

WZB

Berlin Social Science Center



Martin Krzywdzinski

**Automatisierung, Digitalisierung und Wandel der
Beschäftigungsstrukturen in der Automobilindustrie.
Eine kurze Geschichte vom Anfang der 1990er bis 2018**

Discussion Paper

SP III 2020–302

Juni 2020

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

Forschungsschwerpunkt

Digitalisierung und gesellschaftlicher Wandel

Forschungsgruppe

Globalisierung, Arbeit und Produktion

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung gGmbH
Reichpietschufer 50
10785 Berlin
www.wzb.eu

Das Urheberrecht liegt beim Autor.

Discussion Papers des WZB dienen der Verbreitung von Forschungsergebnissen aus laufenden Arbeiten. Sie sollen den Ideenaustausch und die akademische Debatte befördern. Die Zugänglichmachung von Forschungsergebnissen in einem WZB Discussion Paper ist nicht gleichzusetzen mit deren endgültiger Veröffentlichung und steht der Publikation an anderem Ort und in anderer Form ausdrücklich nicht entgegen.

Discussion Papers, die vom WZB herausgegeben werden, geben die Ansichten der jeweiligen Autoren wieder und nicht die der gesamten Institution WZB.

Martin Krzywdzinski

Automatisierung, Digitalisierung und Wandel der Beschäftigungsstrukturen in der Automobilindustrie. Eine kurze Geschichte vom Anfang der 1990er bis 2018

Discussion Paper SP III 2020-302

Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (2020)

Affiliation des Autors:

Martin Krzywdzinski, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung

E-Mail: martin.krzywdzinski@wzb.eu

Zusammenfassung

In der gegenwärtigen Diskussion gilt es als sicher, dass wir in einer Zeit rasant fortschreitender Automatisierung leben, die insbesondere durch den Einsatz von Robotern vorangetrieben wird. Die Roboterdichte gilt dementsprechend in vielen Publikationen als der zentrale Indikator der Automatisierung. Die vorliegende Studie stellt diese Argumentation in Frage. Sie untersucht zwei zentrale Fragen: Erstens, welche Ansätze der Automatisierung und Digitalisierung werden in der Automobilindustrie in Deutschland, Japan und den USA verfolgt? Zweitens, wie haben sich die Beschäftigung und ihre Zusammensetzung nach Tätigkeitsgruppen in der Automobilindustrie in den drei Ländern entwickelt? Der erste Teil der Studie fokussiert auf die Entwicklung der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze in der Automobilindustrie seit Anfang der 1990er Jahre bis heute. Er kombiniert eine qualitative Analyse der Fachpresse der Automobilbranche sowie eine quantitative Auswertung der Entwicklung des Roboterbestands von 1993 bis 2018 basierend auf den Statistiken der International Federation of Robotics. Im zweiten Teil der Studie wird der Wandel der Beschäftigungsstrukturen anhand von Berufsstatistiken des Bureau of Labor Statistics (USA), der Bundesagentur für Arbeit (Deutschland) und des Statistics Bureau of Japan untersucht. Die Studie stellt die Wahrnehmung einer automatisierungsbedingten Bedrohung von Beschäftigung und insbesondere von Produktionsbeschäftigung in Frage. Sie diskutiert zugleich die Entwicklungen in Deutschland, Japan und den USA im Vergleich und verdeutlicht Unterschiede der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze sowie auch unterschiedliche Pfade des Wandels von Beschäftigungsstrukturen.

Schlagworte: Automatisierung, Digitalisierung, Roboter, Industrie 4.0, Beschäftigung, Berufsstatistik, Automobilindustrie

Automation, digitalization and changing occupational structures in the automotive industry. A short history from the 1990s until 2018

Abstract

In the current public discussion, it is considered certain that we live in a time of rapidly advancing automation, which is driven in particular by the use of robots. Accordingly, many academic publications use robot density as the central indicator of automation. The present study challenges this perspective. It examines two central questions: First, what approaches to automation and digitalization are being pursued in the automotive industry in Germany, Japan and the USA? Second, how have employment and its occupational composition in the automotive industry developed in the three countries? The first part of the study focuses on the development of automation and digitalization approaches in the automotive industry from the early 1990s until today. It combines a qualitative analysis of press articles and a quantitative evaluation of the development of the stock of industrial robots from 1993 to 2018 based on the statistics of the International Federation of Robotics. The second part of the study focuses on the change in employment structures using occupational statistics from the Bureau of Labor Statistics (USA), the Federal Employment Agency (Germany) and the Statistics Bureau of Japan. The study questions the perception of an automation-related threat to employment and especially to production employment. At the same time, it discusses developments in Germany, Japan and the USA in comparison and highlights differences in automation and digitalization approaches as well as different paths of change in employment structures.

Key words: Automation, digitalization, robots, Industry 4.0, employment, occupational statistics, automotive industry

JEL classification: F23, F66, J24, L15, L62, O33

Inhalt

1. Einleitung	7
2. Zurück in die Zukunft: Automatisierung und Digitalisierung	8
3. Datengrundlage der Studie.....	13
3.1 Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze.....	13
3.2 Beschäftigungsstrukturen	13
4. Historische Entwicklung der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze	14
4.1 Wandel der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze – Analyse der Fachpresse	15
4.2 Wandel der Automatisierung – Analyse der Roboterstatistiken	30
5. Wandel der Beschäftigung in der Automobilindustrie seit den 1990er Jahren	32
5.1 Beschäftigung und Produktion	33
5.2 Beschäftigung nach Tätigkeitsgruppen	35
5.3 Strukturwandel innerhalb der Produktionsarbeiterschaft.....	40
6. Schlussfolgerungen	49
Literaturverzeichnis	54
Anhang: Erläuterungen zu den Datenquellen	62

1. Einleitung

In der gegenwärtigen Diskussion gilt es beinahe als sicher, dass wir in einer Zeit rasant fortschreitender Automatisierung leben, die insbesondere Beschäftigte treffen wird, deren Arbeitsplätze stark von Routinetätigkeiten geprägt sind (Arntz et al. 2017; Autor et al. 2003). Als ein typisches Beispiel für einen von solchen Routinetätigkeiten dominierten Bereich gilt die Produktion. So prophezeit die Studie von Frey und Osborne (2013), die die öffentliche und wissenschaftliche Diskussion stark beeinflusst hat, eine Wahrscheinlichkeit der Automatisierung von 98% für Montagearbeiter, 94% für Schweißer und über 90% für verschiedene Arten von Maschinenbedienern – alles typische Berufe in der Automobilindustrie. Es ist allerdings charakteristisch für die gegenwärtige Diskussion, dass sie von abstrakten Ableitungen von Automatisierungspotentialen geprägt ist (Frey/Osborne 2013; Dengler/Matthes 2018), während konkrete Analysen der Technikentwicklung und ihre Auswirkungen auf Arbeit rar sind (vgl. als Ausnahme Jürgens 2020).

Die vorliegende Studie versucht, zu einer Versachlichung der gegenwärtigen Automatisierungsdiskussion beizutragen und baut dabei auf einer Forschungstradition am WZB auf, die die Zusammenhänge zwischen der Entwicklung von Technik, Produktionssystemen, Beschäftigungsstrukturen und Personalstrategien von Unternehmen analysiert (Jürgens et al. 1993; Jürgens 1997; Jürgens/Krzywdzinski 2016). Unternommen wird hier eine historische Rekonstruktion der Entwicklung von Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen in der Automobilindustrie, um zu einem empirisch begründeten Blick auf ihre Motivationen, Formen und Resultate zu kommen. Dabei wird ein international-komparativer Ansatz verfolgt, mit dem erfasst werden soll, in welchem Spektrum sich die Entwicklungen bewegen und welche Unterschiede es in den Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen gibt. Im Fokus stehen dabei mit Deutschland, Japan und den USA drei zentrale Automobilherstellungsländer. Untersucht werden die folgenden beiden Hauptfragen:¹

1. Welche Ansätze der Automatisierung und Digitalisierung werden in der Automobilindustrie in Deutschland, Japan und den USA verfolgt?
2. Wie haben sich die Beschäftigung und ihre Zusammensetzung nach Tätigkeitsgruppen in der Automobilindustrie in den drei Ländern entwickelt?

Mit Versachlichung der öffentlichen Diskussion ist vor allem die Korrektur von drei zumindest teilweise falschen Wahrnehmungen gemeint. Erstens wird die Wahrnehmung in Frage gestellt, dass wir in einer Phase einer rasant steigenden Automatisierung im Sinne der Substitution von menschlicher Arbeitskraft durch Maschinen bzw. Computer leben. Hierzu wird die Entwicklung der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze in der Automobilindustrie seit Anfang der 1990er Jahre bis heute mit Hilfe qualitativer und quantitativer Daten analysiert. Die qualitative Analyse beruht auf der Auswertung von insgesamt 439 Artikeln aus der Fachpresse der Automobilbranche. Als quantitativer Indikator werden die von der International Federation of Robotics

¹ Ich danke ganz herzlich Ulrich Jürgens, Martin Kuhlmann und Florian Butollo, die den ersten Entwurf dieses Papers gelesen, kommentiert und mit mir diskutiert haben.

zur Verfügung gestellten Zahlen über die Entwicklung des Roboterbestands von 1993 bis heute genutzt.

Zweitens wird die Fokussierung der gegenwärtigen wissenschaftlichen und öffentlichen Diskussion auf die Roboter als die primäre Form der Automatisierung in Frage gestellt. Die Zahl der installierten Roboter bzw. die Roboterdichte (im Sinne der Zahl der Roboter im Verhältnis zur Beschäftigtenzahl) ist in der wissenschaftlichen Diskussion zu einem ungeheuer beliebten Indikator geworden, der mittlerweile zur Erklärung so unterschiedlicher Phänomene wie Beschäftigung, Entgeltungleichheiten zwischen Beschäftigtengruppen bzw. Geschlechtern und internationale Handelsströme herangezogen wird (z.B. Acemoglu/Restrepo 2017; Graetz/Michaels 2018; Aksoy et al. 2019; Carbonero et al. 2020). Angenommen wird dabei, dass die Zahl der Roboter ein sinnvoller Indikator für Automatisierung oder gar technischen Wandel im Allgemeinen sei – eine Annahme, die meines Wissens noch nicht wirklich überprüft wurde und hier in Frage gestellt wird.

Drittens wird die Wahrnehmung einer automatisierungsbedingten Bedrohung von Beschäftigung und insbesondere von Produktionsbeschäftigung in Frage gestellt. Diese Wahrnehmung beruht bislang auf abstrakten Berechnungen von Substitutionspotentialen, aber kaum auf empirischen Analysen. Im Fokus der Analyse der Beschäftigungsstrukturen in der hier vorliegenden Studie steht die Zusammensetzung der Beschäftigung nach Tätigkeitsgruppen. Basierend auf Daten des Bureau of Labor Statistics (USA), der Bundesagentur für Arbeit (Deutschland) und des Statistics Bureau of Japan wird diese Zusammensetzung am Beispiel des Automobilsektors untersucht.

2. Zurück in die Zukunft: Automatisierung und Digitalisierung

Automatisierung ist in der gegenwärtigen Diskussion über Industrie 4.0 und Digitalisierung zu einem zentralen gesellschaftlichen Thema geworden. Automatisierung bezeichnet dabei eine spezifische Form von Technik. Wir können Technik mit Schulz-Schaeffer (2008: 1) als „künstlich erzeugte Wirkungszusammenhänge“, die „hinreichend zuverlässig [...] bestimmte erwünschte Effekte“ hervorbringen, verstehen. Technik kann eine Materialisierung haben, etwa als eine Maschine, sie kann aber auch eine bestimmte Verfahrensweise, ein Algorithmus sein. Automatisierung bezeichnet eine Technik, die ohne menschliche Intervention eine bestimmte Aufgabe ausführen kann (Nof 2009). Unter den Begriff Automatisierung fallen demnach sowohl mechanische Vorrichtungen, als auch elektronisch gesteuerte Maschinen und Roboter, bis hin zu Softwaresystemen, die Formen der Datenverarbeitung automatisch übernehmen. Es ist wichtig hervorzuheben, dass Fortschritte in der Automatisierung nur eine Form des technischen Wandels repräsentieren – über Automatisierung hinaus besteht dieser Wandel in der Entwicklung ganz neuer Techniken, Materialien, Produkte und Produktarchitekturen, die in der bisherigen menschlichen Geschichte oftmals disruptiver für Unternehmen, Arbeit und Beschäftigung gewesen sind als Automatisierung (Christensen 1997).

Sowohl die gegenwärtige öffentliche als auch die wissenschaftliche Diskussion über die Entwicklung von Automatisierung und ihren Auswirkungen auf Beschäftigung wird stark von ökonometrischen Studien geprägt, denen häufig de facto eine technikdeterministische Perspektive zugrunde liegt (vgl. Hirsch-Kreinsen 2018). Zwei zentrale Annahmen sind dabei hervorzuheben.

Erstens wird angenommen, dass Automatisierungsprozesse linear von „weniger Automatisierung“ zu „mehr Automatisierung“ verlaufen, und dass zweitens ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Automatisierung und Beschäftigungsstrukturen besteht. Im Unterschied dazu wird in der soziologischen Forschung darauf hingewiesen, dass bei der Betrachtung dessen, ob Prozesse automatisiert werden und wie sich das auf die Beschäftigung auswirkt, mehrere Variablen zu berücksichtigen sind, nämlich (a) die stofflich-technischen Bedingungen, (b) die Motive und Zielvorstellungen der Unternehmen, und (c) die organisatorischen und arbeitspolitischen Leitbilder der Unternehmen.

Die *stofflich-technischen Bedingungen* beziehen sich vor allem auf die Komplexität des Produkts und seiner Produktion, also die Vielfalt von Teilen und Bearbeitungsprozessen, die Variabilität der Produktionsumgebung, die Produktionsvolumina und der Produktionsgeschwindigkeit (Baethge-Kinsky et al. 2018). Je größer die Komplexität, desto schwieriger ist die Automatisierung des Produktionsprozesses. Aus diesem Grund lassen sich in der Automobilindustrie grundlegende Unterschiede der Automatisierungsniveaus je nach Bereich feststellen. Hoch automatisiert sind die mechanische Bearbeitung, das Pressen, die Schweißprozesse im Karosseriebau und auch der Lackierprozess (vgl. Jürgens 2020; Kern/Schumann 1984). Die Montage von Automobilen ist hingegen ein komplexer Prozess mit vielen sehr unterschiedlichen Arbeitsschritten und einer sehr großen Variantenvielfalt, der deutlich weniger automatisiert ist (Fujimoto 1997). Wir werden in der folgenden empirischen Analyse die stofflich-technischen Bedingungen insofern berücksichtigen, als Entwicklungen in der Montage und im Karosseriebau beispielhaft gegenübergestellt werden.

Im Hinblick auf die *Motive der Automatisierung und die Zielvorstellungen der Unternehmen* werden insbesondere in der ökonomischen Diskussion die Kosten (etwa im Sinne der relativen Kosten von Anlagen im Vergleich zur Arbeitskraft) hervorgehoben (vgl. als ein Beispiel von vielen Acemoglu/Restrepo 2018). Sicherlich spielen Kostenabwägungen eine wichtige Rolle, allerdings sind sie bei weitem nicht das einzige Motiv für Automatisierung. Empirische Analysen zeigen, dass Automatisierung oftmals eingeführt wird, weil bestimmte Bearbeitungsschritte von Menschen gar nicht, oder nicht mit der gewünschten Präzision und gleichbleibenden Qualität ausgeführt werden können (Krzywdzinski 2016). Auch die Verbesserung der Ergonomie kann ein Motiv für Automatisierung sein, etwa wenn bestimmte Arbeitsplätze große Belastungen und Schäden für die Gesundheit der Mitarbeiter verursachen. Zentral bei der Analyse der Motive für Automatisierung ist, dass es keinen eindeutigen „One-best-way“ gibt, sondern unterschiedliche Ansätze und Strategien möglich sind (vgl. z.B. Jürgens et al. 1993; Adler 1988; Fujimoto 1992 und 1997; Freyssenet 1999).

