzeug- und Maschinenbau bilden über die Jahre hinweg die Führungsgruppe. Die Chemie- und Pharmaindustrie, die Gummi- und Kunststoffindustrie sowie die Nahrungs- und Getränkeindustrie belegen auch in 2022 weiterhin die untere Hälfte bei der I4.0-Readiness des Verarbeitenden Gewerbes.

Die Spitzenpositionen der Elektroindustrie und des Maschinenbaus lassen sich sicherlich damit erklären, dass diese beiden Branchen die I4.0-Ausrüsterindustrien darstellen, weshalb folglich auch eine Anwendung digitaler Technologien in der eigenen Produktion naheliegt. Auffällig ist zudem, dass die Prozessindustrien eine eher unterdurchschnittliche I4.0-Readiness aufweisen. Dies ist vermutlich auf spezifische Prozessabläufe zurückzuführen, die aufgrund ihrer biologischen, chemischen oder physikalischen Natur aktuell weniger passfähig zu I4.0-Technologien sind, als dies bei Stückgutherstellern der Fall ist.

Grundsätzlich ähnliche Entwicklungen sind auch im regionalen Vergleich der Bundesländer und mit Blick auf Baden-Württemberg festzustellen. Baden-Württemberg ist im Jahr 2022 nach wie vor das führende Bundesland der Industrie 4.0. Der I4.0-Readiness-Indexwert entwickelte sich im Südwesten von 2,1 in 2015 (andere Bundesländer: 1,8⁶), über 2,3 in 2018 (andere BL: 2,0) auf 2,4 im Jahr 2022 (andere BL: 2,1). Baden-Württemberg kann somit seinen Vorsprung von gut 12% gegenüber den anderen Regionen Deutschlands weiter halten und verfügt somit zeitlich gesehen über einen mehrjährigen Vorsprung.

⁶ Der I4.0-Index der anderen Bundesländer weicht hier gegenüber Gesamtdeutschland ab, da Baden-Württemberg bei der vergleichenden Betrachtung nicht berücksichtigt wird.

Abb. 1: Regionale Entwicklung der I4.0-Readiness



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015, 2018, 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Wie sich deutschlandweit zeigt, fällt der digitale Fortschritt in der Produktion in den einzelnen Bundesländern⁷ und Regionen⁸ sehr unterschiedlich aus (Abb. 1). Dieser reicht von 9% Wachstum in den letzten sieben Jahren (Nordrhein-Westfalen) bis hin zu 38% (Nord-osten). Der Vergleich zwischen den drei Zeitpunkten zeigt dabei, dass sich die beiden betrachteten Perioden (2015-2018 und 2018-2022) deutlich unterscheiden: Im ersten Beobachtungszeitraum (2015-2018) konnten insbesondere die vormals schwächeren Regionen aufholen, insbesondere der Westen, der Nordosten sowie der Norden. Baden-Württemberg weist in diesem Zeitraum mit 15% ein eher moderates Wachstum beim I4.0-Fortschritt auf. In der zweiten Periode (2018-2022) ist Bayern das einzige Bundesland, das wesentliche Fortschritte bei der I4.0 erzielen konnte und so durch überproportionales Wachstum etwas zu Baden-Württemberg aufschließt. Insgesamt weist die zweite Periode eine geringere Adaptionodynamik auf.

Bei der Betrachtung der I4.0-Dynamiken entlang verschiedener Betriebsgruppen, ist ein wesentlicher Unterschied zwischen Baden-Württemberg und den anderen Bundesländern insbesondere in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen auszumachen (Abb. 2, nächste Seite).

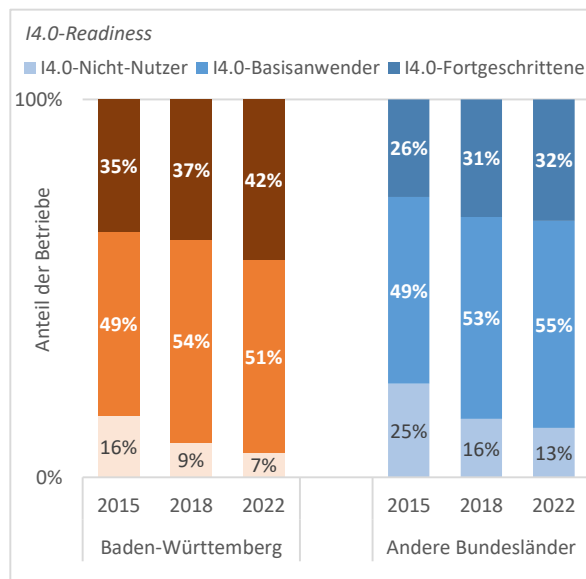
Während der Anteil der I4.0-Basisanwender über die Jahre vergleichbar mit denen der anderen Regionen Deutschlands ist und im Schnitt gut die Hälfte aller Produktionsbetriebe ausmacht, ist der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen über die Jahre hinweg bis zu zehn Prozentpunkte höher und steigert sich in Baden-Württemberg seit 2015 von 35% auf 42%. Entsprechend sinkt auch der Anteil der Nicht-Nutzer in Baden-Württemberg auf ein niedrigeres Level, als in den anderen Bundesländern.

⁷ Um eine Vergleichbarkeit in den Analysen zu gewährleisten, werden Bundesländer mit geringen Fallzahlen zu Regionen zusammengefasst.

⁸ Zusammengefasst werden:
 Nordosten (Berlin, Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern);

Norden (Niedersachsen, Schleswig-Holstein, Hamburg, Bremen);
 Westen (Hessen, Rheinland-Pfalz, Saarland);
 Südosten (Thüringen, Sachsen, Sachsen-Anhalt)

Abb. 2: I4.0-Dynamik im regionalen Vergleich



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015-2022.