Die Abwägungen über den Einsatz von Technologie werden vor dem Hintergrund spezifischer Produkte, Produktionssysteme und Unternehmensstrategien, aber auch teilweise spezifischer Qualifikationssysteme und industrieller Beziehungen gemacht (Noble 1979; MacKenzie/Wajcman 1985; Wajcman 2006). Dies wird aus einer international-komparativen Perspektive deutlich. So zeigte die Forschung über Automatisierungsansätze der 1980er und 1990er Jahre, dass die Produktionssysteme japanischer Automobilhersteller stark vom Ziel der Flexibilität im Sinne einer schnellen Anpassung von Produktmix und Produktionsmengen an die Marktnachfrage bestimmt waren. In der Automatisierung wurde von den Unternehmen nur dann Kostensenkungspotential gesehen, wenn die gewünschte Flexibilität gewährleistet werden konnte (Jürgens et al. 1993;

Adler 1988; Fujimoto 1992; MacDuffie/Pil 1997; Daito 2000). Dies implizierte die Präferenz für einfachere und robuste Lösungen und im Zweifelsfall auch Verzicht auf Automatisierung. Im Unterschied zu japanischen Unternehmen sahen europäische Unternehmen – vor allem VW und Fiat – hingegen in einer „High-tech“-Automatisierung die Voraussetzung für eine hohe Qualität und Produktivität – die flexible Anpassung der Produktion wurde (zumindest in den 1980er Jahren) als weniger wichtig erachtet. Bis in die 1980er Jahre hatten amerikanische Unternehmen (insbesondere General Motors) ebenfalls auf High-tech-Automatisierung gesetzt, hatten damit jedoch ein Fiasko erlebt (Ingrassia/White 1994). Seit Ende der 1980er Jahre setzte sich in den USA zunehmend die Wahrnehmung durch, dass die High-tech-Automatisierung zu rigide und fehleranfällig war (Adler 1988; Jürgens et al. 1988).

In den 1990er Jahren veränderte sich die Situation aufgrund von zwei unterschiedlichen Entwicklungen. Die erste Entwicklung war der „Japan-Schock“ ausgelöst durch den Erfolg der japanischen Unternehmen in den USA und später in Europa sowie durch eine Reihe von Studien, die die Überlegenheit der japanischen Produktionskonzepte belegten – die bekannteste Studie von Womack et al. (1991) trug maßgeblich dazu bei, das Konzept der Lean Production bekannt zu machen (zum Konzept vgl. Krafcik 1988). Die Lean Production nahm wesentliche Elemente japanischer Produktionskonzepte auf und relativierte die Orientierung der amerikanischen und europäischen Automobilunternehmen an der High-tech-Automatisierung (vgl. Liker 2004 zu der eher automatisierungsskeptischen Perspektive der Lean Production). Die zweite Entwicklung waren aufkommende Arbeitskräfteknappheiten und Arbeitskonflikte in Japan und Europa, die zu einer verstärkten Berücksichtigung von Ergonomiezielen und auch der Verbesserung der Arbeitsqualität führten (vgl. Fujimoto 1997; Niimi/Matsudaira 1997; Sandberg 1994; Jürgens 1995; Berggren 1997; Krzywdzinski 2020). Für den im Fokus dieser Studie liegenden Vergleich zwischen Deutschland, Japan und den USA liegen leider seit Ende der 1990er Jahre keine Analysen vor, insbesondere im Hinblick auf Längsschnittstudien von Unternehmen.

Im Hinblick auf die Auswirkungen von Automatisierungsansätzen auf Arbeit spielen schließlich *arbeits- und organisationspolitische Leitbilder* eine wichtige Rolle (vgl. Schumann et al. 1994; Baethge-Kinsky et al. 2018), die sich zwischen den Unternehmen stark unterscheiden können (Jürgens et al. 1993; Liker et al. 1999; Boyer/Freyssenet 2000; Krzywdzinski 2017). In der deutschen Automobilindustrie ging die Orientierung an einer High-tech Automatisierung in den 1980er und 1990er Jahren mit einer Aufwertung von Produktionsarbeit und Orientierung an Fachlichkeit einher (Kern/Schumann 1984; Jürgens et al. 1993; Kuhlmann 2004; Krzywdzinski 2020). Dies galt zumindest in hoch automatisierten Bereichen wie dem Karosseriebau, während manuell geprägte Bereiche wie die Montage weiterhin auch von hohen Anteilen angelernter Arbeitskräfte geprägt blieben (wenngleich zumindest die Automobilhersteller auch in Montagebereichen immer mehr Arbeitsplätze mit Facharbeitern aus der eigenen Ausbildung besetzten; vgl. Jürgens et al. 2012). Diese Orientierung setzt sich bis heute fort (Baethge-Kinsky et al. 2018). Auch die Flexibilität betonenden Automatisierungsansätze der japanischen Unternehmen gingen mit einer starken Betonung von Qualifizierung und Personalentwicklung einher, die die Produktionsarbeiter einschloss. Diese nahm allerdings nicht die Form einer formalen Berufsausbildung, sondern unternehmensinterner Entwicklungswege an (Krzywdzinski/Jürgens 2019; Jürgens/Krzywdzinski 2016). Im amerikanischen Fall berichteten hingegen die Studien der 1980er und 1990er Jahre von einer fortgesetzten Orientierung an tayloristischen Formen der Arbeits-

organisation, anhaltend engen Arbeitsplatzdemarkationen und sehr begrenzten Investitionen in Qualifizierung (Jürgens et al. 1993; Adler/Cole 1993) – eine Entwicklung, die sich auch in den 2000er Jahren fortgesetzt hat (Rothstein 2016).

Anzumerken ist hier, dass sich die von den Unternehmen erhofften Auswirkungen der Automatisierung (bzw. des technischen Wandels im Allgemeinen) oftmals erst einstellen, wenn sie mit Veränderungen der Organisationsstrukturen einhergehen (vgl. die Beiträge in Jürgens 1997). Die Effekte von Technik und Organisation lassen sich somit oftmals kaum voneinander separiert betrachten. Ein wichtiges Ergebnis der Diskussion über die Lean Production war beispielsweise, dass die Art der Prozessorganisation einen zentralen Einfluss auf die Produktivität hatte (Womack et al. 1991). Die Einführung von Lean Production ging zwar auch mit technischen Innovationen einher, diese gewannen ihre Bedeutung allerdings vor allem als Unterstützung der organisatorischen Veränderungen – die schlanke Gestaltung der Prozesse war die Voraussetzung, um sinnvolle Automatisierungsschritte vollziehen zu können (Butollo et al. 2018; Adler/Cole 1993). Die klassische Studie von Womack et al. (1991) betonte sogar, dass die effizientesten Werke durch die niedrigsten Automatisierungsgrade gekennzeichnet waren.

Genauso komplex wie die Analyse von Automatisierungsansätzen ist auch jene der Digitalisierung von Arbeitsprozessen. Der Begriff der Digitalisierung bezeichnet ganz allgemein die Umwandlung analoger Informationen in ein digitales Format. Übertragen auf die Arbeitswelt lässt er sich verstehen als Vernetzung und Aufbau von Softwaresystemen sowie digitalen Datenbeständen zur Überwachung, Steuerung und Optimierung von Arbeitsprozessen (Hirsch-Kreinsen/ten Hompel 2015). In diesem Sinne überlappt sich Digitalisierung nur teilweise mit Automatisierung. Sie kann durchaus in manchen Fällen Automatisierung bedeuten, etwa wenn bestimmte Berechnungen und Visualisierungen, die zuvor von Menschen gemacht wurden, nun von der Software automatisch erstellt werden. Ein Beispiel sind die auf der Basis von CAD-Systemen erstellten virtuellen Prototypen, mit denen Simulationen im Hinblick auf Geräuscentwicklung, Festigkeit etc. automatisch berechnet werden können, was früher reale Tests an physischen Prototypen erfordert hätte. In anderen Fällen bedeutet Digitalisierung aber auch, dass gänzlich neue Handlungsoptionen geschaffen werden, die früher nicht verfügbar waren – dass es sich also nicht um Automatisierung handelt. Im Fall der erwähnten virtuellen Prototypen ist beispielsweise ein enorm schnelles Ausprobieren und Besichtigen von Designoptionen möglich, das früher aufgrund des erforderlichen Aufwands nur in Form von Zeichnungen realisierbar gewesen wäre.

Im Fokus der Digitalisierung steht die Wissensarbeit. Mit Wissensarbeit ist hier keine spezifische Beschäftigtengruppe gemeint, sondern die Ausrichtung von Digitalisierungsprozessen auf die Vernetzung von Produktionsanlagen und die Intensivierung der Erhebung, Analyse und Nutzung von Prozessdaten für die Überwachung und Optimierung von Arbeits- und Produktionsprozessen. Deutlich wird dies in der Diskussion über Industrie 4.0 (Acatech/Forschungsunion 2013; Spath et al. 2013). Wie Butollo et al. (2018) herausarbeiten, bezeichnet Industrie 4.0 kein kohärentes Produktionsmodell, sondern eher ein Bündel von sehr unterschiedlichen technischen Entwicklungen. Auch wenn sich die öffentliche Diskussion sehr stark auf das Thema „Roboter“ und damit die potentielle Automatisierung manueller Arbeit konzentriert, liegt der Fokus der Industrie 4.0 eher auf Tätigkeiten in der Überwachung und Instandhaltung von Produktionsprozessen, auf Planungs-, Optimierungs- und Entwicklungstätigkeiten – also auf Wissensarbeit.

Wissensarbeit kombiniert Prozesse der Wissensgewinnung, der Wissensobjektivierung und der Wissensrückübertragung (Malsch 1987). Bei der Wissensgewinnung werden sowohl standardisierte – also algorithmisch darstellbare – Vorgehensweisen als auch Erfahrungen eingesetzt; die Wissensobjektivierung bedeutet die Systematisierung von Wissen durch klare Benennung von Regeln, Zusammenhängen etc. Wissensrückübertragung bedeutet die Übersetzung des objektivierten Wissens in Anwendungswissen. Deutlich wird hier, dass Wissensarbeit ein permanentes Hin und Her zwischen objektivierten, algorithmisierbaren Verfahren und erfahrungsgelenkten sowie kreativen Tätigkeiten bedeutet – eine Reihe von Studien argumentiert, dass gerade die nicht objektivierbaren, auf Erfahrung und Interaktion beruhenden Wissensbestandteile immer wichtiger werden (vgl. Rammert 1999; Wilkesmann 2005). Digitalisierung kann die Automatisierung der algorithmisch darstellbaren Elemente von Wissensarbeit bedeuten; im Hinblick auf die kreativen Tätigkeiten geht es hingegen vor allem um technische Unterstützung.

In der Forschung über die Industrie 4.0 wird nun kontrovers diskutiert, inwieweit hier ein Schub an Objektivierung von Wissen und dementsprechend ein Wandel der Qualifikationsanforderungen und Handlungsspielräume der Beschäftigten stattfindet (vgl. Acatech 2015; Günther et al. 2015; Boes et al. 2016; Butollo et al. 2018). Die meisten Studien sehen allerdings wenig Automatisierungsgefahr: selbst die bereits erwähnte Frey-und-Osborne-Studie (2013) schätzt die Wahrscheinlichkeit der Automatisierung von Tätigkeiten von Ingenieuren, Informatikern und Softwareentwicklern auf niedrige einstellige Prozentwerte. Mit diesen Argumenten wird ein langer Diskussionsstrang aktualisiert, der ebenfalls mindestens bis in die 1980er und 1990er Jahre zurückreicht. Bereits damals hatten zwar am Beispiel der Einführung von Computer-Aided-Design-Systemen (CAD) einzelne Studien eine Gefahr der Automatisierung von Ingenieursarbeit gesehen (Shaiken 1984), die meisten Analysen betonten aber die Widersprüchlichkeit von Entwicklungen (Giordano 1992; McLoughlin 1989 und 1990) und stellten die Möglichkeit der Automatisierung von Ingenieurstätigkeiten durch CAD grundsätzlich in Frage (Salzmann 1989). Bisher mangelt es allerdings an langfristig und vergleichend angelegten Tiefenanalysen von Unternehmen, mit denen an die Diskussionen der 1980er und 1990er Jahre angeknüpft werden könnte.

Angesichts einer bisher häufig fehlenden empirischen Grundierung von Diskussionen über Automatisierung, setzt die hier vorliegende Studie auf eine genaue historische Rekonstruktion des Wandels von Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen sowie Beschäftigungsentwicklungen. Da unternehmensbezogene Daten und Analysen fehlen, wird dabei auf Quellen auf der Industrieebene zurückgegriffen und versucht, die länderspezifischen Entwicklungen des Automobilsektors als Ganzes zu untersuchen. In den hier genutzten Daten fehlen insbesondere Informationen über den Wandel der Organisationsstrukturen im Allgemeinen und der Arbeitsorganisation im Besonderen. Die Veränderungen im Bereich der Arbeitsorganisation werden daher nur indirekt über die Analyse der Beschäftigungsstrukturen nach Tätigkeitsgruppen angesprochen.

3. Datengrundlage der Studie

In der vorliegenden Analyse werden Daten aus vier statistischen Quellen kombiniert und mit einer Analyse der Fachpresse im Feld der Automatisierung ergänzt.

3.1 Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze

Die Analyse der Automatisierungsansätze kombiniert einen qualitativen und einen quantitativen Ansatz. Im ersten Schritt wurde eine qualitative Auswertung der Fachpresse genutzt, um die Entwicklung von Automatisierungsansätzen zu rekonstruieren. Der Fokus liegt dabei auf drei Bereichen: der Montage, dem Karosseriebau sowie den indirekten Bereichen der Produktentwicklung, Planung und Fertigungssteuerung. Als zentrale Quelle wurden 393 Artikel der deutschsprachigen Branchenzeitschrift *Automobil Produktion* herangezogen, die monatlich über Entwicklungen in der Automobilbranche berichtet. Eine besondere Stärke der *Automobil Produktion* ist, dass sie neben Nachrichten über Markt- und Produktentwicklungen auch technische und organisatorische Entwicklungen in der Produktion wie auch in der Produktentwicklung, Planung, Qualitätssicherung und weiteren Bereichen behandelt. *Automobil Produktion* berichtet über die globale Automobilindustrie, hat jedoch einen Schwerpunkt auf Deutschland und Europa. Um die Entwicklung der amerikanischen und der japanischen Automobilindustrie einzufangen, wurden ergänzend 46 Artikel der *Automation World*, der *Automotive Manufacturing Solutions* sowie weiterer Publikationen herangezogen. Die Vorgehensweise wird genauer im Anhang beschrieben. Die Quellen werden in der Analyse mit Namenskürzeln zitiert: AP (*Automobil Produktion*), AW (*Automation World*) und AMS (*Automotive Manufacturing Solutions*).

Hervorzuheben ist, dass eine solche Analyse der Fachpresse keine systematische Längsschnittanalyse eines Unternehmens (oder einer Gruppe von Unternehmen) ermöglicht und eine solche nicht ersetzen kann (vgl. dazu Jürgens 2020). Vielmehr werden die Artikel der Fachpresse dazu genutzt, um ein Bild der Entwicklung von Automatisierungsansätzen für die gesamte Automobilbranche der untersuchten Länder zu charakterisieren – was natürlich die vielen Unterschiede zwischen den Unternehmen nicht erfasst.

Im zweiten Schritt wurden die Automatisierungsansätze mit Hilfe eines quantitativen Indikators betrachtet, nämlich des Bestands an Industrierobotern in der Automobilbranche. Die statistische Quelle ist die Datenbank der International Federation of Robotics (IFR), der Angaben über den Bestand an Industrierobotern in der Automobilindustrie in Deutschland, den USA und Japan entnommen wurden. Auch hierzu finden sich genauere Informationen im Anhang.

3.2 Beschäftigungsstrukturen

Die Analyse der Automatisierungsansätze wird in der hier vorliegenden Studie mit einer Analyse des Wandels von Beschäftigungsstrukturen verbunden. Es geht darum zu prüfen, wie sich Beschäftigungsstrukturen verändert haben und inwieweit ein Zusammenhang mit der Entwicklung der Automatisierungsansätze bestehen könnte. Bei der Analyse wird die Entwicklung von Tätigkeitsgruppen innerhalb der Produktionsarbeiterschaft, aber auch innerhalb der Angestell-

tenbereiche (z.B. der Ingenieure und Informatiker) rekonstruiert. Das Ziel ist ein genaues deskriptives Bild der Entwicklung.

Für die Darstellung der Entwicklung der absoluten Beschäftigungszahlen werden die Angaben genutzt, die vom VDA in seinen International Auto Statistics zusammengetragen werden. Darüber hinaus werden Statistiken über die Zusammensetzung der Beschäftigung in der Automobilbranche nach Tätigkeitsgruppen genutzt – diese werden in den statistischen Quellen zwar als „Berufsgruppen“ (occupational groups) bezeichnet, die Zuordnung basiert aber eher auf dem Tätigkeitsfeld als auf dem Berufsabschluss, daher wird im Folgenden der Begriff Tätigkeitsgruppe verwendet.

Für die Analyse wurden jeweils nationale Datenquellen aus den USA, Deutschland und Japan genutzt. Für die USA werden die Daten der Occupational Employment Statistics (OES) des Bureau of Labor Statistics (BLS) herangezogen. Im Rahmen der OES werden halbjährlich Angaben über Beschäftigung, Berufe und Lohnhöhen für Beschäftigte in der amerikanischen Wirtschaft erhoben. Dabei werden jeweils etwa 180.000 bis 200.000 Betriebe befragt. Die Angaben der Betriebe werden vom BLS auf die Gesamtbeschäftigung hochgerechnet. Da die befragten Betriebe wechseln (und es sich somit um keine Panelstudie handelt), sind die Veränderungen zwischen den Jahren mit einer gewissen Vorsicht zu behandeln. Für Japan liegen keine jährlichen Berufsstatistiken vor, die beste Quelle ist vielmehr der Population Census, der alle fünf Jahre vom Statistics Bureau of Japan (SBJ) durchgeführt wird und die gesamte Bevölkerung umfasst. Die Daten für den Fall der deutschen Automobilindustrie stammen von der Bundesagentur für Arbeit (BA). Die Bundesagentur erstellt jährliche Beschäftigungsstatistiken basierend auf den Meldungen der Arbeitgeber zur Sozialversicherung. Diese Meldungen werden über die Kranken- und Rentenversicherungsträger an die Bundesagentur übermittelt und erfassen alle Beschäftigten.

In der hier untersuchten Zeit gab es in den genutzten Statistiken eine Reihe von Veränderungen der zugrundeliegenden Klassifikationssysteme. Diese werden in der folgenden Analyse markiert, da sie die Vergleichbarkeit der Daten im Zeitverlauf einschränken. Eine genaue Erläuterung der Klassifikationssysteme (und auch der für sie in der Darstellung verwendeten Kürzel) sowie ihrer Veränderungen im Zeitverlauf findet sich im Anhang.

4. Historische Entwicklung der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze

Mitte der 1980er der Jahre herrschte in der Automobilindustrie noch Automatisierungseuphorie. Sie war gut begründet, denn in der langen Geschichte der Branche waren erhebliche Erfolge der Automatisierung erzielt worden. Die mechanische Bearbeitung von Metallteilen war durch die Einführung von Einzweckmaschinen bei Ford in den 1920er Jahren, die Entwicklung von NC-Maschinen in den 1940er Jahren und CNC-Maschinen in den 1970er Jahren automatisiert worden (Jürgens 2020; Hsieh et al. 1997; Noble 1979). In den 1970er und 1980er Jahren war durch die Einführung von Schweißvorrichtungen und Schweißrobotern der Karosseriebau weitgehend automatisiert worden, zumindest in den Vorreiterwerken der Automobilindustrie (vgl. Milkman/Pullman 1991; Kern/Schumann 1984; Jürgens et al. 1993). In den 1980er Jahren setzten sich Großpressen und Pressstraßen in den Presswerken durch, die auch dort den Anteil manueller Arbeit stark zurückdrängten. Montageprozesse waren die letzten Bastionen der manuellen Arbeit,

aber es gab in den 1980er Jahren auch hier Versuche einer stärkeren Automatisierung (Heßler 2014; Fraunhofer IPA 1988).

In Deutschland galten Daimler und Volkswagen – hier vor allem die Halle 54 des Wolfsburger Werks – als Vorreiter (Heßler 2014; Fraunhofer IPA 1988). Aber auch die japanischen Unternehmen gehörten bis Anfang der 1990er Jahre zu Vorreitern der Automatisierung (vgl. Coffey/Thornley 2006). In einer Artikelreihe berichtete die Zeitschrift *Automobil Produktion* im Jahr 1993 über drei Automobilwerke: Toyota Tahara, Mazda Hofu und Nissan Kyushu². Alle drei Werke zeichneten sich durch eine nahezu vollständige Automatisierung des Karosseriewerks aus, d.h. nicht nur das Pressen und das Schweißen wurden automatisch durchgeführt, auch das Materialhandling wurde weitestgehend von Robotern erledigt. Ein besonderer Stolz der japanischen Werke war die Flexibilität der Automatisierung im Karosseriewerk: durch rotierende Spannvorrichtungen konnten die Unternehmen mehrere Modelle auf einer Karosseriebaulinie produzieren. Der Transport von Unterbaugruppen im Karosseriewerk übernahmen Fahrerlose Transportsysteme (FTS). Bei der Automatisierung von Montageprozessen wurden Werte zwischen 15% (Toyota³) und 20% (Nissan⁴) erreicht.

Anfang der 1990er Jahre kam es jedoch zu einer Neuorientierung der Strategien. Die Abkühlung der Konjunktur führte die Schwäche der hochautomatisierten Werke vor: Überkapazität und drückende Fixkosten. Mit der Lean Production gewann zudem ein neues Managementkonzept an Resonanz, das organisationale Restrukturierung und weniger die Automatisierung in den Vordergrund stellte.

4.1 Wandel der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze – Analyse der Fachpresse

Die Neuorientierung der Automatisierungsansätze der Unternehmen begann ab 1993/94, nahm allerdings je nach Bereich einen unterschiedlichen Weg, so dass sie im Folgenden für drei unterschiedliche Bereiche differenziert betrachtet wird: Montagebereiche, den Karosseriebau (als Beispiel eines bereits in den 1980er Jahren hoch automatisierten Bereichs) und die indirekten Bereiche von der Produktentwicklung über die Planung bis hin zur Fertigungssteuerung.

Entwicklung der Automatisierungsansätze in der Montage

In den Montagebereichen war die in den 1990er Jahren vollzogene Infragestellung der früheren Automatisierungsstrategien am stärksten ausgeprägt. Im Fokus der Reorganisation der Montagebereiche stand in den 1990er Jahren die Umsetzung einer klaren Flussorientierung⁵ der Fertigung und des Just-in-time-Prinzips. Hinzu kam die Modularisierung der Prozesse und die Ausla-

² AP April/Juni/August 1993

³ AP Juni 1993

⁴ AP August 1993. Von Robotern oder Automaten wurden bei Nissan beispielsweise die Rückleuchten, die Front- und Heckscheibe, die Sitzanlage, die Batterie, die Räder und das Reserverad, die Gummidichtungen an den Türen, die Stoßfänger und die Motoren montiert.

⁵ Gemäß dem Flussprinzip wird die Produktion in verkettete und synchronisierte Folgen von Arbeitsschritten unterteilt. Die Produkte bewegen sich in dieser Kette gleichmäßig, so dass jeweils alle Arbeitsstationen ausgelastet sind.

gerung von Modulen (z.B. Motor, Türen, Cockpit etc.) in abgeschlossene Vormontagebereiche (zur Modularisierung vgl. Salerno 2001; Ro et al. 2007; MacDuffie 2013).

Allerdings zeigten sich Differenzen zwischen deutschen, japanischen und amerikanischen Unternehmen. In japanischen Unternehmen wurde Montageautomatisierung reduziert, im neuen Toyota-Werk in Kyushu wurde auf Montageautomatisierung sogar weitgehend verzichtet.⁶ Auch wenn sich nicht alle japanischen Unternehmen von der Idee der Montageautomatisierung so stark abwandten wie Toyota (vgl. zu Nissan Cusumano 1985), so waren die 1990er doch in der japanischen Automobilindustrie durch eine skeptische Haltung gegenüber Montageautomatisierung gekennzeichnet.

Genauso wie die japanischen Unternehmen schwenkten auch die amerikanischen Firmen in den 1990er Jahren weg von der Montageautomatisierung. Die Neuanläufe von Fahrzeugen in den Ford- und GM-Werken seit Mitte der 1990er Jahre gingen mit einer Reduktion der Automatisierung in den Montagebereichen einher. Automatisiert blieben die „Hochzeit“ (das Zusammenführen der Karosserie mit dem Antriebsstrang) und das Einkleben der Scheiben, auf weitere Automatisierungsschritte wurde zumeist verzichtet.⁷ Der Produktionsdirektor von Ford Europe formulierte die Strategie folgendermaßen:

„Eine unserer Besonderheiten ist, dass wir in der Endmontage sehr wenig Automation einsetzen. Daran wird sich auch in Zukunft grundsätzlich nichts ändern. [Als Vorbild dientel beispielsweise die Erfahrung fernöstlicher Hersteller, die vor einigen Jahren bereits vorhandene Automation demontierten, da Automation in der Endmontage eine kontinuierliche und maximale Steigerung der Produktivität nicht nur behindert, sondern mitunter sogar völlig unmöglich macht.“ (AP Dezember 2000, S. 32)

Die deutschen Unternehmen, allen voran Volkswagen, vollzogen die Abkehr von der Montageautomatisierung allerdings nur begrenzt mit. Die Modernisierung des Daimler-Werks in Rastatt für den Neuanlauf der A-Klasse im Jahr 1997 ging mit einer Ausweitung der Montageautomatisierung einher, die auch durch Ergonomieziele begründet wurde.⁸ Auch beim Anlauf des neuen Golf A4 im VW-Werk Wolfsburg 1997 wurde die Automatisierung der Montage von 30% auf 33% gesteigert.⁹

⁶ AP September 1994

⁷ AP Februar 1995 und August 1995

⁸ AP Extraausgabe A-Klasse 1997; vgl. auch AP Extraausgabe S-Klasse 1998. Die Hecktür, die Sitze, das Pedalmodul, die Räder, das Lamellendach, die Türdichtungen, die Scheiben, der Himmel, die Batterie- und die Ersatzradmulde wurden automatisch montiert, auch die „Hochzeit“ war automatisiert.

⁹ AP Extraausgabe Golf A4 1997. Die gesamte Fahrwerksmontage (Hilfsrahmen, Lenkgetriebe, Querlenker, Stabilisator, Motor, Vorderachse), die „Hochzeit“, der Einbau von Batterie, Rädern, Pufferstange und Frontend waren automatisiert. Zudem wurden viele Verschraubungsprozesse teilautomatisiert.

Der Einfluss der von japanischen und amerikanischen Unternehmen geführten Abkehr von der Montageautomatisierung macht sich allerdings in den Auslandswerken deutscher Unternehmen bemerkbar. Das neue Daimler-Werk in Tuscaloosa, Alabama verzichtet weitgehend auf Montageautomatisierung (AP Oktober 1997), im Fall von Volkswagen gilt das modernisierte Seat-Werk im spanischen Martorell als Vorbild einer neuen Strategie, die kaum Automatisierung in der Montage einsetzt; die Werke in Bratislava und Pamplona folgen diesem Muster (AP Juni 2001; AP Februar 2002).

In den 2000er Jahren gab es im Hinblick auf die Automatisierung der Montage in den deutschen Automobilwerken kaum Bewegung,¹⁰ in anderen Bereichen – etwa den Motorenwerken – wurden aber auch größere Automatisierungsschritte vollzogen.¹¹ Insbesondere Daimler arbeitete allerdings an weiteren Automatisierungsschritten für die Montage. 2009 wurde das Konzept „Montage 21“ vorgestellt, das mehr Automatisierung bedeutete. Als Beispiel präsentierte Daimler die Hinterachsenmontage, die von einem manuellen Prozess mit Unterstützung von zwei Robotern auf ein stark automatisiertes Konzept mit 45 Robotern umgestellt wurde, wobei sich die Zahl der Montagearbeiter halbierte.¹² Grundlage der Automatisierung war eine Entflechtung der automatisierbaren und manuellen Arbeitsschritte und Optimierung der Materialzuführung. Kurzzyklische Routenzüge versorgten die Anlage aus dem Zentrallager, um so Platz für die Roboter zu schaffen.

Einen neuen Schub bekam die Diskussion über die Automatisierung der Montage in den 2010er Jahren mit den ersten Leichtbaurobotern, die auf den Markt kamen. Leichtbauroboter sind in wörtlichem Sinne leichte, den menschlichen Armen nachempfundene Roboter, die relativ flexibel für Montagearbeiten eingesetzt werden können – allerdings immer noch mit sehr großen Einschränkungen, denn bislang sind die Roboter sehr langsam und können nur in einer sehr standardisierten und starren Umgebung arbeiten (vgl. Pfeiffer 2019).¹³ Nichtsdestotrotz begannen deutsche Automobilunternehmen in den 2010er Jahren damit, Leichtbauroboter an einfachen Arbeitsplätzen in der Montage auszuprobieren: z.B. beim Montieren von Getriebekomponenten (Daimler¹⁴) oder beim Einkleben von Schallisierungen an die Türen (BMW¹⁵). Mitte der 2010er Jahre erlebten zudem FTS ein Comeback in der Intralogistik von Produktionsstandorten in der Automobilindustrie.¹⁶

Dass Automatisierung der Montage auf der Agenda der deutschen Automobilunternehmen bleibt, zeigt die Entwicklung des Volkswagen-Werks in Zwickau, wo 2019 die Produktion des neuen Elektroautos ID.3 angelaufen ist. Volkswagen präsentiert Zwickau als das Modellwerk für die Produktion seiner Elektrofahrzeuge und betont dabei explizit die Automatisierung der Montage (Volkswagen 2020): so sei der Automatisierungsgrad in Zwickau von ehemals 12% auf nun 30% gesteigert worden.¹⁷ Die steigende Automatisierung hängt dabei auch mit dem Wandel der Produktarchitektur zusammen: bei den in Zwickau produzierten Elektrofahrzeugen ist der Antriebsstrang deutlich einfacher als im Fall von Autos mit Verbrennungsmotor – dies reduziert deutlich die Zahl und Komplexität der Montageschritte im Motorraum und beim Antriebsstrang. Wenngleich Volkswagen selbst das Ziel der Erhöhung der Montageautomatisierung betont,¹⁸ ist aber

¹⁰ AP Dezember 2005

¹¹ AP Juli 2010

¹² AP Januar 2009; vgl. AP Juni 2013

¹³ AP Juni 2019

¹⁴ AP November 2015

¹⁵ AP Oktober 2015

¹⁶ AP April 2014, September 2015, April 2017; AMS April 2016

¹⁷ Die automatisierte Montage umfasst neben der „Hochzeit“ das Anbringen der Türdichtung, das Auflegen des Glasdaches, das Einbauen der Hinter- und Vorderachse, das Montieren des Cockpits, das Verschrauben des Fahrwerks, das Einstellen der Scheinwerfer, das Feinjustieren des Fahrwerks und die Qualitätskontrolle von Spalt und Bündigkeit der Türen (Volkswagen 2020).

¹⁸ AP September 2018

auch darauf hinzuweisen, dass mit den in Zwickau umgesetzten Automatisierungsschritten ein Niveau erreicht wird, das im VW-Werk Wolfsburg bereits in den 1990er Jahren umgesetzt wurde.