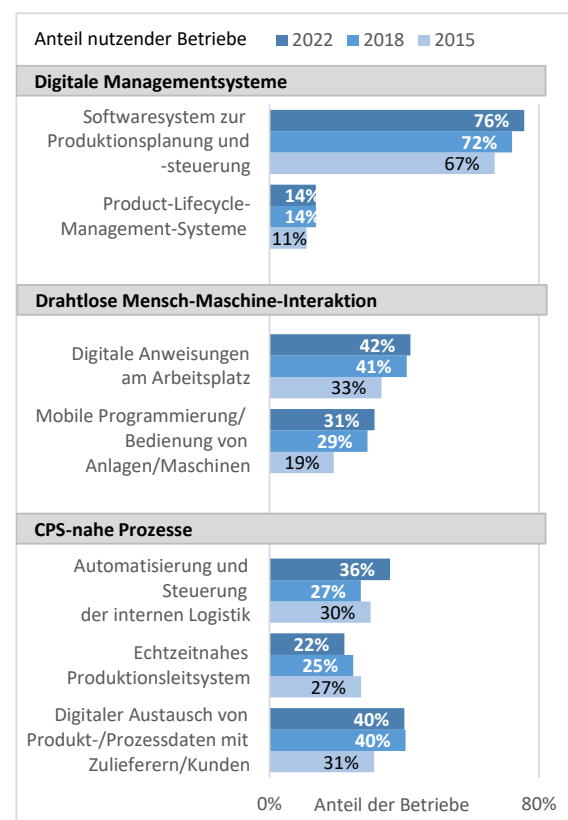
Ein weiterer interessanter Aspekt ist bei der Verschiebung der I4.0-Readiness Gruppen zwischen Baden-Württemberg und den anderen Bundesländern auszumachen: Während in den anderen Bundesländern der Anteil der Basisanwender stetig wächst (2015-2022), ist dieser in Baden-Württemberg im zweiten Beobachtungszeitraum (2018-2022) erstmals gesunken. Dies bedeutet, dass zum ersten Mal mehr Basisanwender zu I4.0-Fortgeschrittenen wurden, als Nicht-Nutzer zu Basisanwendern. Die Hauptbewegung findet im Südwesten also mittlerweile von der Basis in die Spitze statt, während diese in den anderen Regionen nach wie vor von den Nicht-Nutzern zu den Basisanwendern erfolgt. Die Gründe für die größere Gruppe an I4.0-Fortgeschrittenen in Baden-Württemberg werden im nachfolgenden Kapitel näher beleuchtet.

Weitere Unterschiede bei der Entwicklung der I4.0-Readiness sind in den vergangenen Jahren auch entlang der Wertschöpfungskette auszumachen (vgl. Abb. 13, im Anhang). Zulieferbetriebe weisen mit einem kontinuierlichen Zuwachs der I4.0-Fortgeschrittenen von sechs Prozentpunkten die grundsätzlich stärkste Entwicklung seit 2015 auf (40% in 2022). Lohnfertiger und Hersteller von Industriegütern befinden sich mit einem Anteil an I4.0-Fortgeschrittenen von 36% bzw. 32% im

Mittelfeld der I4.0-Aktivitäten. Einen Zuwachs von zehn Prozentpunkten seit 2015 verzeichnen die Hersteller von Konsumgütern, allerdings bleibt der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen Gruppe auch im Jahr 2022 mit 29% unterdurchschnittlich. Somit scheint nach wie vor die Nähe zu Industriekunden förderlich für die eigenen I4.0-Aktivitäten zu sein, während die Herstellung von Produkten für den Konsumentenmarkt einen geringeren Bedarf an I4.0-Technologien weckt.

Um den digitalen Fortschritt besser zu verstehen, lohnt noch ein Blick auf die zeitliche Entwicklung der einzelnen digitalen Produktionstechnologien sowie der drei Technologiefelder, welche die Basis für die Bewertung der I4.0-Readiness bilden (Abb. 3).

Abb. 3: Technologische Entwicklung im Detail



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015-2022.

Technologien der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation weisen die größten Fortschritte hinsichtlich der Verbreitung im Verarbeitenden Gewerbe in den letzten Jahren auf (12 bzw. 9 Prozentpunkte Zuwachs). Moderates Wachstum können mit drei bzw.

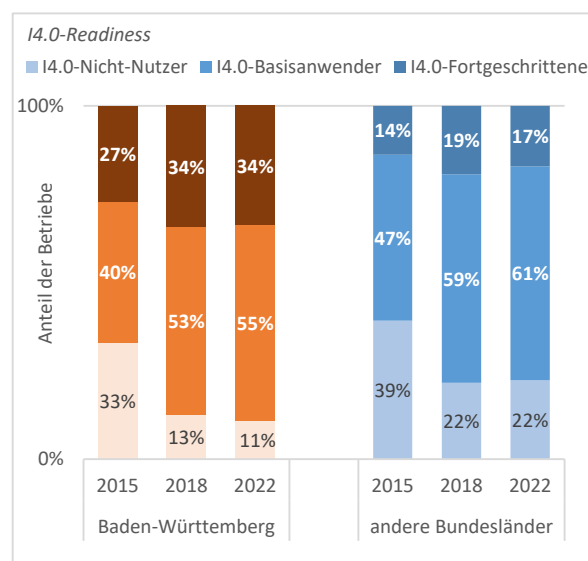
neun Prozentpunkten die Technologien der digitalen Managementsysteme aufweisen. Durchwachsen fällt die Entwicklung bei den cyber-physischen Systemen aus. Hier stehen sechs bzw. neun Prozentpunkte Zuwachs einem Rückgang von fünf Prozentpunkten entgegen. Der Rückgang beim echtzeitnahen Produktionsleitsystem kann möglicherweise durch nicht verlängerte Lizenzen, nicht durchgeführte Software-Updates oder einem ehemals nur prototypischen Einsatz erklärt werden.

Baden-Württembergs Führungsrolle bei der Industrie 4.0

Die Ursachen für Baden-Württembergs Führungsrolle und den großen Anteil an I4.0-Fortgeschrittenen lassen sich wie folgt zusammenfassen: *Erstens* stellen die kleinen Betriebe Baden-Württembergs, und somit die breite Masse, im Vergleich zu ihren bundesweiten Pendanten den mit Abstand größten Anteil an I4.0-Fortgeschrittenen. *Zweitens* sind gerade die digital fortschrittlichen Systemzulieferer sowie Industriegüterhersteller im Südwesten nochmals stärker aufgestellt, als in anderen Bundesländern. *Drittens* ist Baden-Württemberg vom Maschinen- und Fahrzeugbau geprägt, deren Betriebe und die Branchen an sich eine Vorreiterrolle bei der I4.0 einnehmen. Ein Teil der hohen I4.0-Readiness lässt sich also auch über strukturelle Merkmale und den Branchenzuschnitt in Baden-Württemberg erklären. Insgesamt führt diese Mischung dazu, dass der Südwesten eine I4.0-Spitzenposition im Verarbeitenden Gewerbe Deutschlands einnimmt. Nicht aus dem Blick zu verlieren sind dabei allerdings die vergleichsweise schwachen Entwicklungen bei den Großbetrieben und den Herstellern von Produkten für den Endkonsumenten sowie bei den Technologien der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation in Baden-Württemberg.