Der Unterschied der Entwicklungen in Deutschland und Japan lässt sich am Kontrast zwischen der beschriebenen Entwicklung bei Volkswagen und jener bei Toyota festmachen. Wie oben beschrieben, liegt der zentrale Fokus der Organisation der Montageprozesse bei Toyota auf Kostenreduktion und Flexibilität und das bedeutet eher eine Begrenzung oder manchmal auch Reduktion der Automatisierung. Der oben beschriebene Rückbau der Montageautomatisierung in den 1990er Jahren setzte sich in den 2000er Jahren fort. In den 2010er Jahren wurden für die Montagebereiche Toyotas Automatisierungsgrade von unter 10% berichtet (Rothfelder 2017). Die aktuellste Entwicklung repräsentiert dabei das Werk Takaoka (vgl. zum Folgenden Schmitt 2019).¹⁹ Im Takaoka-Werk finden sich zwei Montagebereiche. Takaoka 1 unterscheidet sich wahrscheinlich nicht sehr stark von den Montagelinien in Deutschland, nur dass sie sicherlich mit weniger Automatisierung operiert. Takaoka 2 verzichtet komplett auf Automatisierung. Die Fahrzeuge bewegen sich durch die Montage auf FTS, auf ein Fließband wird verzichtet. Da die Stationen ohne jede Automatisierung auskommen, können sie innerhalb kürzester Zeit umgebaut werden. Takaoka 1 hat ein Kostenoptimum bei 200.000 Fahrzeugen pro Jahr. Steigt die Produktion höher, übernimmt Takaoka 1, da dort die Kapazitäten flexibel hoch- und runtergefahren werden können.²⁰

Auch die amerikanischen „Big Three“ (General Motors, Ford und Chrysler) bleiben im Hinblick auf die Möglichkeiten der Automatisierung der Montageprozesse skeptisch, wenngleich sie wie die deutschen Hersteller mit dem Einsatz von Leichtbaurobotern und weiteren Automatisierungstechniken experimentieren.²¹ So nutzt General Motors (GM) in seinem Orion-Werk sechs Leichtbauroboter für das Kleben des Dachhimmels, das Einlegen der Ersatzreifen, das Justieren der Lichter und für das Testen von Sensoren. Bei den meisten Neuanläufen in Werken des Unternehmens bleibt jedoch der Automatisierungsgrad in der Montage sehr niedrig.²²

Grundsätzlich lässt sich also feststellen, dass sich die deutschen Unternehmen der Automobilindustrie nicht im gleichen Maße von der Idee der Montageautomatisierung abwendeten, wie dies in

¹⁹ Vgl. auch AMS August 2017 zum Motomachi-Werk

²⁰ Eine gewisse Verwandtschaft zu dem Takaoka-Konzept zeigen Projekte der deutschen Automobilhersteller, die Montageprozesse zu flexibilisieren. Allerdings spielt in Deutschland Technik eine größere Rolle. So arbeitet Audi an modularen Montagekonzepten, die vom strikten Prinzip der verketteten Linie abweichen. Diese Systeme beruhen wie in Takaoka auf FTS. Allerdings liegt der Clue hier nicht in einer leichten Umbaufähigkeit der Montagebereiche, sondern in einer „smarten“ Steuerung der FTS und damit des Materialflusses. Seit 2015 setzt Audi bei der Montage des R8 in Neckersulm FTS zum Transport der Karossen ein. Dabei laufen bestimmte Derivate automatisch besondere Stationen an (z.B. Stoffdachmontage), die die meisten Karossen in der Produktion nicht anlaufen. Auf diese Weise wird eine automatische Flexibilität in das Montagesystem eingebaut. Zur Zeit ist diese Flexibilität auf wenige Sonderausstattungen beschränkt, allerdings wird die „modulare Montage“ in Neckersulm von Audi als ein Modellprojekt für die weitere Zukunft gesehen (AP September 2017). Dieser Ansatz bedeutet kein dezentrales System. Vielmehr wird durch einen zentralen Algorithmus basierend auf den Auftragseingängen die effizienteste Auslastung der Montagestationen und Logistikketten berechnet und sechs Tage im Voraus die Auftragsfolge in der Montage exakt festgelegt (AP April 2018).

²¹ AW April 2018; AMS Mai 2019

²² AMS September 2015

Japan und den USA der Fall war. Zugleich waren die Fortschritte der Montageautomatisierung in den letzten 30 Jahren relativ klein, so dass sich die heutigen Automobilwerke im Hinblick auf die Automatisierung der Montage nur an einzelnen Stationen von ihren Vorgängern unterscheiden.²³ Einen großen Sprung in der Montageautomatisierung hat übrigens jüngst Tesla gewagt – das grandiose Scheitern dieses Experiments wird in einem Artikel der New York Times (Boudette 2018) dargestellt.

Anzumerken ist schließlich, dass sich seit den 1990er Jahren automatisierte Unterstützungs- und Kontrollsysteme in den Automobilwerken ausgebreitet haben, und zwar unabhängig vom Herkunftsland des Unternehmens. Einerseits wurden immer mehr Hebehilfen, am Fließband mitfahrende Teilwagen und andere Hilfsmittel eingesetzt, um die Ergonomie der Montageprozesse zu verbessern. Hinzu kam die Nutzung von Assistenzsystemen, um die Qualität der Fertigungsprozesse zu optimieren. Dies begann ab Mitte der 1990er Jahre mit der zunehmenden Verbreitung von Schraubern mit automatischer Kontrolle von Drehmoment und Drehwinkel, wodurch fehlerhafte Verschraubungen minimiert wurden.²⁴ Ab Mitte der 1990er Jahre setzten Audi, BMW und weitere Unternehmen zudem Informationstafeln an Montagearbeitsplätzen ein, die auf der Basis einer vom Fahrzeug ausgelesenen Identifikationsnummer die Informationen über die jeweils benötigten Teile und Besonderheiten anzeigten und so den Arbeitern assistierten.²⁵ In den 2000er Jahren begannen Unternehmen wie Audi und Daimler, Hebehilfen zum Einbau von schweren Modulen wie dem Cockpit mit Lasersensoren auszurüsten, die die Größe der Fugen und die Positionierung des Moduls kontrollieren.²⁶ Seit den 2010er Jahren wird mit dem Einsatz von Datenbrillen, Smartwatches und anderen Geräten experimentiert, um Informationen in Montage- und Logistikprozessen zur Verfügung zu stellen (Evers et al. 2019).

Entwicklung der Automatisierungsansätze in Karosseriewerken

Im Unterschied zu den Montagebereichen waren die Karosseriewerke Anfang der 1990er Jahre bereits hoch automatisiert und eine Abkehr von der Automatisierung fand hier nicht statt. Selbst das Toyota-Werk in Kyushu, das in der Montage auf Automatisierung weitgehend verzichtete, unterschied sich im Karosseriewerk kaum von anderen hochautomatisierten Werken wie etwa Toyota Tahara.²⁷ In den Karosseriewerken wurde in den 1990er Jahren an den meisten europäischen, amerikanischen und japanischen Standorten ein Automatisierungsgrad von 90% bis zu 100% erreicht.

Wie Abbildung 1 zeigt, ging es daher seit den 1990er Jahren nicht um ein „mehr“ an Automatisierung – die Automatisierungsniveaus blieben weitgehend konstant –, sondern um eine Weiterentwicklung der Automatisierungskonzepte. Die Abbildung zeigt die in den Porträts deutscher Automobilwerke in der Zeitschrift *Automobil Produktion* berichteten Automatisierungsgrade des Karosseriebaus. Deutlich ist, dass seit den 1990er Jahren Automatisierungsniveaus von 90-100% erreicht wurden. Diese wurden in den industrialisierten Hochlohnländern übrigens so selbstver-

²³ AP Juli 2018.

²⁴ AP Februar 1993, Februar 1994

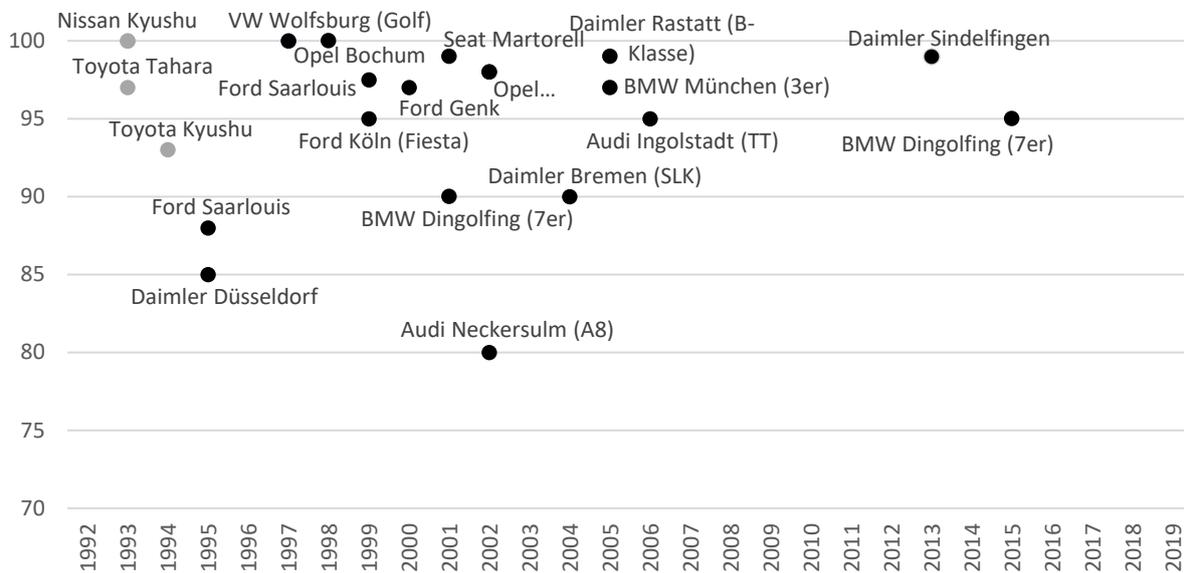
²⁵ AP April 1993

²⁶ AP Extraausgabe Audi A4 2001, AP Februar 2005

²⁷ AP September 1994

ständig, dass die Werkporträts der Zeitschrift ab etwa 2010 das Automatisierungsniveau gar nicht mehr quantifizieren.

Abbildung 1: Automatisierungsgrade im Karosseriebau von ausgewählten Automobilwerken (in %)



Quelle: Automobil Produktion, Jahrgänge 1992-2019. Aufgeführt sind alle Werke, für die Automatisierungsgrade berichtet wurden.

Anzumerken ist hier, dass die Automatisierung der Karosseriewerke zwar die weitgehende Zurückdrängung von Herstellungsarbeit (also direkter manueller Arbeit am Produkt) bedeutete, aber die sogenannte Gewährleistungsarbeit, d.h. die Überwachung, Bedienung und Wartung der Anlagen weiter von Menschen ausgeübt wurde und sogar an Bedeutung gewann (Kuhlmann 2004). Aus den Werken verschwand also das manuelle Schweißen, aber nicht menschliche Arbeit im Allgemeinen.

Der Wandel der Technik im Karosseriebau war seit den 1990er Jahren von mehreren Faktoren getrieben. Erstens führte die Orientierung an der Lean Production zu einer Reorganisation der Prozesse und Optimierung der Materialflüsse. Ein dominierender Ansatz war hier die Organisation des Karosseriebaus nach dem Fischgrätenlayout:²⁸ in der Mitte befindet sich die Hauptlinie, auf der die Karossen verschweißt werden; die Schweißlinien für die Unterbaugruppen (Seiten- teile, Dach, Türen etc.) werden wie Fischgräten so angeordnet, dass sie zur Hauptlinie führen und die jeweilige Unterbaugruppe jeweils an der richtigen Stelle neben der Hauptlinie fertiggestellt wird. Die Seitenlinien sind per Rollbahnen mit der Hauptlinie verbunden, von der die Roboter direkt greifen können. Auf diese Weise wurden Transportwege und auch der Bedarf an manuellen Einlegetätigkeiten minimiert. Zudem konnte auf die teuren und störungsanfälligen FTS verzichtet

²⁸ AP Extraausgabe A-Klasse 1997, Extraausgabe Golf A4 1997, AP Extraausgabe Opel Bochum 1998, AP Juni 1998, AP Januar 2000

werden, die ab Mitte der 1990er Jahre wieder zum großen Teil aus den Automobilwerken verschwanden.²⁹

Zweitens stieg seit den 1990er Jahren kontinuierlich die Vielfalt der Fügeverfahren im Karosseriebau, d.h. es ging darum, eine zunehmend komplexe Automatisierung zu beherrschen. Getrieben wurde dies durch mehrere Entwicklungen:

- Es stieg der Bedarf der Reduktion des Fahrzeuggewichts (um den Kraftstoffverbrauch zu senken), was zu vermehrtem Einsatz von Aluminium und Kunststoffen (neuerdings auch Karbon) neben dem üblichen Stahl in der Karosserie führte.³⁰ Das Schweißen von Aluminium ist deutlich schwieriger als von Stahl, da das Material viel stärker auf Wärme reagiert. Das führte zu einer Weiterentwicklung der Lasertechnik, aber auch zu einer verstärkten Hinwendung zu Klebetechniken, die ohne Wärmebildung auskommen.³¹ Auch der zunehmende Einsatz von Kunststoffteilen wirkte sich in einer Zunahme von Klebeprozessen im Karosseriebau aus.
- Darüber hinaus stiegen die Anforderungen an Fahrzeugsicherheit, Festigkeit der Karosserie und damit an die Qualität der Fügeprozesse. Seit den 1990er Jahren setzte sich daher immer mehr der Einsatz des Laserschweißens in den Automobilwerken durch,³² wobei insbesondere die deutschen Unternehmen den Einsatz in der Serienfertigung vorantrieben (Jürgens/Meißner 2005).³³ Seit Mitte der 2000er Jahre nahm der Einsatz von Mehr-Roboter-Zellen im Karosseriebau zu, was neue Anforderungen an die Programmierung stellte.³⁴ In diesen Zellen arbeiten mehrere Roboter zusammen: einer greift beispielsweise ein Teil, während andere dieses Teil bearbeiten oder die Qualität prüfen.
- Qualitätsanforderungen führten seit den 1990er Jahren zu einem zunehmenden Einsatz von Inline-Messgeräten und Geometriestationen, da sich bereits Abweichungen im Millimeterbereich auf die Steifigkeit der Karosserie, aber auch auf die Passung von Teilen auswirken können. In den 2010er Jahren waren die Produktionslinien im Karosseriebau bereits mit Einrichtungen ausgerüstet, die mehrere Hundert bis mehrere Tausend Messpunkte registrieren und Daten über die Qualität des Schweißprozesses liefern.

Drittens blieb angesichts der steigenden Komplexität der Automatisierung die Sicherung der Flexibilität eine besondere Herausforderung, insbesondere in Anbetracht der fortschreitenden Zunahme der Modellvarianten. Manche Unternehmen – etwa Daimler und Volkswagen – schwenkten aufgrund der steigenden Komplexität der Karosseriebauprozesse ab den 1990er Jahren dazu, die Flexibilität der Karosseriebaulinien einzuschränken und jeweils eine Modellfamilie auf einer Linie zu produzieren.³⁵ Andere Unternehmen hielten an dem Ziel der Flexibilität der Karosseriebaulinien fest, was die Entwicklung komplexer Spannvorrichtungen voraussetzt, die flexibel Bauteile unterschiedlicher Größe und mit unterschiedlichen Greifpunkten aufnehmen

²⁹ AP Februar 2002

³⁰ AP Mai 2017

³¹ AP Mai 2010; AP Juni 2011

³² AP April 1992, April 1998

³³ AP Oktober 1992, Dezember 1996, AP April 2008, AP Juni 2013

³⁴ AP April 2006

³⁵ AP Extraausgabe S-Klasse 1998

können.³⁶ Besonders erfolgreich bei der Flexibilisierung der Karosseriebauprozesse waren japanische Unternehmen, wobei die Flexibilisierungserfolge nicht die Folge einer ausgefeilten Digitalisierungsstrategie (oder gar einer Künstlichen Intelligenz) waren, sondern einer durchdachten Konzeption der Produktarchitekturen im Hinblick auf ihre „Manufacturability“ (Fujimoto 1997; Adler et al. 1999). Das Musterbeispiel ist die Anfang der 2000er Jahre von Toyota eingeführte New Global Body Line (vgl. Brown 2004). Bereits in den 1990er Jahren konnten auf Toyotas Karosseriebaulinien mehrere Fahrzeugmodelle produziert werden; die Flexibilität beruhte auf einem ausgefeilten System von Greifwerkzeugen und Paletten, mit denen die Teile der zu verschweißenden Karosserien gegriffen und positioniert wurden. Der Wechsel der Greifwerkzeuge kostete jedoch Zeit und ihre Aufbewahrung benötigte sehr viel Platz. Die zentrale Innovation der New Global Body Line lag darin, ein universelles Greifwerkzeug von oben in den Innenraum der Karosserie einzuführen, um die Teile zu fixieren. Durch die Standardisierung der Greifpunkte über eine Vielzahl von Fahrzeugmodellen konnten mit dem gleichen Werkzeug auf einer Linie bis zu acht Modelle produziert werden. Toyota schätzte die Einsparung bei den Kosten der Produktionsausrüstung auf 50% und bei den Anlaufkosten neuer Modelle auf 70%, weil die Ausrüstung kaum mehr umgestellt werden muss (Brown 2004).

Die Entwicklung der Karosseriebautechnik seit den 1990er Jahren ist also weniger von einer Zunahme der Automatisierung – der Karosseriebau in allen Werken deutscher, amerikanischer und japanischer Hersteller ist seit längerem weitestgehend automatisiert – als von einer inkrementellen Erhöhung der Komplexität geprägt. Produktivitätsfortschritte beruhen sehr stark auf Innovationen bei der Produktarchitektur sowie – wie Jürgens (2020) hinweist – auf organisatorischen Maßnahmen.³⁷

Entwicklung der Digitalisierung in indirekten Bereichen: hin zur „digitalen Fabrik“

Auch die so genannten „indirekten“ Bereiche von der Produktentwicklung über die Planung bis hin zur Qualitätssicherung (und etlichen weiteren Bereichen) durchliefen seit den 1990er Jahren einen tiefgreifenden technischen Wandel. Dieser Wandel lässt sich mit dem Begriff der Digitalisierung bezeichnen, der in dem hier genutzten Verständnis zwei Aspekte hat. Der erste Aspekt der Digitalisierung ist die Entwicklung von Softwaresystemen, die Standardisierung von Daten, ihre Sammlung, Aufbereitung und Zurverfügungstellung. Der zweite Aspekt ist die Nutzung der so

³⁶ AP Oktober 2007; AW Juni 2004 und Dezember 2013

³⁷ Potentiell disruptive Ansätze sind bislang noch weit von einer realen Umsetzbarkeit entfernt. So arbeitet der Roboterhersteller KUKA an einem modularen Organisationskonzept für den Karosseriebau, das vom Fischgrätenprinzip und einer starren Verkettung der Stationen abrückt (AP September 2016). Die Idee besteht in einer modularen Struktur von flexiblen Roboterstationen, die flexibel von FTS mit den zu bearbeitenden Karosserieteilen angefahren werden (Kuka 2016). Allerdings ist das Konzept noch weit von der Realisierung in der Praxis entfernt. Disruptiv könnte auch die Nutzung von 3D-Druck für die Serienproduktion sein, da sie die heute üblichen Fügeprozesse gänzlich ersetzen würde. Seit Mitte der 2010er Jahre hat sich der 3D-Druck in der Automobilindustrie in Deutschland, den USA und Japan im Bereich des Prototypenbaus durchgesetzt (AW November 2013). Einzelne Hersteller wie BMW bauen auch bereits einzelne Kleinserien von einigen Hundert bis einigen Tausend Stück von gedruckten Teilen in ihren Fahrzeugen ein (AP September 2015). Von der Nutzung in der Massenproduktion ist die Technik allerdings noch weit entfernt.

geschaffenen Datengrundlage für die Automatisierung von Berechnungen, Tests, Simulationen und Datenauswertungen. Digitalisierung ist also ein Prozess, der neue Handlungsmöglichkeiten und Tätigkeitsfelder eröffnet, zugleich aber auch die Grundlagen für Automatisierung schafft und Prozesse der Datenverarbeitung automatisiert.

Es lassen sich mehrere Treiber der Digitalisierung in der Automobilindustrie identifizieren, die seit den 1990er Jahren (und auch früher) wirksam waren. Erstens führte der Wettbewerb in der Branche dazu, dass die Hersteller die Modellvielfalt stark erhöhten und zugleich die Modellzyklen verkürzten (Chanaron/Lung 1999). Zweitens stiegen seit den 1990er Jahren die regulativen Anforderungen an die Fahrzeugsicherheit und Fahrzeugeffizienz (etwa im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch) (Krzywdzinski 2019). Beide Entwicklungen erhöhten massiv den Entwicklungsaufwand von Fahrzeugen und lenkten die Aufmerksamkeit der Unternehmen auf die Suche nach Produktivitätserhöhungen in diesem Bereich. Die Lean-Production-Ansätze griffen diese Entwicklung auf und formulierten Optimierungskonzepte für die Produktentwicklung, Planung, die Inbetriebnahme von Anlagen, die Instandhaltung und Logistik. In den 2000er und noch mehr 2010er Jahren kamen zudem verstärkt zwei neue Innovationsthemen in den Fokus, die massive Investitionen der Unternehmen in Entwicklungskapazitäten erforderten: Elektromobilität sowie Autonomes Fahren (McKinsey 2016; Groshen et al. 2019).

Bereits in den 1980er Jahren war deutlich geworden, dass japanische Automobilunternehmen nicht nur in der Produktion, sondern auch in der Produktentwicklung viel schneller und effizienter waren als ihre europäischen und amerikanischen Konkurrenten (Fujimoto 2000). Die Forschung zeigte zwar, dass die Stärke der japanischen Unternehmen in diesem Bereich nicht auf überlegenen technischen Lösungen, sondern auf effizienteren Organisationsstrukturen beruhte (Fujimoto 1997; Adler et al. 1999). Nichtsdestotrotz führte die Suche nach Rationalisierung der indirekten Bereiche auch zu Investitionen in technische Verbesserungen.

Im Folgenden wird die Entwicklung der Digitalisierung in der Automobilindustrie stark zusammengefasst am Beispiel der Produktentwicklung, Planung und Fertigungssteuerung dargestellt. Vergleichbare Entwicklungen gab es sicherlich auch in anderen Bereichen, etwa dem Supply-Chain-Management,³⁸ diese werden jedoch aus Platzgründen ausgeblendet.

Die Digitalisierungsansätze der 1990er Jahre lassen sich im Hinblick auf die hier untersuchten Bereiche folgendermaßen charakterisieren:

- *Produktentwicklung und Planung*: Der Fokus der Automobilunternehmen in Deutschland, Japan und den USA lag auf dem Vorantreiben des Einsatzes von Computer-Aided-Design-Software (CAD). Daimler meldete 1992, dass das neue Werk Rastatt die erste Fabrik sei, die zu 100% mittels CAD konzipiert und geplant wurde.³⁹ Auch bei Zuliefererunternehmen

³⁸ Die Durchsetzung der Lean Production und ihres Kerngedankens der Just-in-time-Anlieferung waren wichtige Treiber der Entwicklung von softwaregestützten Supply-Chain-Management-Systemen (Lamming 1996; MacDuffie/Helper 1997; Mudambi/Helper 1998). Dazu gehörte die Entwicklung der digitalen Kommunikation für die Feinabrufe der Teile von den Zulieferern. Ford setzte bereits Anfang der 1990er Jahre digitale Kommunikation für die Zuliefererabrufe ein, auch die Daimler-Werke wurden bei Neuanläufen entsprechend ausgerüstet (AP Februar 1993, Juli 1993).

³⁹ AP Juli 1992

setzte sich nun CAD als Standard durch.⁴⁰ Basierend auf CAD entstanden in den 1990er Jahren neue Anwendungen, die den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess veränderten. Neue Techniken wie Stereolithographie⁴¹ oder Fused Deposition Modelling⁴² nutzen CAD-Daten für Rapid Prototyping und beschleunigten den Entwicklungsprozess, da Prototypen schnell und einfach hergestellt werden konnten. Es kamen erste Softwareprogramme auf den Markt, die CAD-Daten für Simulation von Materialverhalten im Fertigungsprozess nutzten und damit den späteren Testaufwand reduzierten,⁴³ allerdings handelte es sich hier um jeweils auf Einzelprozesse spezialisierte Anwendungen. Der Einsatz von CAD sollte zudem Simultaneous Engineering erleichtern. Dabei ging es darum, direkt bei der Entwicklung von Fahrzeugen und Teilen mit den Zulieferern und den Produktionsausrüstern zu kooperieren und Daten auszutauschen, um Teile und Anlagen simultan (und nicht nacheinander) zu entwickeln.⁴⁴ Japanische Unternehmen waren Vorreiter des Simultaneous Engineering (Fujimoto 2000), aber europäische und amerikanische Unternehmen zogen nach. VW berichtete eine auf Simultaneous Engineering zurückgehende Verkürzung der Entwicklungszeit für den neuen Passat von 72 auf 27 Monate.⁴⁵ Allerdings waren dem Simultaneous Engineering in den 1990er Jahren noch Grenzen durch die fehlenden Standards bei CAD-Programmen gesetzt, was den Transfer von Daten zwischen Unternehmen erschwerte. Erst in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre wurden überhaupt einheitliche Datenstandards für CAD entwickelt (Jürgens 1997).⁴⁶

- *Fertigungssteuerung und Qualitätssicherung*: In den 1990er Jahren fanden die ersten Schritte in Richtung einer übergreifenden Vernetzung in der Produktion statt, mit dem Ziel einer besseren Visualisierung und Kontrolle sowie einer vereinfachten Produktionssteuerung.⁴⁷ Es fanden auch erste Projekte statt, bei denen Maschinen mit Sensoren ausgestattet wurden, deren Daten für die Kontrolle von Verschleiß und eine präventive Instandhaltung genutzt werden sollten.⁴⁸ Allerdings stieß diese Vernetzung in den 1990er Jahren noch auf erhebliche Probleme. Erst im Laufe der 1990er Jahre stiegen die Automobilwerke von der bis dahin üblichen Parallelverdrahtung (für jedes Signal wird eine eigene Leitung gelegt) auf die serielle Verdrahtung (eine einzige Leitung kann mehrere/viele Signale übertragen; ein Feldbus organisiert die Kommunikation basierend auf einem Protokoll) um, was den Vernetzungsaufwand erheblich senkte.⁴⁹ Auch dann gab es aber noch keinen einheitlichen Standard für die Feldbusse unterschiedlicher Hersteller, was immer noch sehr großen Aufwand und hohe Kosten bei Vernetzung erzeugte.⁵⁰ Die Vernetzung und Digitalisierung in der Produktion wurde durch das Aufkommen der Computer Aided Qua-

⁴⁰ AP September 1992

⁴¹ Aushärten eines Photopolymers unter Einwirkung von Licht/Laser.

⁴² Auftragen eines geschmolzenen thermoplastischen Rohstoffs durch eine dünne Düse.

⁴³ AP April 1995, Oktober 1999

⁴⁴ AP September 1992

⁴⁵ AP Dezember 1996

⁴⁶ AP April 1997

⁴⁷ AP April 1995, Juni 1995, Extraausgabe A-Klasse 1997

⁴⁸ AP Juni 1995, April 2000

⁴⁹ AP April 1992

⁵⁰ AP Februar 1995

lity (CAQ) befördert.⁵¹ Wesentlicher Treiber waren hier die Lean Production und die Entstehung der zertifizierten Qualitätssicherungssysteme⁵². Die Zertifizierung wurde in den 1990er Jahren für alle Automobilwerke und Zulieferer ein Muss – und erzeugte erhebliche Dokumentationspflichten. Die Fertigungslinien wurden daher zunehmend mit digitalen Messgeräten ausgerüstet, die in den 1990er Jahren einen Miniaturisierungsschub erlebten und die bis dahin noch verbreiteten Handmessmittel verdrängten.⁵³ Das Six-Sigma-Konzept verbreitete die in Japan und den USA seit langem verankerte Idee der statistischen Prozesskontrolle (Petersen 1999; Leitner 1999) in der deutschen Automobilindustrie.⁵⁴ Es kamen erste speziell für die Automobilindustrie entwickelte Softwarepakete auf den Markt.

Die 1990er Jahre können also als eine Zeit der Entwicklung und Diffusion der Digitalisierungskonzepte in der Automobilbranche aufgefasst werden, die allerdings aufgrund fehlender Standards, eng begrenzter Datenqualität und der Grenzen der Vernetzungstechnik ihr Potential noch nicht entfalten konnten⁵⁵ und in jeweils spezialisierten Insellösungen mündeten. Es gibt nur begrenzt Informationen, aus denen sich Unterschiede in der Implementierung der digitalen Technik in dieser Zeit zwischen deutschen, japanischen und amerikanischen Unternehmen ableiten lassen. Eine Studie von Liker et al. (1992) kam zum Schluss, dass es zwischen amerikanischen und japanischen Unternehmen Anfang der 1990er Jahre kaum Unterschiede in der Nutzung von CAD gab. In einer der wenigen Unternehmensstudien zeigte Okamoto (2000), dass Toyota gegenüber seinen europäischen Wettbewerbern einen Vorsprung beim Einsatz von CAD in der Produktentwicklung sowie in der Vernetzung der Daten mit seinen Zulieferern hatte – was von Okamoto mit den besonders engen Beziehungen zwischen japanischen Automobilherstellern und ihren Zulieferern erklärt wurde. Allerdings hatten die deutschen Hersteller Ende der 1990er Jahre weitgehend aufgeholt, zudem bemühten sie sich deutlich stärker als die japanischen um eine Harmonisierung der CAD-Datenstandards im Rahmen des globalen STEP-Standards (Standard for the Exchange of Product Model Data).

Die noch weitgehend isolierten Digitalisierungsprojekte der 1990er Jahre mündeten in den 2000er Jahren in eine intensive Diskussion über die „digitale Fabrik“ – also bereits über zehn Jahre vor dem Aufkommen der Industrie-4.0-Diskussion. Die „digitale Fabrik“ sollte im Prinzip alle Systeme integrieren, allerdings standen vor allem die Produktentwicklungs- und die Fertigungsplanungsprozesse sowie Versprechen einer Halbierung der Entwicklungs- und Planungszeiten im Fokus – hier lag enormes Kostensenkungspotential, zumal zur gleichen Zeit die Zahl der von den Unternehmen angebotenen Fahrzeugmodelle und ihre Komplexität stiegen.

So gut wie alle Automobilunternehmen (VW, Audi, Daimler, BMW, GM, Ford, aber auch viele Zulieferer wie Bosch) entwickelten Pläne für die „digitale Fabrik“ und deklarierten sie als zentrales Ziel der nächsten Jahre – auch wenn sich bald zeigen sollte, dass die Entwicklungen deutlich langsa-

⁵¹ AP Mai 1992

⁵² Pionier war Ford mit seinem Anfang der 1980er Jahre entwickelten Q1-Zertifizierungssystem. 1987 wurde die erste Fassung der globalen Qualitätssicherungsnorm ISO 9000ff veröffentlicht.

⁵³ AP Juli 1998

⁵⁴ AP Mai 1992

⁵⁵ vgl. z.B. AP Extraausgabe Audi A4 2001

mer verliefen als erhofft.⁵⁶ Deutsche Unternehmen wie Daimler, BMW und Audi sahen sich selbst als Vorreiter,⁵⁷ während die amerikanischen Unternehmen sich etwas vorsichtiger positionierten. So beschrieb ein leitender Manager der Powertrain-Division bei Ford das eigene Unternehmen als einen „cautious adopter of new technology, but wants to be a fast second adopter“ (AW 3 April 2013). Über die Entwicklungen in der japanischen Automobilindustrie ist leider kaum etwas bekannt.

Im Hinblick auf die hier untersuchten Bereiche lassen sich in den 2000er Jahren die folgenden Entwicklungen identifizieren:

- *Produktentwicklung und Planung*: Das erste zentrale Element der „digitalen Fabrik“ war eine weitere Digitalisierung der Produktentwicklung. Im Fokus stand die Entwicklung von sogenannten „virtuellen Prototypen“ und die Nutzung der virtuellen Realität sowie von Simulationen (etwa von Crashtests, Schwingungen, Geräuschentwicklung etc.), um so Aufwand bei der Entwicklung, Herstellung und Testen der Prototypen zu reduzieren.⁵⁸ Die Daten der Produktentwicklung sollten auch direkt für die digitale Fertigungsplanung genutzt werden.⁵⁹ Auf der Werkzeugebene sollten so die systematische Nutzung der virtuellen Realität, der Einsatz von Materialflusssimulationen bis hin zu einer virtuellen Inbetriebnahme, d.h. einer (teilweise automatischen) Programmierung der Produktionsanlagen basierend auf der digitalen Planung, möglich werden. Die Unternehmen verfolgten anspruchsvolle Ziele, so kündigte Daimler an, bis 2005 die Fabrikplanung vollständig digitalisieren zu wollen.⁶⁰
- *Fertigungssteuerung und Qualitätssicherung*: In den 2000er Jahren verbreitete sich das so genannte Industrielle Ethernet in den Automobilwerken.⁶¹ Das Ethernet ist eine in den 1990er Jahren zur lokalen Vernetzung von PCs in Büros entwickelte Technik. In den 2000er Jahren verbreitete sich nun ihre industrielle Version, mit der lokale Netzwerke in Betrieben mit deutlich höheren Datenraten als zuvor umgesetzt werden konnten, die den Sicherheits- und Echtzeitanforderungen der industriellen Umgebung genügten. Mit dem Industriellen Ethernet war eine Vernetzung nun günstiger und zugleich viel leistungsfähiger. Sie ermöglichte die Verbreitung von Manufacturing Execution Systems (MES), mit denen die Fertigung genau überwacht werden konnte.