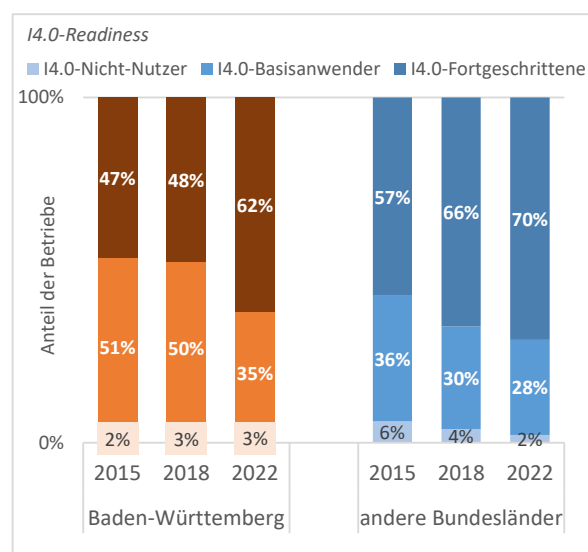
Eine Besonderheit Baden-Württembergs liegt in der hohen I4.0-Readiness der kleinen Betriebe (Abb. 4). Diese haben seit 2015 eine konsequent stärkere Entwicklung durchlaufen als in anderen Bundesländern. Bereits im Jahr 2015 weisen die kleinen Betriebe aus dem Südwesten eine doppelt so hohe I4.0-Fortgeschrittenen Gruppe auf als die der anderen Bundesländer (27% ggü. 14%). Diese Entwicklung setzt sich bis ins Jahr 2022 fort (34% ggü. 17%).

Abb. 4: I4.0-Readiness kleiner Betriebe (< 50)



Quelle. Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015-22.

Abb. 5: I4.0-Readiness größerer Betriebe (> 250)



Quelle. Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015-22.

Im Gegensatz dazu lässt sich bei den Großbetrieben für Baden-Württemberg nur eine durchweg schwächere I4.0-Entwicklung erkennen (Abb. 5). Hier liegt der Anteil der I4.0-Fortgeschrittenen im Südwesten bei zehn (2015) bzw. acht Prozentpunkten (2022) hinter den I4.0-Fortgeschrittenen aus den anderen Bundesländern. Insbesondere in den Jahren 2015-2018 verpassten die Großbetriebe aus dem Südwesten im Vergleich zu den anderen Bundesländern die digitale Entwicklung, sodass hier weiter eine Lücke klafft und Nachholbedarf besteht.

Die mittelgroßen Betriebe aus dem Südwesten weisen ebenso eine größere I4.0-Fortgeschrittenen Gruppe auf als die der anderen Bundesländer. Dabei haben sie ihren digitalen Vorsprung von ehemals 9% in 2015 jedoch weitgehend eingebüßt (noch 4% in 2022). Bei den I4.0-Basisanwendern sind hingegen keine Unterschiede zwischen den mittelgroßen Betrieben Baden-Württembergs und denen der anderen Regionen festzustellen.

Wie erwähnt, sind die zahlreichen Systemzulieferer und Industriegüterhersteller im Land eine weitere zentrale Stärke des Südwestens (vgl. Abb. 14 im Anhang). Hersteller von Industriegütern, also Investitionsgüter- und Betriebsmittelhersteller, weisen mit 47% eine rund 13 Prozentpunkte größere I4.0-Fortgeschrittenen Gruppe auf, als die aus den anderen Regionen Deutschlands. Dies liegt vor allem an der durchweg stärkeren Entwicklung in den letzten Jahren. Zuliefererbetriebe im Südwesten sind zu 44% in der Gruppe der I4.0-Fortgeschrittenen zu finden, während es in den anderen Bundesländern lediglich 39% sind. Allerdings fällt unter den baden-württembergischen Zulieferbetrieben der digitale Fortschritt in den letzten Jahren vergleichsweise gering aus und Zulieferer aus anderen Bundesländern konnten aufholen. So schmolz der Vorsprung von ehemals 10% auf 5%.

Aber auch die I4.0-Fortgeschrittenen Gruppe der Lohnfertiger ist mit 41% rund elf Prozentpunkte größer als die der anderen Bundesländer. Auch die Lohnfertiger können im Südwesten einen stetigen I4.0-Fortschritt in den

letzten Jahren erzielen und so den Vorsprung gegenüber den anderen Regionen halten. Lediglich bei den Herstellern von Produkten für den Endkonsumenten sind keine nennenswerten Unterschiede zu verzeichnen (27% ggü. 29%). Endprodukthersteller konnten insgesamt in den letzten Jahren bei der Industrie 4.0 zwar aufholen, bleiben aber auch in Baden-Württemberg unter dem Durchschnitt.

Ebenso sind die einzelnen digitalen Technologien unter den Betrieben Baden-Württembergs stärker verbreitet, als in den anderen Regionen Deutschlands (vgl. Abb. 15, im Anhang). Besonders stark sind die Unternehmen aus dem Südwesten bei den Technologien des digitalen Managements sowie bei den Cyber-physischen Systemen. Hier weist Baden-Württemberg bei allen digitalen Technologien signifikant höhere Nutzeranteile auf als die anderen Regionen. Der höhere Verbreitungsgrad reicht von 5% (digitaler Datenaustausch mit Kunden und Lieferanten) bis hin zu 18% (Automatisierung der internen Logistik). Beim Product-Lifecycle-Management erreicht der Südwesten sogar einen fast doppelt so hohen Nutzeranteil, wie die anderen Regionen Deutschlands (23% ggü. 12%). Lediglich bei den Technologien der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation sind statistisch keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Dieser technologische Bereich bleibt für Baden-Württemberg also weiter ausbaufähig.

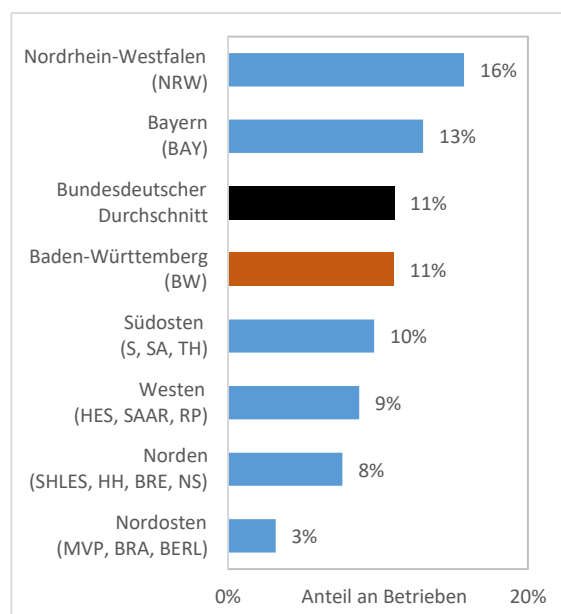
Industrie 4.0 und ökologische Nachhaltigkeit

Um den Zusammenhang der Industrie 4.0 zur ökologischen Nachhaltigkeit zu beleuchten wird im Folgenden nicht nur die I4.0-Readiness der Betriebe herangezogen, sondern auch zwei Nachhaltigkeitskriterien: Der Energiekostenanteil eines Betriebs sowie die Frage einer CO₂-Bilanzierung. Hierbei zeigt sich, dass Baden-Württemberg für beide Nachhaltigkeitskriterien im Gesamtdurchschnitt

Deutschlands liegt. Im Jahr 2022 haben in Baden-Württemberg 11% aller Betriebe eine CO₂-Bilanz erstellt (Deutschland: 11%), während sie einen durchschnittlichen Energiekostenanteil von 5,3% aufwiesen (Deutschland: 5,6%) (Abb. 6 und Abb. 7).