Die in die „digitale Fabrik“ gesetzten Hoffnungen erfüllten sich nur teilweise. Im Verlauf der 2000er Jahre stellten Industriebeobachter immer wieder fest, dass genaue Material- und Prozessdaten fehlten und es auch keine Standardisierung von Daten gab.⁶² Bis zum Ende der 2000er Jahre blieb eine wirkliche Integration der Systeme von der Produktentwicklung über die Planung, die Fertigung, Logistik und Instandhaltung unerreicht.⁶³ Die erhofften Einsparungen von bis zur Hälfte

⁵⁶ AP April 2002; AP Juni 2002; AW Oktober 2004 und April 2008

⁵⁷ AP Oktober 2010, Oktober 2012

⁵⁸ AP Extraausgabe C-Klasse 2000; AP März 2007

⁵⁹ AP Extraausgabe BMW 7er 2001, AP April 2002

⁶⁰ AP April 2002

⁶¹ AP Februar 2001; AP Februar 2002

⁶² AP Oktober 2002; AP August 2005

⁶³ AP Januar 2008; AP Dezember 2010; AP Oktober 2013

te der Planungszeit für neue Fahrzeugmodelle galten schon früh als überhöht.⁶⁴ Eine Bestandsaufnahme Mitte der 2000er Jahre stellte fest, dass der Aufbau von Systemen für die „digitale Fabrik“ immer noch unkoordiniert stattfand.⁶⁵ 2008 argumentierte der Leiter des Projekts „Digitale Fabrik“ im Karosseriebau bei Daimler: „Wir sind massiv gestartet und massiv gegen die Wand gefahren“ (AP Januar 2008: 54). Erst in der zweiten Hälfte der 2000er Jahre verstärkten sich die Aktivitäten zur Entwicklung von Datenstandards. Eine von Daimler koordinierte Gruppe begann, ein automobilspezifisches Format für Automatisierungsdaten für den Bedarf der Fertigungsplanung und Inbetriebnahme (AutomationML), das als offener Standard zur Selbstbeschreibung von Geräten, Maschinen und Anlagen sowie von Steuerungen und Netzwerkkomponenten genutzt werden kann, zu entwickeln.⁶⁶ Mit der maßgeblichen Beteiligung deutscher Unternehmen begann die Entwicklung des „Open Platform Communications – Unified Architecture“-Standards (OPC UA), dessen erste Version 2010 veröffentlicht wurde und der sich zunehmend zu dem in Europa dominierenden Standard für Maschinenvernetzung entwickelt (Lechowski/Krzywdzinski 2019). In der zweiten Hälfte der 2000er Jahren kamen zudem unter dem Namen der Product-Lifecycle-Management-Systeme (PLM) integrierte Softwarelösungen für die digitale Produktentwicklung, Fertigungsplanung, Simulation und Inbetriebnahme auf den Markt.⁶⁷

Die Entwicklungen im Bereich der „Digitalen Fabrik“ bekamen einen zusätzlichen Schub durch die 2012 beginnende Diskussion über Industrie 4.0. Dabei ist anzumerken, dass die Automobilunternehmen die ersten Publikationen zum Thema Industrie 4.0 eher gleichgültig aufnahmen. In Stellungnahmen wurde betont, dass die Automobilindustrie ja seit über einer Dekade an der „digitalen Fabrik“ arbeite, die Schwierigkeiten kenne und das Konzept Industrie 4.0 keine neuen Ansätze und Lösungen liefere.⁶⁸ Zudem wurde die in den ursprünglichen Industrie-4.0-Publikationen (Acattech/Forschungsunion 2013; Spath et al. 2013) herausgehobene Idee der Selbstorganisation der Fertigung als unvereinbar mit der in der Automobilindustrie dominierenden genauen Taktplanung und strikten Verkettung der Prozesse angesehen. Die Idee der Selbstorganisation begreift die Produktion als ein dezentrales System von unabhängigen Agenten, die jeweils aufeinander reagieren. In dem dominierenden Lean-Production-System ist die Produktion hingegen eine genau festgelegte Perlenkette von Produktionsschritten, die per Kundenauftrag in Bewegung gesetzt wird.

Trotz der anfänglichen Skepsis gegenüber der Idee der Industrie 4.0 arbeiteten insbesondere die deutschen Unternehmen an den digitalen Vernetzungskonzepten weiter. Im Hinblick auf die hier im Fokus stehenden Bereiche sind die folgenden Punkte hervorzuheben:

- *Produktentwicklung und Planung*: Durch die Verfügbarkeit von Daten und entsprechenden Softwaresystemen nutzten immer mehr Unternehmen die virtuelle Inbetriebnahme, um den Anlaufprozess der Produktion bei Modellwechseln zu verkürzen.⁶⁹ Die PLM-Softwarepakete deckten immer mehr Bereiche der Fertigungsplanung ab.

⁶⁴ AP Oktober 2002

⁶⁵ AP Juli 2006

⁶⁶ AP April 2004; AP Juni 2007

⁶⁷ AP September 2006; AP Oktober 2007; AP Oktober 2010

⁶⁸ AP Februar 2013

⁶⁹ AP Juni 2017

- *Fertigungssteuerung und Qualitätssicherung*: Die zunehmende Standardisierung der Maschinenkommunikation durch Standards wie OPC UA, die fortschreitende Ausrüstung der Anlagen mit Sensoren sowie auch die Entwicklung des mobilen Internets trieben die Vernetzung der Fabriken weiter voran. Audi berichtete 2016,⁷⁰ dass in den Fabriken des Unternehmens erstmalig alle Gewerke miteinander vernetzt sind und ein zentraler Produktionsleitstand realisiert werden konnte, der die Verfolgung der Produktion, der Materialflüsse und der individuellen Karossen über alle Gewerke erlaubt. Technische Ansätze wie RFID wurden immer preiswerter und robuster,⁷¹ worauf die Automobilhersteller und Zulieferer mit der Entwicklung spezifischer Standards für die Nutzung dieser Techniken im Automobilbereich reagierten. Auch die Softwareentwicklung schritt in den 2010er Jahren voran. In den Presswerken erlaubte beispielsweise die in den 2010er Jahren rasant fortschreitende Ausrüstung der Pressen mit Sensoren die genaue Erfassung von Daten für die Prozessüberwachung und Prozesssteuerung: mit Hilfe der Daten konnten die Werkzeuge in den Pressen sofort reagieren, wenn Abweichungen vom gewünschten Zustand erkannt wurden.⁷² Es ist allerdings wichtig zu betonen, dass Presswerke im Hinblick auf smarte Regelkreise relativ weit fortgeschritten waren.⁷³ Die Presswerke waren auch ein Beispiel dafür, wie die Vernetzung zwischen OEMs und Anlagenbauern zugenommen hat: Daten aus den Pressen konnten für die physikalische Simulation der Anlagen bei der Produktentwicklung und Prozessplanung genutzt werden.⁷⁴ Ein Problem blieb aber weiterhin die Fragmentierung der Daten. Ende der 2010er Jahre begannen deutsche Unternehmen daher mit der verstärkten Weiterentwicklung ihrer IT-Architekturen, wie die Kooperation zwischen VW, Siemens und Amazon für die Entwicklung einer VW-spezifischen Industrial Cloud illustriert.⁷⁵

Die hier beschriebenen Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung fanden nicht nur in Deutschland, sondern auch bei den amerikanischen Automobilunternehmen statt.⁷⁶ Ein wichtiger Unterschied zwischen den Unternehmen beider Länder scheint aber in den Ambitionen beim Aufbau eigener Kompetenzen im Bereich der Digitalisierung zu liegen. Dies kann an dem Aufbau einer Industrial Cloud für die Vernetzung der Anlagen in den Unternehmen illustriert werden. In dem oben genannten Beispiel der Kooperation von VW, Siemens und Amazon beim Aufbau einer solchen Cloud für den VW-Konzern verfolgt VW das Ziel, selbst Entwicklungskompetenzen aufzubauen. Dies wird deutlich in dem vom Unternehmen ausgegebenen Ziel, im Rahmen der neu gegründeten Einheit „Car.Software“ 5.000 Informatiker und Softwareentwickler zu bündeln, um in Zukunft 60% der benötigten Software selbst zu entwickeln (wobei der Konzern den gegenwärtigen Anteil der Eigenentwicklung an der vom Unternehmen eingesetzten Software auf 10% schätzt) (Volkswagen 2019; vgl. auch Cacilo/Haag 2018). Auch General Motors arbeitet seit 2014 an einem Projekt der Entwicklung einer solchen Industrial Cloud für seine weltweiten Fabriken.⁷⁷

⁷⁰ AP November 2016

⁷¹ AP Juni 2011

⁷² AP September 2015, AP Januar 2017; AP Dezember 2018

⁷³ AP September 2018

⁷⁴ AP Dezember 2014

⁷⁵ AP Juni 2019

⁷⁶ AW Oktober 2004, Dezember 2006, April 2008, August 2012, April 2013, Februar 2014

⁷⁷ AMS Juli 2017; vgl. auch AMS August 2019

Die Partner dafür sind der japanische Roboterhersteller Fanuc sowie der amerikanische Netzwerkhersteller Cisco. Interessanterweise scheint hier nach Presseberichten die Verantwortung für die Datenanalyse im Sinne des Condition Monitoring und der Preventive Maintenance allerdings komplett an Fanuc ausgelagert zu sein.

Die Ambitionen der deutschen Automobilhersteller und Zulieferer werden in den Modellfabriken deutlich, in denen die Potentiale neuer Formen der Vernetzung getestet werden sollten. Ein Beispiel ist die *Factory 56* von Daimler in Sindelfingen (Daimler 2020). Die *Factory 56* sollte nach den ursprünglichen Planungen 2020 als eine reine Endmontage von Luxusfahrzeugen des Daimlerkonzerns anlaufen. Sie sollte ein neues Konzept einer modularen Montage repräsentieren, wobei alle Materialien sowie die zu montierenden Fahrzeuge von FTS transportiert werden. Hinzu kam das Ziel, die Nutzung von Big-Data-Analysen und Künstlicher Intelligenz in der Fertigung systematisch zu erproben. Allerdings war die *Factory 56* zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Studie noch nicht angelaufen, so dass noch abgewartet werden muss, wie viel von den ursprünglichen Plänen wirklich realisiert werden kann.

Zusammenfassung

Die Analyse der Entwicklung von Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen in der Automobilindustrie führt zu Schlussfolgerungen, die der üblichen Darstellung in der heutigen Diskussion widersprechen. Einen großen Automatisierungsschub hat es seit den 1990er Jahren in der Produktion nicht gegeben. Bereiche wie der Karosseriebau wurden bereits in den 1980er und 1990er Jahren automatisiert und sind durch eine graduelle Weiterentwicklung der Technik geprägt – auch wenn angenommen werden kann, dass es in den 1990er und 2000er Jahren eine nachholende Automatisierung bei Nachzüglerbetrieben insbesondere im Zuliefererbereich gegeben hat. Ein Refugium der manuellen Arbeit bleiben die Montageprozesse. Die Arbeitsprozesse in der Entwicklung, Planung, Qualitätssicherung und Fertigungssteuerung durchliefen hingegen seit den 1990er Jahren einen massiven Digitalisierungsprozess. Produktentwicklung und Planung machen einen erheblichen Anteil der Gesamtkosten der Automobilindustrie aus und die Erhöhung der Effizienz dieser Prozesse war einer der Hauptziele der Branche seit den 1990er Jahren. Mit Entwicklungen wie CAD, CAQ, verschiedenen Simulationssoftwarepaketen, virtueller Realität bis hin zu integrierten Konzepten der Product-Lifecycle-Management-Software konnten nach Angaben der Unternehmen erhebliche Einsparungen bei der für Entwicklung und Planung benötigten Zeit erreicht werden. Allerdings muss hervorgehoben werden, dass die Produktivitätsgewinne in diesen Bereichen nicht systematisch erforscht sind. Offen ist insbesondere, wie technische und organisatorische Innovationen ineinandergreifen. Technische Innovationen können ihr Potential erst entfalten, wenn sie mit der Entwicklung passender Organisationsstrukturen einhergehen (vgl. Jürgens 2020). Die Integration von Daten und Softwaresystemen und die Nutzung der entsprechenden Potentiale funktioniert beispielsweise nur im Kontext von Strukturen, die crossfunktionale und crossdivisionale Zusammenarbeit fördern.

All diese Entwicklungen sind in den drei hier untersuchten Ländern – Deutschland, Japan und den USA – unterschiedlich ausgeprägt gewesen. Die verfügbare Datenlage spricht im Hinblick auf die Fertigungsprozesse dafür, dass die deutschen Unternehmen Automatisierung und Digitalisierung am stärksten vorangetrieben haben, während insbesondere japanische Unternehmen vor allem in

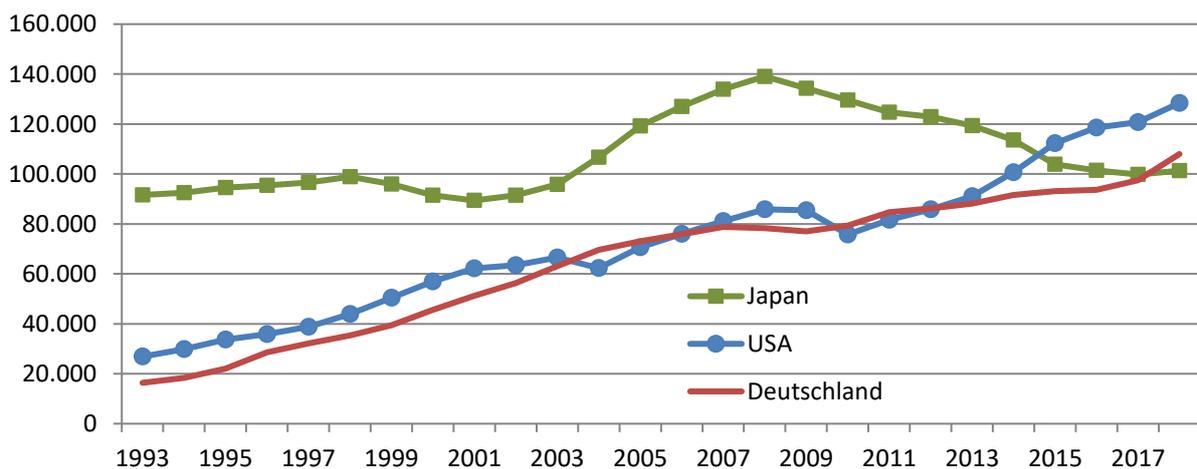
der Montage vom Ziel der Automatisierung abgerückt zu sein scheinen. Was die amerikanische Automobilbranche betrifft, so sprechen sowohl die Berichterstattung in der Fachpresse als auch die statistischen Daten über die Roboterdichte dafür, dass sich die Unternehmen insbesondere seit der Weltwirtschaftskrise und der damaligen Insolvenz von GM und Chrysler mit Investitionen in Automatisierung und Digitalisierung stark zurückgehalten haben. Es ist allerdings grundsätzlich anzumerken, dass die hier gemachten Aussagen auf der Berichterstattung in der Fachpresse beruhen. Längsschnittstudien von Unternehmen, die eine verlässlichere Grundlage für die Analyse liefern würden, fehlen bislang.

4.2 Wandel der Automatisierung – Analyse der Roboterstatistiken

Die Anzahl der Roboterinstallationen und die Roboterdichte (Industrieroboter pro tausend Beschäftigte) sind in der öffentlichen und wissenschaftlichen Diskussion zu dem Kernindikator schlechthin für die Entwicklung der Automatisierung geworden. Welches Bild der Automatisierung in der Automobilindustrie zeichnet dieser Indikator? Wie verhält sich die Entwicklung des Robotereinsatzes zu der im vorherigen Abschnitt dargestellten Entwicklung der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze?

Wie Abbildung 2 zeigt, hat der Einsatz von Industrierobotern in der deutschen und amerikanischen Automobilindustrie kontinuierlich zugenommen. Waren Anfang der 1990er Jahren jeweils etwa 10.000-30.000 Roboter in der Automobilindustrie beider Länder installiert, stieg diese Zahl bis 2018 auf 128.000 in den USA und 108.000 in Deutschland.

Abbildung 2: Bestand an Industrierobotern in der Automobilindustrie in Deutschland, Japan und den USA (in Stück), 1993-2018



Quelle: IFR 2019, eigene Berechnungen.

Die Entwicklung in Japan verlief etwas anders. Die Statistiken weisen bereits für Anfang der 1990er Jahre etwa 90.000 installierte Industrieroboter in der japanischen Automobilindustrie aus.

Diese Zahl blieb in den 1990er Jahren konstant, allerdings sind die japanischen Angaben vor 2000 schwer zu interpretieren, weil erst 2000 die Definitionen der Industrieroboter zwischen den japanischen Statistiken und den restlichen Ländern harmonisiert wurden. Die japanischen Zahlen vor 2000 überschätzen die Zahl der Industrieroboter im Vergleich zu Deutschland und den USA. Die Angaben nach der Harmonisierung weisen einen Anstieg bis 2008 auf den Höchstwert von 139.000 Robotern auf, anschließend fällt der Roboterbestand bis 2018 wieder auf etwa 100.000. In dieser Zeit hat keine größere Revision der Erhebungsmethoden des Roboterbestands stattgefunden und auch die Neuinstallationen weisen eine entsprechende Abnahme auf, so dass hier erst einmal davon ausgegangen wird, dass sie einen realen Trend spiegelt.