Interessanterweise sind mit Blick auf die CO₂-Bilanzierung die drei I4.0-Readiness Stufen weniger von Bedeutung. Vielmehr spielen strukturelle Merkmale, wie die Betriebsgröße oder die Seriengröße, die entscheidende Rolle. Hingegen ist die technologische Ausgestaltung der Digitalisierung sehr wohl von Bedeutung. Es scheint darauf anzukommen, welche einzelnen I4.0-Technologien ein Betrieb in der Produktion einsetzt. Denn hier lassen sich auch nach der Kontrolle auf strukturelle Merkmale noch deutliche Unterschiede erkennen, welche zwischen den I4.0-Readiness Stufen nicht sichtbar waren.

Abb. 6 Realisierung einer CO₂-Bilanzierung

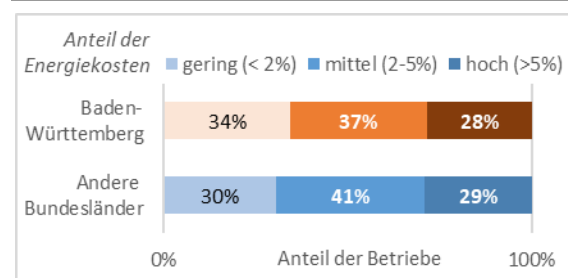


Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

Dabei zeigt sich, dass Betriebe, die entweder das Product-Lifecycle-Management oder ein echtzeitnahes Produktionsleitsystem einsetzen, zu einer deutlich höheren Wahrscheinlichkeit auch eine CO₂-Bilanz erstellen (vgl. Abb. 16, im Anhang). Der Grund dürfte insbesondere darin liegen, dass diese Betriebe bessere Möglichkeiten haben, eigene Kennzah-

len in der Produktion zu erheben und so einfacher CO₂-Bilanzen erstellen können und sich so auch ökologische Defizite beheben lassen. Die anderen digitalen Technologien weisen bei einem Einsatz zwar auch höhere Prozentzahlen bei der CO₂-Bilanzierung auf, was jedoch erneut auf strukturelle Merkmale zurückzuführen ist und nicht auf die Technologie selbst.

Abb. 7 Anteil der Energiekosten am Umsatz



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

Bei den Energiekostenanteilen der Betriebe sind hingegen keine direkten Zusammenhänge zur I4.0 festzustellen. Hier lässt sich weder über die drei Stufen des I4.0-Index ein Einfluss nachweisen, noch über die sieben einzelnen digitalen Technologien. Zusammenhänge die hier festzustellen sind, lassen sich ausschließlich auf strukturelle Merkmale, insbesondere die Branche und die Seriengröße, zurückführen.

So weisen die Prozessindustrien bis zu doppelt so hohe Energiekostenanteile auf wie bspw. die Elektrobranche oder der Maschinen- und Fahrzeugbau. Ebenso fallen die Energiekosten im Vergleich zum erzielten Umsatz bei Einzelfertigung deutlich weniger ins Gewicht als bei mittleren Seriengrößen oder bei Großserienproduktion. Demnach gilt, dass aktuell kein direkter Einfluss der I4.0-Readiness oder deren Technologien auf die Energiekostenanteile festzustellen ist, maßgeblich ist vielmehr der Produktionskontext.

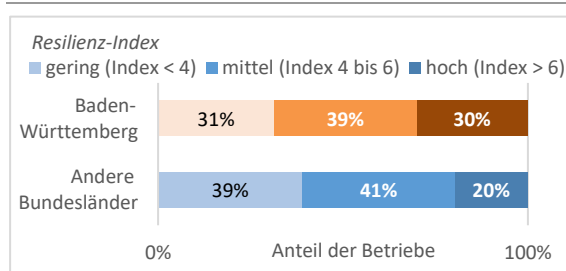
Insgesamt lässt sich also festhalten, dass die Industrie 4.0 und die ökologische Nachhaltigkeit nicht per se miteinander einhergehen. Ein positiver Zusammenhang ist aktuell nur zwischen einzelnen digitalen Technologien und der CO₂-Bilanzierung festzustellen, was in einem besseren Monitoring von Produktions-

und Betriebskennzahlen begründet sein dürfte. Folglich müssen I4.0-Technologien zukünftig stärker auf Nachhaltigkeitsaspekte ausgelegt und sowohl bei deren Entwicklung als auch bei deren Implementierung explizit mit dem Energieverbrauch und dem CO₂-Ausstoß verknüpft werden.

Industrie 4.0 und die Fähigkeit zur Resilienz

Die Fähigkeit zur Resilienz lässt sich für Produktionsbetriebe durch fünf Handlungsfelder abbilden: Mitarbeitende, Offenheit für Innovationen, Ressourcenausstattung, Vernetzung in der Supply Chain und explizite Arbeitsprozesse. Für diese Studie wird ein Index entwickelt, der die Resilienz von Produktionsbetrieben auf einer Skala von Null (keine Fähigkeiten) bis zehn Punkten (max. Fähigkeiten) misst. Mithilfe von Kategorien werden drei Gruppen gebildet: Betriebe mit geringer Resilienz (0-3 Punkte), moderater Resilienz (4-6) und hoher Resilienz (7-10).

Abb. 8 Resilienzfähigkeiten nach Regionen



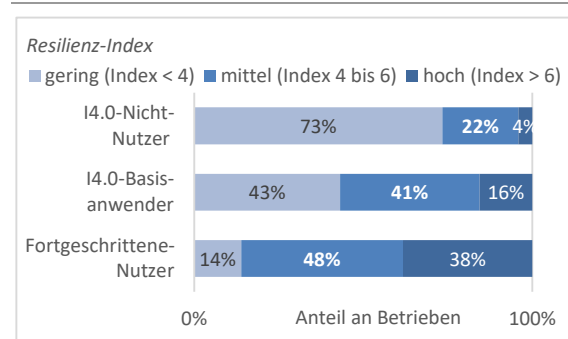
Quelle. Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

In einer ersten Analyse zeigt sich, dass die Betriebe im Südwesten über eine insgesamt höhere Fähigkeit zur Resilienz verfügen als die in anderen Regionen (Abb. 8). Baden-Württemberg weist hier mit 30% einen deutlich höheren Anteil an Betrieben mit hoher Resilienz auf als andere Bundesländer (20%). Außerdem fällt die Fähigkeit zur Resilienz mit zunehmender Betriebsgröße sowie mit steigender Seriengröße und größerer Komplexität des hergestellten Produkts größer aus. Ebenso sind die Elektrobranche sowie die

Chemie- und Pharmaindustrie überdurchschnittlich resilient. Unter dem Durchschnitt liegen die Nahrungs- und Getränkeindustrie sowie die Metallindustrie.

Der wohl interessanteste Befund beim Themenkomplex der Resilienz ist jedoch der Zusammenhang zur Industrie 4.0 (Abb. 9). Hier zeigt sich, dass die Fähigkeit zur Resilienz bei zunehmender I4.0-Readiness ebenfalls größer ausfällt. Die I4.0 ist hierbei sogar ein größerer Erklärungsfaktor als strukturelle Merkmale wie die Betriebsgröße oder Produktkomplexität. Entsprechend lässt sich schlussfolgern, dass die Industrie 4.0 einen positiven Effekt auf die Resilienz von Produktionssystemen mit sich bringt. Dies ist vermutlich auf eine bessere Einbindung in der Supply Chain zurückzuführen sowie auf einen insgesamt besseren Informationsfluss aus dem Produktionsumfeld, was bei der Früherkennung, Vermeidung und Behebung von externen Störeeignissen förderlich wirkt.

Abb. 9 Resilienzfähigkeiten nach Größe



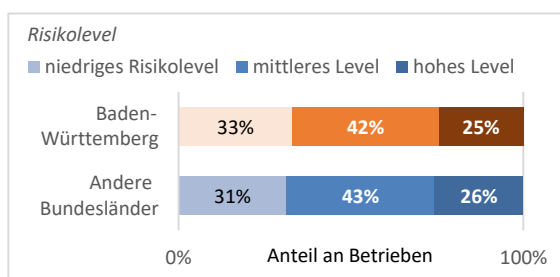
Quelle. Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

Für die Betrachtung der Resilienz von Produktionsbetrieben spielt auch immer das Risiko des Umfelds, in dem sich Unternehmen bewegen, eine zentrale Rolle. Für diese Studie werden drei Risikofaktoren herangezogen: Der Energiekostenanteil, der Importanteil von außerhalb der EU sowie die Abhängigkeit vom Hauptprodukt i.S. des Umsatzanteils. Je höher die Anteile über die drei Risikofaktoren hinweg bei einem Betrieb ausfallen, desto höher wird dessen Risikolevel bewertet. Um für diese Studie auch eine Gesamtbewertung zu ermöglichen, werden die Produktionsbe-

triebe über einen Index gruppiert und entsprechend einem niedrigem Risikolevel, moderatem sowie hohem Level zugeordnet.

Mit Blick auf Baden-Württemberg zeigt sich, dass die Betriebe im Südwesten ein sehr ähnliches Risikolevel wie Unternehmen aus anderen Bundesländern haben (Abb. 10). So weist ein Viertel aller Betriebe ein hohes Risikolevel auf, gut 30 bzw. 40% ein geringes oder mittleres Level.

Abb. 10: Risikolevel nach Regionen



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

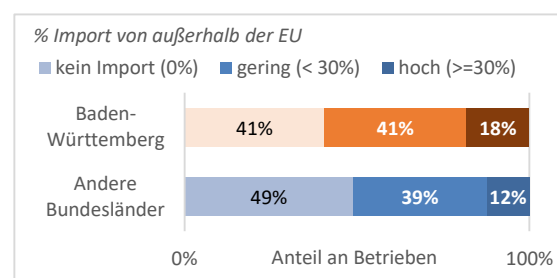
Insgesamt fällt das Risikolevel der Betriebe mit zunehmender Seriengröße größer aus; Hersteller von Betriebsmitteln und Investitionsgütern weisen im Schnitt ein etwas geringeres Risikolevel auf. Basierend auf den gewählten Risikofaktoren sind die Nahrungs- und Getränkeindustrie sowie die Gummi- und Kunststoffindustrie überdurchschnittlich risikobehaftet, während der Maschinen- und Fahrzeugbau ein insgesamt geringeres Risikolevel aufweist.

Ein direkter Zusammenhang zwischen Risikolevel und Industrie 4.0 lässt sich nur beim Risikofaktor zum Importanteil von außerhalb der EU feststellen. Ein Zusammenhang von Industrie 4.0 und den beiden anderen Risikofaktoren bzw. zum Risikolevel insgesamt ist hingegen nicht ersichtlich.

Bezüglich des Importanteils zeigt sich, dass Betriebe mit einer höheren I4.0-Readiness auch einem höheren Risiko ausgesetzt sind, aufgrund des großen Anteils an Import von Vorleistungen von außerhalb der EU (Abb. 11). Dabei ist zu erwähnen, dass Betriebe mit einer hohen I4.0-Readiness nicht grundsätzlich in größerem Umfang importieren als andere. Allerdings neigen sie dazu, ihre Vorleis-

tungen deutlich häufiger weltweit zu beziehen, während Betriebe mit einer geringen I4.0 ihre Vorleistungen eher von innerhalb der EU erhalten. Dieser Aspekt führt dazu, dass eine höhere I4.0-Readiness mit einem erhöhten Risiko durch globale Lieferketten verbunden ist.

Abb. 11: Importorientierung in Baden-Württ.



Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022.

Allerdings zeigen Betriebe mit einem hohen Importanteil von außerhalb der EU gleichzeitig auch überdurchschnittliche Fähigkeiten zur Resilienz. Insofern weisen diese Betriebe zwar eine höhere Anfälligkeit für Lieferkettenstörungen auf, sind zugleich jedoch auch besser auf solche potenziellen Störereignisse vorbereitet.

Zudem lässt sich feststellen, dass Betriebe, die lediglich ein Hauptprodukt bzw. eine Produktgruppe herstellen (Umsatzanteil von 100%), zugleich besonders geringe resiliente Fähigkeiten zeigen. Diese Unternehmen sind folglich nicht nur einem erhöhten Risiko ausgesetzt, sondern scheinen auch ungenügend auf externe Störereignisse und deren Folgen vorbereitet zu sein.