Die im Vergleich zu Deutschland und Japan größere Zahl der Roboter in den USA muss allerdings ins Verhältnis zur Größe der Automobilbranche in den drei Ländern gesetzt werden. Da die Roboter ja nur in den industriellen Produktionsprozessen eingesetzt werden, wurde im Folgenden die Roboterdichte als der Roboterbestand pro 1.000 Arbeiter berechnet, wobei als Arbeiter (im Sinne des englischen Blue Collar) sowohl die direkten Produktionsarbeiter als auch Arbeiter in indirekten Funktionen wie z.B. der Instandhaltung, Inbetriebnahme und anderen umfassen (Abbildung 3). Die Gruppe der Arbeiter wird dabei im Unterschied zu Angestellten (den White Collar) verstanden. Zu berücksichtigen war zudem, dass Automobilunternehmen grundsätzlich in zwei oder drei Schichten arbeiten. Da keine statistischen Angaben über Schichtsysteme in der Automobilindustrie existieren, wurde für die Kalkulation der Roboterdichte der Zweischichtmodus angenommen. Sicherlich wird damit die Roboterdichte etwas unterschätzt, da zumindest ein Teil der Unternehmen auch mit Dreischichtsystemen arbeitet.

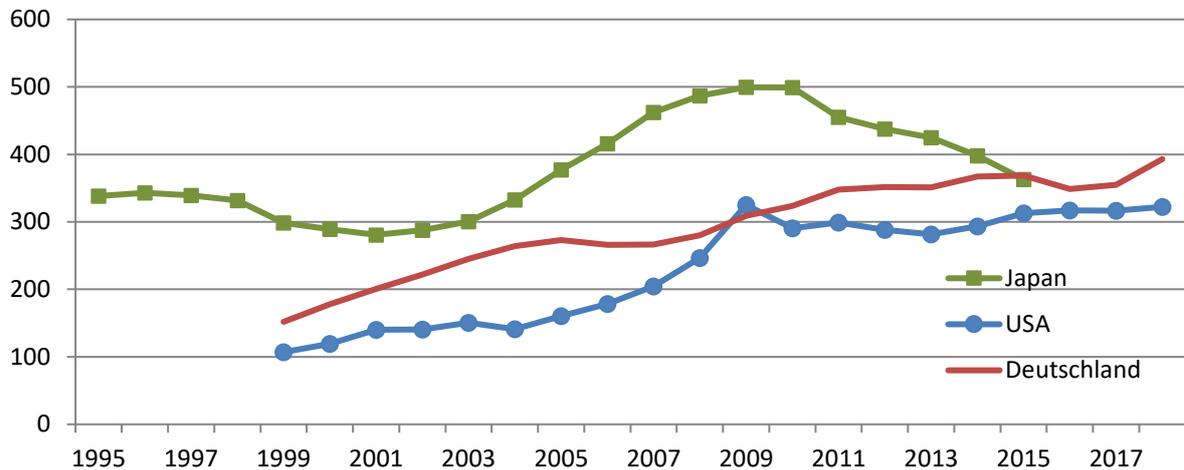
In den USA steigt die Roboterdichte von etwa 100 Robotern pro Tausend Arbeiter in den 1990er Jahren auf 320 im Jahre 2018. Allerdings ist anzumerken, dass die Roboterdichte seit 2009 kaum mehr zunimmt, was unter Umständen die seit der Weltwirtschaftskrise eingeschränkten Investitionen der Unternehmen in ihre Produktionsausrüstung widerspiegelt. In Deutschland ist ein kontinuierlicher Anstieg der Roboterdichte zu beobachten, wobei sich auch hier das Wachstum in der letzten Dekade etwas verlangsamt hat. 2018 wurden 390 Roboter pro Tausend Arbeiter eingesetzt.

In Japan erreicht die Roboterdichte ihren Höhepunkt 2008 mit 500 Robotern pro Tausend Arbeiter, um dann wieder auf 360 Roboter im Jahr 2015 abzunehmen. Für die Jahre nach 2015 liegen bislang für Japan noch keine Berufsstatistiken vor, die es erlauben würden, die Arbeiter getrennt von den restlichen Beschäftigungsgruppen zu betrachten. Allerdings ist die Anzahl der installierten Roboter im großen Ganzen konstant geblieben, und auch die Beschäftigung blieb in diesen Jahren stabil, so dass von einer weitgehend konstanten Roboterdichte ausgegangen werden kann.

Die nach 2008 sinkende Roboterdichte in der japanischen Automobilbranche ist bemerkenswert, weil sie der in den heutigen Debatten verbreiteten Wahrnehmung widerspricht. Sie lässt sich mit den oben beschriebenen Strategien der japanischen Unternehmen vereinbaren, die in der Montage auf Automatisierung eher verzichten. Der Karosseriebau bleibt zwar auch in japanischen Automobilunternehmen stark automatisiert. Da diese Unternehmen aber Flexibilität sehr hoch bewerten und mit Automatisierung vorsichtig sind, wenn diese die Flexibilität einschränken könnte, könnte der hier sichtbare Rückgang der Roboterdichte mit der Vereinfachung von Automatisierungskonzepten – etwa bei der oben beschriebenen New Global Body Line von Toyota, die

die Zahl der benötigten Roboter deutlich reduziert – oder auch mit dem Verzicht auf manche Materialhandlingroboter zusammenhängen.

Abbildung 3: Bestand an Industrierobotern pro Tausend Arbeiter in der deutschen, japanischen und US-amerikanischen Automobilindustrie, 1995–2018 (Annahme: Zweischichtsystem)



Quelle: Eigene Berechnungen nach IFR, BLS, VDA.

Auffällig ist der Kontrast zwischen der Entwicklung der Roboterdichte und der qualitativen Analyse der Automatisierungsansätze. Die qualitativen Analysen verdeutlichen, dass der Indikator der Roboterdichte keineswegs die Entwicklung der Automatisierungsniveaus widerspiegelt. Erstens hat die obige Analyse gezeigt, dass die Automatisierung viele Formen haben kann und nur in einigen Arbeitsprozessen durch Roboter realisiert wird: vor allem in Schweiß- und Lackierprozessen und beim Materialhandling. Dies führt dazu, dass die Fokussierung auf Roboterdichte das Ausmaß der Automatisierung erheblich unterschätzen kann, etwa im Bereich der seit langem mit Hilfe von Werkzeugmaschinen hoch automatisierten mechanischen Bearbeitung von Metallkomponenten. Zweitens zeigt insbesondere das Beispiel des Karosseriebaus, dass eine Zunahme der Zahl der Roboter oftmals keinen steigenden Automatisierungsgrad bedeutet, sondern vielmehr die zunehmende Komplexität der Anlagen sowie Vielfalt der Bearbeitungsprozesse und Materialien reflektiert. Dies führt wiederum dazu, dass die Nutzung der Roboterdichte als Indikator das Ausmaß der Automatisierung erheblich überschätzen kann.

5. Wandel der Beschäftigung in der Automobilindustrie seit den 1990er Jahren

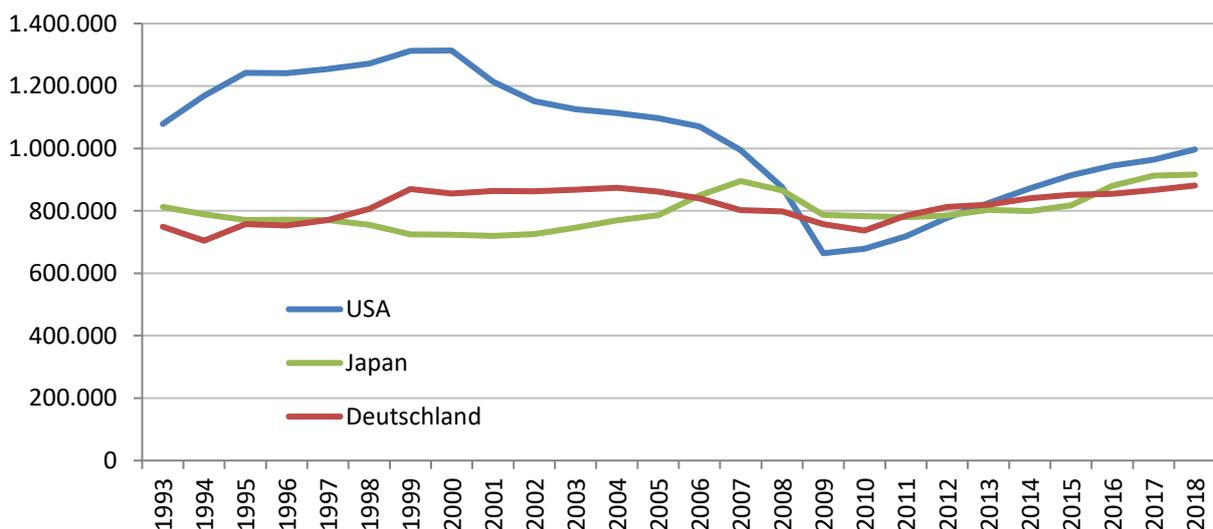
Inwieweit lässt sich ein Zusammenhang zwischen den Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen und der Entwicklung der Beschäftigung in der Automobilbranche erkennen? Im Folgenden nähern wir uns dieser Frage Schritt für Schritt an. Die Darstellung beginnt mit der Entwicklung der Beschäftigungsmenge und geht dann zur Analyse der Zusammensetzung nach Tätigkeitsgruppen über.

5.1 Beschäftigung und Produktion

Im Hinblick auf die Beschäftigungsmenge ähneln sich die nationalen Automobilindustrien in den USA; Deutschland und Japan, auch wenn die Entwicklung der Beschäftigung im Zeitverlauf Unterschiede aufweist. Zu berücksichtigen ist, dass an dieser Stelle von strukturellen Unterschieden in der Zusammensetzung der Industrien und bei ihrer jeweiligen Verflechtung mit dem Ausland abstrahiert wird: so ist beispielsweise die deutsche Automobilindustrie eng mit ihren mitteleuropäischen Nachbarn verflochten (Krzywdzinski 2014; Jürgens/Krzywdzinski 2010 und 2009), im Falle der USA besteht eine enge Verflechtung mit Mexiko (Klier/Rubenstein 2010); demgegenüber ist die Verflechtung der japanischen Automobilindustrie mit den südostasiatischen Nachbarn Japans schwächer (Kobayashi et al. 2015).

Wie Abbildung 4 zeigt, fällt im Falle Deutschlands und Japans eine relativ konstante Beschäftigungsmenge auf, die jeweils um 800.000 Personen oszilliert. Im Falle Deutschlands begannen die 1990er Jahre mit einer Krise, in der die Beschäftigung auf gut 700.000 Personen fiel. Sie erholte sich aber in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre und erreichte wieder Werte von deutlich über 800.000. In der Weltwirtschaftskrise um 2008 fiel die Beschäftigung auf Werte um 700.000, um in den Jahren darauf wieder bis auf 880.000 im Jahr 2018 zu klettern. Im Falle Japans waren die 1990er Jahre von einer langsamen Abnahme der Automobilbeschäftigung gekennzeichnet, die 2001 mit etwa 720.000 Personen ihren Tiefpunkt erreichte. Danach stieg die Beschäftigung auf deutlich über 800.000, fiel in der Weltwirtschaftskrise auf Werte unter 800.000, um aber bis 2018 auf 916.000 zu steigen.

Abbildung 4: Beschäftigung in der deutschen, japanischen und US-amerikanischen Automobilindustrie (1993-2018)

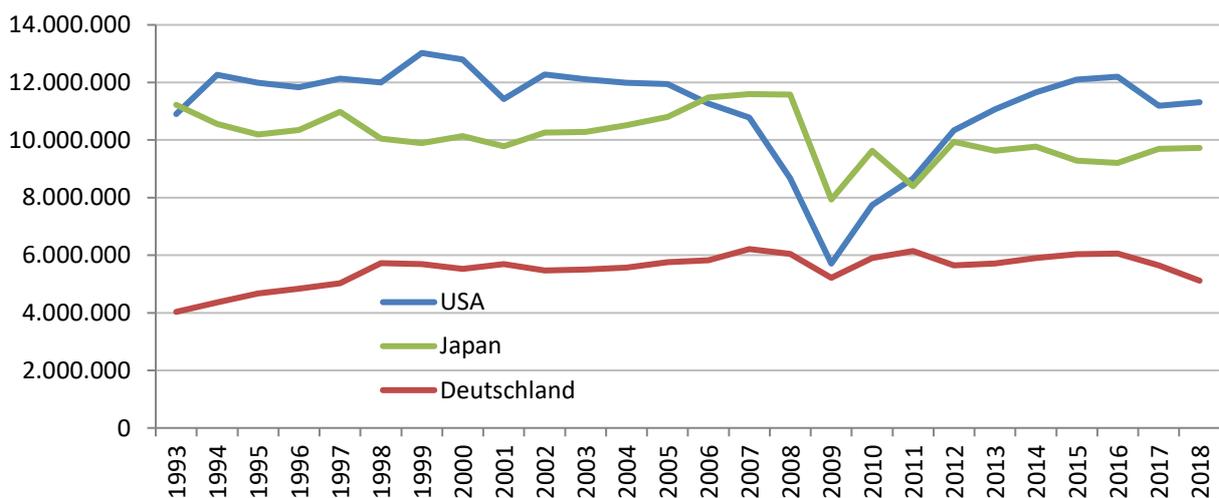


Quelle: BLS, VDA.

Einen dramatischeren Verlauf nahm die Beschäftigung in der amerikanischen Automobilindustrie. Sie stieg bis Ende der 1990er Jahre und erreichte ihren Höhepunkt 2000 mit über

1.300.000 Beschäftigten. Danach fiel sie kontinuierlich und erreichte in der Weltwirtschaftskrise ihren Tiefpunkt mit 660.000 Personen. Es handelte sich um eine massive Krise der amerikanischen Automobilindustrie, die die Hersteller GM und Chrysler in die Insolvenz (und Ford in die Beinahe-Insolvenz) führte und nur durch ein Rettungspaket der amerikanischen Regierung gelöst werden konnte (Klier/Rubenstein 2012). Die Krise war in den USA besonders ausgeprägt, weil sich der in der Weltwirtschaftskrise verursachte Einbruch der Nachfrage mit einem länger anhaltenden Niedergang der Marktanteile der sogenannten „Big Three“ auf ihrem Heimatmarkt überlagerte: Seit Mitte der 1990er Jahre bis zum Ausbruch der Krise fiel dieser Marktanteil von etwa 75% auf unter 50% (Klier/Rubenstein 2012). Die Folgen der Krise für die Unternehmen waren nachhaltig: über Jahre mussten Kosten reduziert werden (Goolsbee/Krueger 2015), zudem erlitten die Unternehmen einen enormen Verlust an Wissen und Kompetenzen durch den innerhalb von wenigen Jahren durchlaufenen Abbau von mehreren Hunderttausenden Arbeitsplätzen. Zwar stieg die Beschäftigung ab 2009 wieder und erreichte 2018 knapp 1.000.000 Personen, allerdings mussten dabei auch Wissen und Kompetenzen wieder neu aufgebaut werden (Katz et al. 2013).

Abbildung 5: Produktion von Kraftfahrzeugen in Deutschland, Japan und den USA in Stück (1993–2018)



Quelle: OICA (Production Statistics), VDA (International Auto Statistics).