Fazit zur vierten industriellen (r)Evolution

Die Industrie 4.0 schreitet seit 2015 kontinuierlich voran, jedoch lassen sich unterschiedliche Dynamiken in den vergangenen sieben Jahren feststellen: Bis 2018 fand der I4.0-Fortschritt eher in der Breite des Verarbeitenden Gewerbes statt, bis dahin nicht digitalisierte Unternehmen konnten Basisanwendungen implementieren. Seit 2018 konzentriert sich

die digitale Entwicklung jedoch auf weniger Betriebe, insbesondere auf Großunternehmen und Spitzenanwender. Durch diese Konzentration verlangsamte sich der I4.0-Fortschritt von ehemals 12% (2015-2018) auf lediglich 5% (2018-2022). Diese geringere Dynamik lässt sich vermutlich auf die erschwerten Produktions- und Geschäftsbedingungen während der COVID-19-Krise zurückführen.

Es bleibt daher noch abzuwarten, ob die I4.0 in den kommenden Jahren wieder mehr Fahrt aufnimmt oder ob es bei einem lediglich sehr konzentrierten Fortschritt bleibt. Mit diesen zwar konstanten, aber doch moderaten Wachstumsraten der letzten Jahre fügt sich die I4.0 in den durchschnittlichen Modernisierungsprozess der Produktion ein. Ein überproportionales Wachstum kann für I4.0-Technologien bspw. gegenüber anderen Produktionstechnologien nur sehr bedingt festgestellt werden. Folglich lässt sich konstatieren, dass es sich bei den Fortschritten der I4.0 in den letzten Jahren eher um evolutorische Entwicklungen, als um revolutionäre Durchbrüche handelt.

Baden-Württemberg nimmt nach wie vor die I4.0-Führungsrolle in Deutschland ein und kann einen Vorsprung von rund zwölf Prozentpunkten beim I4.0-Readiness-Index gegenüber den anderen Bundesländern aufweisen. Die Stärke des Südwestens ist auf die hohe I4.0-Orientierung der kleinen Betriebe zurückzuführen, die überdurchschnittlich starken Zulieferer und Industriegüterhersteller sowie auf den in Baden-Württemberg weit verbreiteten Maschinen- und Fahrzeugbau. Die Schwächen Baden-Württembergs liegen darin, dass in den letzten Jahren vergleichsweise wenige Großunternehmen in digitale Spitzenanwendungen investierten und Produkthersteller für Endkonsumenten sich vergleichsweise schwach entwickelten. Ebenso sind Technologien aus dem Bereich der drahtlosen Mensch-Maschine-Kommunikation im Vergleich zu den anderen Technologiefeldern weniger in Baden-Württemberg verbreitet. Folglich besteht in diesen drei Bereichen (Großunternehmen, Endprodukther-

steller, drahtlose Mensch-Maschine-Kommunikation) für den Südwesten aktuell der größte Nachholbedarf im Vergleich zu den Entwicklungen im restlichen Bundesgebiet.

Der I4.0 wird gemeinhin ein positiver Zusammenhang zur Nachhaltigkeit und Resilienz unterstellt. Bei der ökologischen Nachhaltigkeit zeigt sich jedoch, dass dieser positive Einfluss nicht per se existiert, sondern lediglich auf dem Einsatz einzelner digitaler Technologien beruht und stärker von strukturellen Merkmalen, wie Betriebs- und Seriengröße sowie Branche, abhängt. 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.

Bei den Fähigkeiten zur Resilienz von Produktionsbetrieben 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. Dies dürfte dazu führen, dass Produktionsbetriebe sowohl bei der Früherkennung, als auch bei der Behebung von externen Störereignissen bessere Fähigkeiten entwickeln können.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass die I4.0 seit 2015 moderate Fortschritte macht und dabei die ökologische Nachhaltigkeit doch eher befördert als bremst. Zudem befähigt sie Betriebe, die Resilienz ihrer Produktionssysteme auszubauen. 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.

Literatur

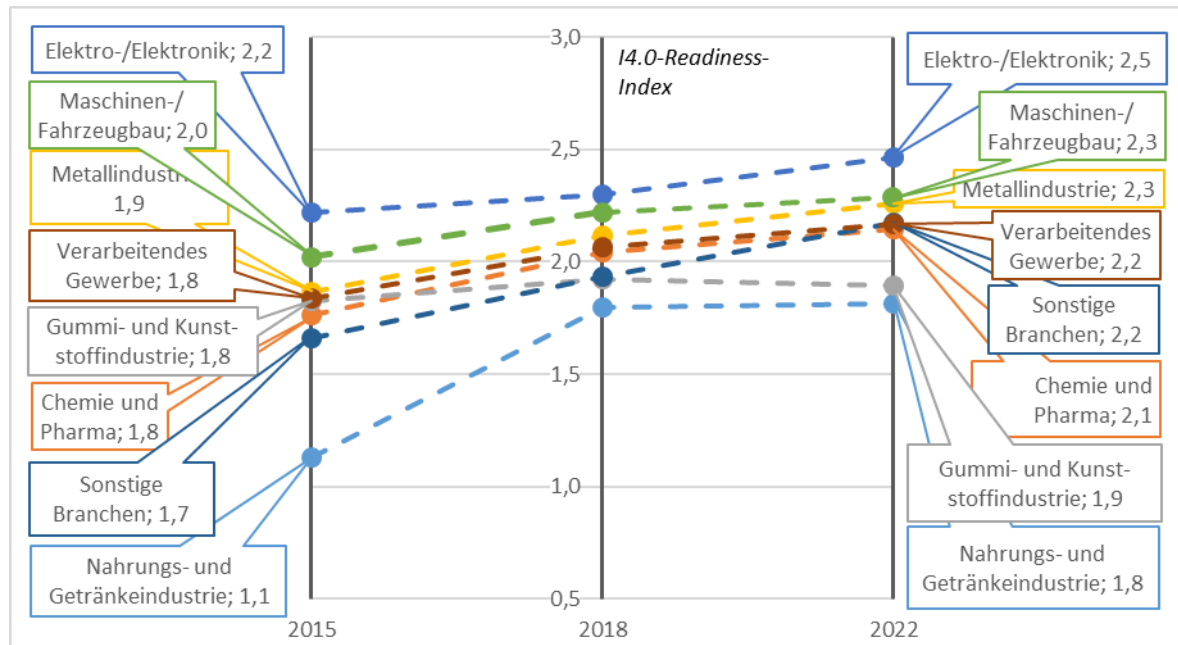
Christian Lerch, Angela Jäger (2020): Industrie 4.0 quo vadis? Neuere Entwicklungen der vierten industriellen Revolution im Verarbeitenden Gewerbe, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung Nr. 76; Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2020, 12 S.

Christian Lerch, Angela Jäger, Spomenka Maloca (2017): Wie digital ist Deutschlands Industrie wirklich? Arbeit und Produktivität in der digitalen Produktion, Mitteilungen aus der ISI-Erhebung Nr. 71; Karlsruhe: Fraunhofer ISI, 2017, 12 S.

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

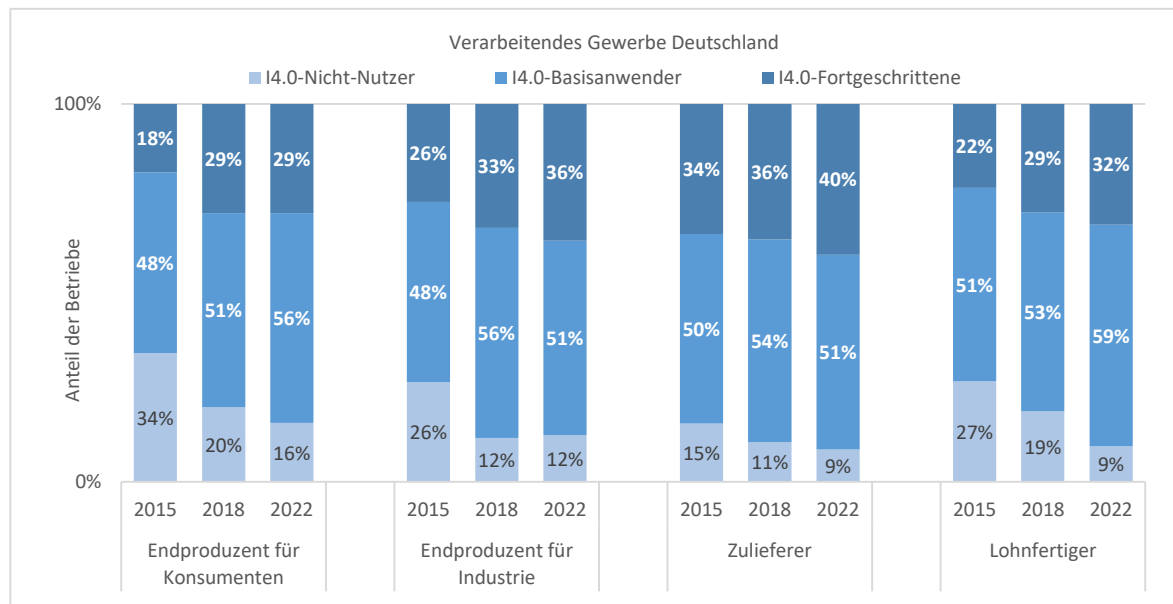
Anhang

Abb. 12: Entwicklung der I4.0-Readiness in den Branchen des Verarbeitenden Gewerbes



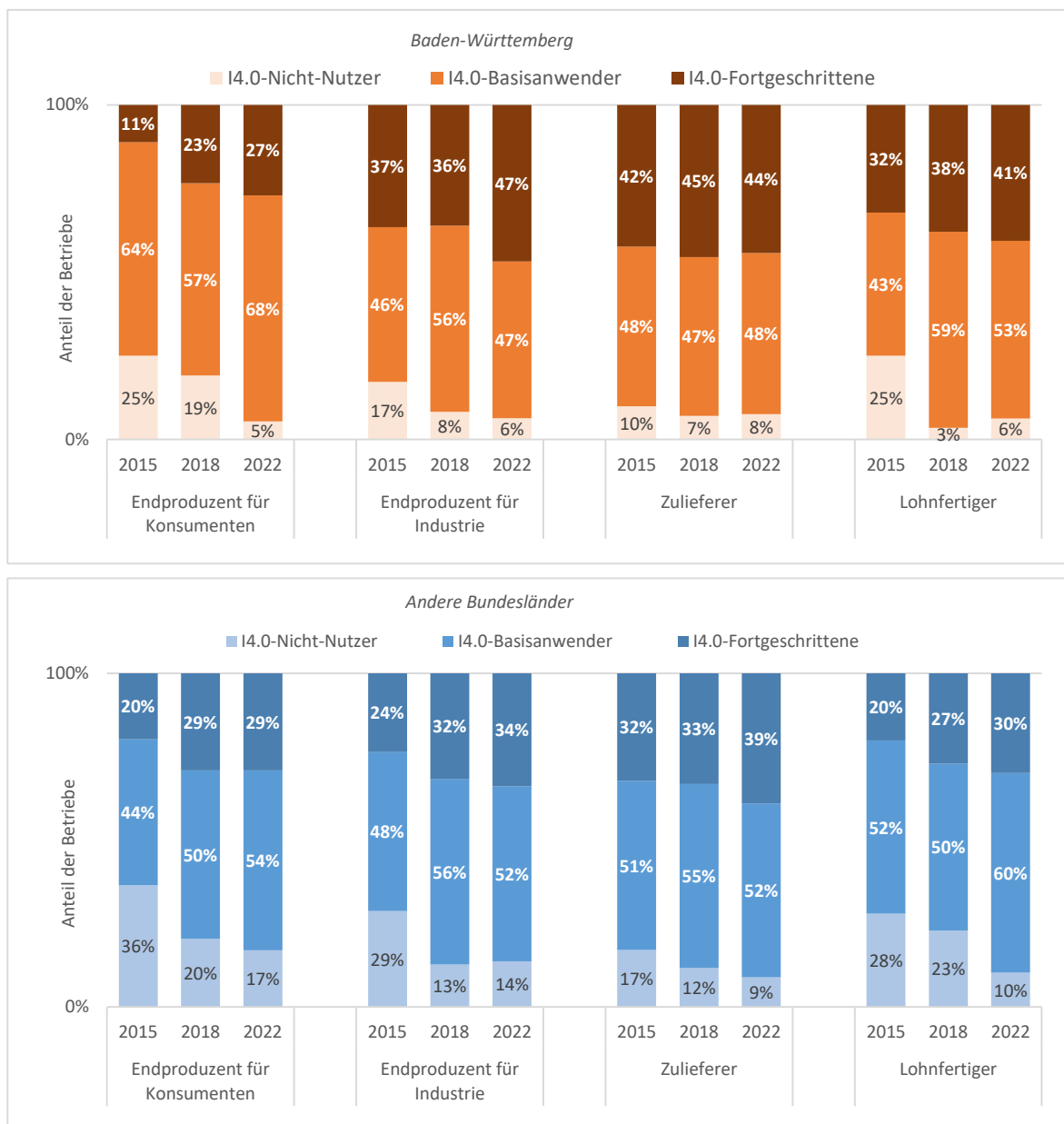
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015, 2018, 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Abb. 13: Entwicklung der I4.0-Readiness in den verschiedenen Wertschöpfungspositionen



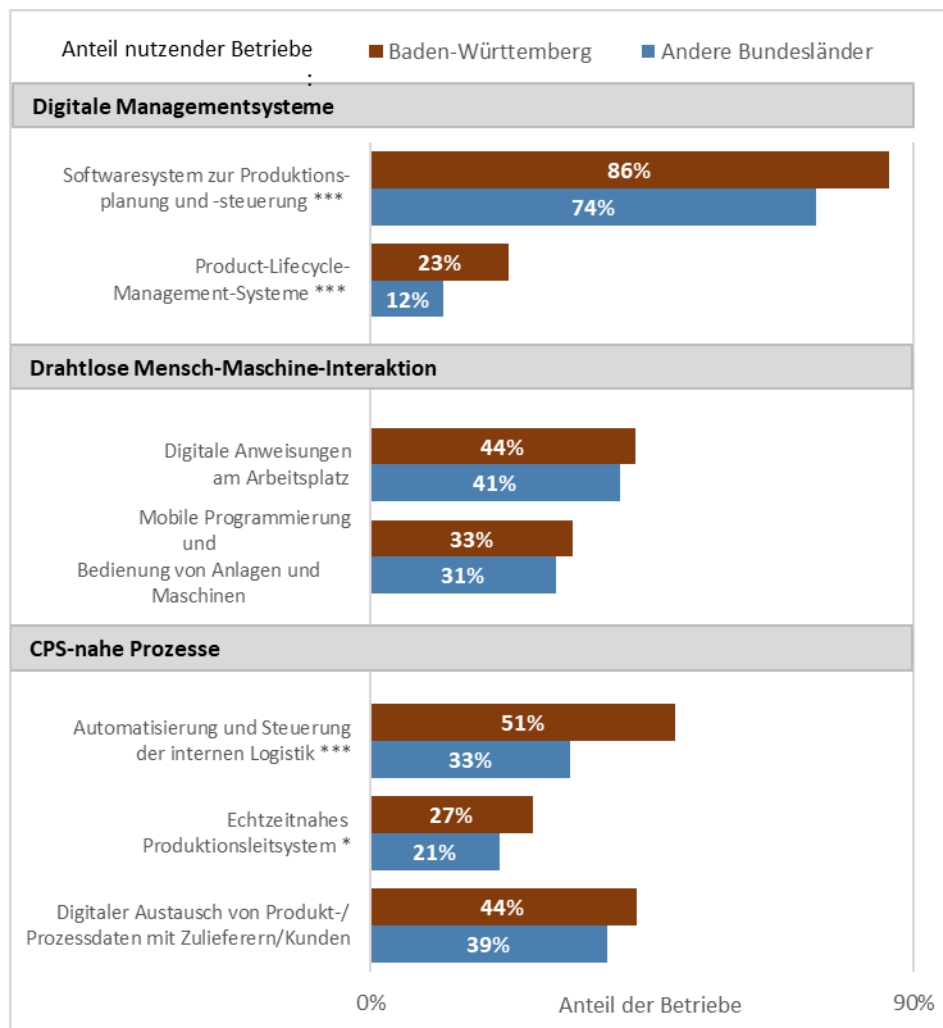
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015, 2018, 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Abb. 14: Entwicklung der I4.0-Readiness in verschiedenen Wertschöpfungspositionen getrennt für Baden-Württemberg und andere Bundesländer



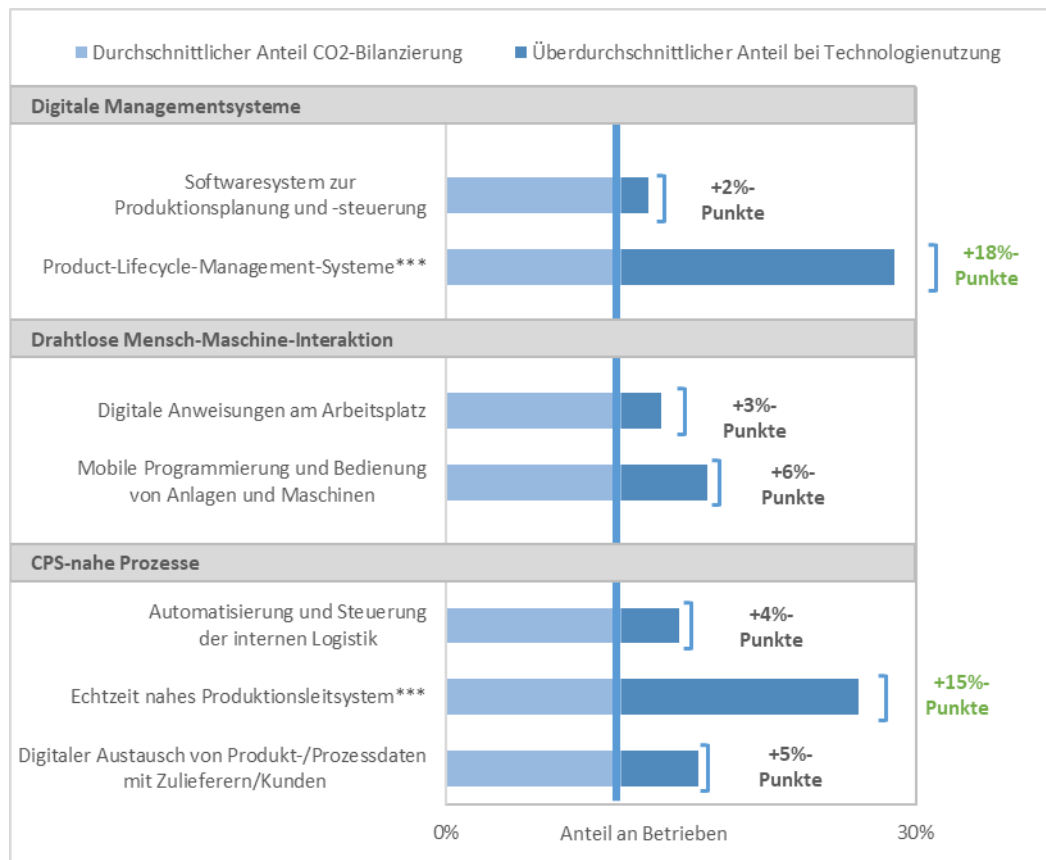
Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2015, 2018, 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Abb. 15: Verbreitung der digitalen Technologien in Baden-Württemberg und anderen Bundesländern



Anm.: Signifikanzniveau: * $p < 0,1$, *** $p < 0,001$ bei bivariatem Gruppenvergleich statistisch signifikant.
 Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI

Abb. 16: CO₂-Bilanzierung nach digitalen Technologien



Anm.: Signifikanzniveau: * $p < 0,1$, *** $p < 0,001$ bei bivariatem Gruppenvergleich statistisch signifikant.
 Quelle: Erhebung *Modernisierung der Produktion* 2022. Karlsruhe: Fraunhofer ISI