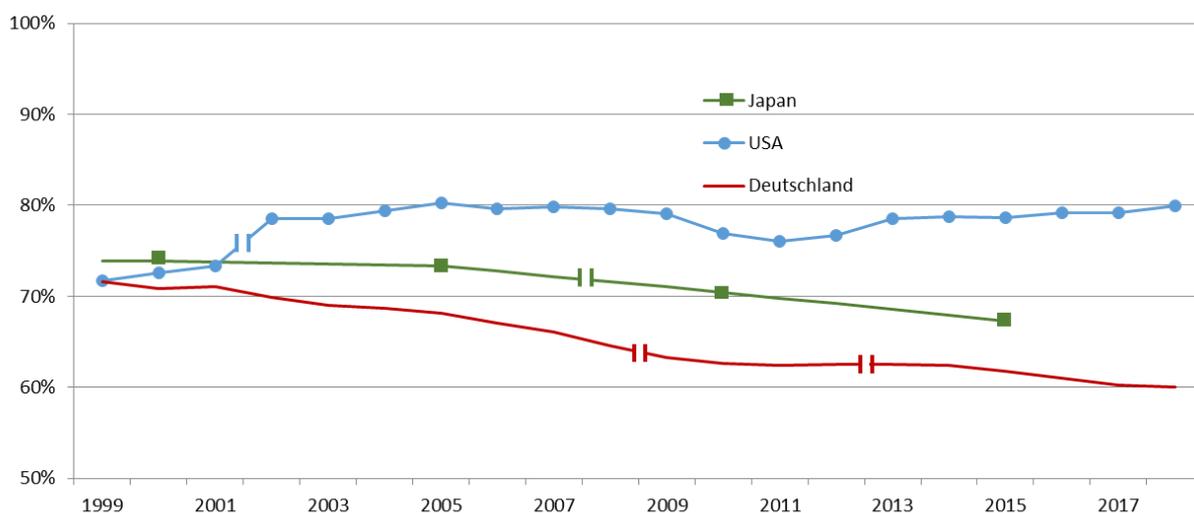
Insbesondere der Einbruch der Jahre um die Weltwirtschaftskrise spiegelt sich auch in der Entwicklung der Produktion (Abbildung 5). Diese brach insbesondere in den USA massiv ein. Während in den 1990er Jahren und danach die jährliche Produktion um 12 Millionen Fahrzeuge lag, brach sie in der Krise um die Hälfte ein, erholte sich aber bis 2018 wieder auf Werte zwischen 11 und 12 Millionen. In Japan lag die Produktion in den 1990er Jahren um 10 Millionen Fahrzeuge, stieg kurz vor der Krise auf knapp 12 Millionen, um dann auf 8 einzubrechen und sich anschließend auf Werte um 10 Millionen Fahrzeugen einzupendeln. In Deutschland war Anfang der 1990er Jahre die Produktion auf einem Tiefpunkt von etwa 4 Millionen Fahrzeugen jährlich, stieg dann auf Werte um 6 Millionen und brach auch in der Weltwirtschaftskrise nur kurz und schwach ein.

Allerdings ist in den Jahren 2017/8 wieder ein Einbruch zu verzeichnen – hier mit ausgelöst durch das sogenannte „Dieselgate“.

5.2 Beschäftigung nach Tätigkeitsgruppen

Die drei untersuchten Länder unterscheiden sich erheblich in der Entwicklung der Beschäftigungsstrukturen. In diesem Abschnitt wollen wir auf die Entwicklung des Anteils der Arbeiter an der Gesamtbeschäftigung schauen (Abbildung 6) und sie anschließend der Entwicklung des Beschäftigungsanteils von Ingenieuren und Informatikern gegenüberstellen (Abbildung 7). Als Arbeiter definieren wir dabei die gewerblich Beschäftigten (Blue Collar) in der Produktion, Logistik und in Tätigkeitsgruppen des Baugewerbes, die sich in kleiner Zahl auch unter den Beschäftigten der Automobilindustrie finden (etwa Rohrleger).

Abbildung 6: Anteile von Arbeitern (Produktion, Logistik, Bau) an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilindustrie in Deutschland, Japan und den USA



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung nach BLS, SBJ und BA. Grundlegende Revisionen der Statistiken sind mit || gekennzeichnet.

Im Falle der amerikanischen Automobilindustrie blieb der Anteil der Arbeiter seit den 1990er Jahren bei etwa 80% erstaunlich konstant. Die Beschäftigung der Arbeiter in absoluten Zahlen folgte dabei dem allgemeinen Entwicklungstrend der Branche: sie brach in der Krise um 2009 ein und erholte sich danach wieder auf knapp 800.000 Arbeiter im Jahr 2018. Die Entwicklung in Deutschland wich deutlich davon ab. Hier ist eine kontinuierliche Abnahme des Anteils der Arbeiter an der Gesamtbeschäftigung von etwa 70% Ende der 1990er Jahre auf 60% im Jahr 2018 festzustellen. Aufgrund der positiven Beschäftigungsentwicklung in der Branche bedeutet diese Abnahme zwar keine Beschäftigungsverluste in absoluten Zahlen, vielmehr blieb die Zahl der Arbeiter in der hier betrachteten Zeit relativ stabil und betrug etwa 500.000 Personen. Dennoch ist das Ausmaß der Veränderung bemerkenswert: es zeigt sich ein ganz klarer und bis heute

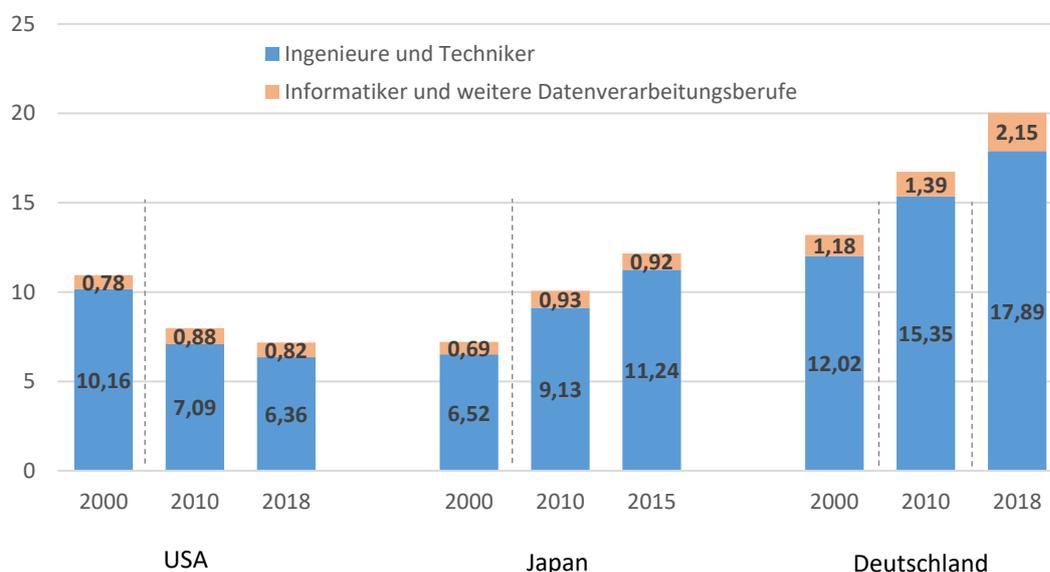
anhaltender Bedeutungsverlust der Produktionsbeschäftigung. Ähnlich verhielt es sich in Japan, wenngleich auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Hier nahm der Anteil der Arbeiter von über 70% Ende der 1990er Jahre auf 67% im Jahr 2015 ab, allerdings war dies angesichts der positiven Beschäftigungsentwicklung in der Branche ebenfalls nicht mit einer absoluten Abnahme der Zahl der Arbeiter verbunden, die 2015 über 570.000 Personen erreichte.

Die Veränderungen im Anteil der Arbeiter verhalten sich komplementär gegenüber den Veränderungen im Anteil der Ingenieure sowie der Informatiker an der Beschäftigung in der Automobilbranche (Abbildung 7). Dabei wird nur die Beschäftigung in der Automobilindustrie selbst betrachtet – Beschäftigte von Anlagenbauern und Dienstleistern der IT-Branche, die für Automobilunternehmen arbeiten, aber von der Statistik nicht selbst der Automobilindustrie zugerechnet werden, bleiben außen vor. Insofern verdeutlicht die folgende Analyse vor allem, inwiefern Automobilhersteller und Automobilzulieferer selbst Beschäftigung in Ingenieurs- und Informatikbereichen aufbauen. Sie gibt keinen Aufschluss darüber, in welchem Umfang Automobilunternehmen entsprechende Expertise extern zukaufen.

In den USA weisen die Daten des BLS ab 2002 einen relativ konstanten Anteil der Ingenieure an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilbranche von 6–7% aus. Dieser Wert unterscheidet sich nicht zwischen den Automobilherstellern und den Zulieferern. Vor 2002 wird ein höherer Anteil der Ingenieure mit Werten um 10% ausgewiesen, allerdings fand 2002 eine grundlegende Umstellung der Branchenstatistik statt, so dass die Abnahme nach 2002 unter Umständen ein statistisches Artefakt ist. Der ab 2002 stabile Anteil der Ingenieure bedeutet, dass ihre Zahl dem allgemeinen Beschäftigungsverlauf in der Branche folgt. Sie nimmt bis zur Krise 2009 auf den Tiefstand von 40–50.000 Personen ab und steigt dann langsam wieder, um 2018 63.000 zu erreichen. Unter dem Begriff der Ingenieure werden hier alle Personen der Tätigkeitsgruppen „Architecture and engineering occupations“ (17-0000) gezählt, die im Falle der Automobilindustrie vor allem „engineers“ (environmental engineers, industrial engineers, mechanical engineers, materials engineers, miscellaneous engineers) sowie „drafters and engineering technicians“ beinhaltet. Im amerikanischen System verfügen die letzteren normalerweise über eine zweijährige tertiäre (aber nicht universitäre) Ausbildung an technischen Schulen oder Community Colleges. Die „drafters and engineering technicians“ machen etwa ein Viertel aller Ingenieure und Techniker in der amerikanischen Automobilindustrie aus.

Der Anteil der Informatiker an der Gesamtbeschäftigung in der amerikanischen Automobilindustrie stieg langsam von etwa 0,5% Anfang der 2000er Jahre auf knapp 1% im Jahr 2018. Unter dem Begriff der Informatiker werden hier alle Tätigkeitsgruppen der Kategorie „computer and mathematical occupations“ (15-0000) betrachtet. Sie beinhaltet im Falle der Automobilindustrie vor allem „software developers and programmers“, „database and systems administrators“, „networks architects“, „computer support specialists“, sowie „operations research analysts“ und „statisticians“. In absoluten Zahlen nimmt die Beschäftigung der Informatiker in der Wirtschaftskrise 2009 nur leicht von über 6.000 Personen auf etwas über 5.000 Personen ab. Seitdem steigt die Beschäftigung in den Computerberufen auf 8.200 Personen im Jahr 2018.

Abbildung 7: Anteil der Ingenieure und Techniker sowie der Informatiker an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilindustrie in Deutschland, Japan und den USA (in %)



Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung nach BLS, SBJ und BA. Gestrichelte Linien markieren substantielle Veränderungen der Branchen- oder Berufsklassifikationen, die die Vergleichbarkeit der Daten einschränken.

Anders verhält sich die Beschäftigung von Ingenieuren und Informatikern in Japan – wenngleich wiederum zu berücksichtigen ist, dass zwischen 2000 und 2010 eine Umstellung der Branchenstatistik stattfindet. Die Statistiken weisen einen steigenden Anteil von Ingenieuren an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilbranche von 6-7% Anfang der 2000er Jahre auf über 11% im Jahr 2015. In absoluten Zahlen bedeutet das eine fast Verdopplung der Zahl der Ingenieure von etwa 50.000 Personen in den 1990er Jahren auf etwa 100.000 Personen im Jahr 2015. Die Kategorie „engineers“ beinhaltet hier vor allem „transportation equipment engineers“ und „machinery engineers“, hinzu kommen „electrical and telecommunications engineers“, „metal engineers“, „chemical engineers“ und andere. Eine Kategorie vergleichbar mit den amerikanischen „engineering technicians“ gibt es in der japanischen Statistik nicht. Einzelne Studien deuten aber darauf hin, dass es eine vergleichbare Beschäftigtengruppe auch in japanischen Unternehmen der Automobilbranche gibt (Shibata 2009); allerdings ist unklar, in welcher statistischen Kategorie sich diese Beschäftigten wiederfinden. Insofern könnte es sein, dass diese hier ausgewiesenen Zahlen die Entwicklung in Japan etwas unterschätzen.

Auch der Anteil der Informatiker ist in der japanischen Automobilindustrie gestiegen, und zwar von 0,7% im Jahr 2000 auf 0,9% der Gesamtbeschäftigung im Jahr 2015. In absoluten Zahlen bedeutet das eine Zunahme von etwa 6.000 auf über 8.000 Personen.⁷⁸ Die Kategorie der Informatiker ist in der japanischen Statistik wenig differenziert und beinhaltet „system designers“, „software developers“ und „other data processing and communication engineers“.

⁷⁸ Die absoluten Angaben basieren auf der in den jeweiligen Zensusjahren benutzten Klassifikation.

Die stärkste Veränderungsdynamik ist wiederum in Deutschland zu sehen, wenngleich auch hier aufgrund statistischer Brüche die Zahlen mit Vorsicht zu interpretieren sind. Hier weist die Statistik im Jahr 2000 einen Anteil der Ingenieure und Techniker an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilbranche von 12% aus, bis 2018 steigt dieser Anteil auf knapp 18%. In absoluten Zahlen bedeutet das eine Zunahme der Zahl der Ingenieure und Techniker von etwa 70–80.000 auf etwa 160.000 Personen. Wie Schwarz-Kocher et al. (2019) argumentieren, war diese Entwicklung sowohl von den Automobilherstellern als auch von den Automobilzulieferunternehmen getrieben. Die Kategorie der Ingenieure und Techniker ist in der deutschen Statistik sehr differenziert erfasst, so dass hier auf die Aufzählung der vielen einzelnen Tätigkeitsgruppen verzichtet wird. Grundsätzlich werden unter der Kategorie Ingenieure Personen erfasst, deren Arbeit einen Master- oder Diplomuniversitätsabschluss erfordert (in der deutschen Klassifikation der Berufe (KldB) 2010-Klassifikation als „Expertenniveau“ definiert). Als Techniker werden Personen erfasst, deren Arbeit einen Bachelorabschluss oder einen Technikerabschluss erfordert („Spezialistenniveau“). Die Techniker machen in der deutschen Automobilindustrie etwa ein Drittel der Gruppe der Ingenieure und Techniker aus.

Auch die Zahl der Informatiker nimmt in Deutschland zu. Ihr Anteil an der Gesamtbeschäftigung in der Automobilbranche steigt von etwa 1% im Jahr 2000 auf über 2% im Jahr 2018. In absoluten Zahlen bedeutet das eine Zunahme von etwa 7.000 auf etwa 19.000 Personen.⁷⁹ Auch diese Gruppe ist in der deutschen Statistik (KldB 2010) sehr detailliert erfasst und beinhaltet Informatiker ohne Spezialisierung, Wirtschaftsinformatiker, technische Informatiker, IT-Systemanalytiker, IT-Anwendungsberater, IT-Netzwerktechnik, IT-Systemadministratoren, Softwareentwickler, Programmierer und Datenbankentwickler.

Die Unterschiede in der Entwicklung der Zahl von Ingenieuren und Informatikern in der deutschen, japanischen und amerikanischen Automobilindustrie sind frappierend und es stellt sich die Frage, wie sie zustande kommen. Es spricht vieles dafür, dass sie die Unterschiede der Digitalisierungs- und Automatisierungsansätze der deutschen, japanischen und amerikanischen Unternehmen reflektieren, und insbesondere die High-tech-Orientierung der deutschen Unternehmen. Allerdings sind auch alternative Erklärungen denkbar, die hier kurz diskutiert werden sollen.

Ein Grund könnten unterschiedliche Strategien des Outsourcing und der externen Akquise von Kompetenzen sein. So könnte es sein, dass die amerikanischen Unternehmen Entwicklungsaktivitäten in besonders starkem Maße outsourcen, bzw. den Kompetenzaufbau im Bereich neuer Technik vor allem mit Akquisitionen verfolgen, wobei die akquirierten Unternehmen eigenständig bleiben und statistisch nicht in der Automobilindustrie erfasst werden. Die deutschen Unternehmen würden hingegen versuchen, entsprechende Kompetenzen intern aufzubauen.

Diese Frage ist mit den vorhandenen Daten schwer zu klären. Sicherlich spielt es eine Rolle, dass die amerikanischen Unternehmen ihre Produktentwicklungsaktivitäten erheblich globalisiert haben. Auch wenn alle Automobilhersteller eine globale Struktur von Entwicklungszentren aufbauen (Florida/Kenney 1994; Calabrese 2001; Lara/Carillo 2003), trifft dies auf amerikanische Unternehmen am stärksten zu. Im Fall von Ford findet die Pkw-Entwicklung vorwiegend im Entwicklungszentrum in Köln (Deutschland) statt, während in den USA selbst vor allem die Entwick-

⁷⁹ Die absoluten Angaben nach der WZ 1993 und KldB 1988 bzw. nach der WZ 2008 und KldB 2010.

lung für Pickups angesiedelt ist. General Motors hat die Entwicklung von Pkw ebenfalls weitestgehend ins Ausland (China und Korea; bis zum Verkauf von Opel auch Deutschland) verlagert, während sich die amerikanischen Entwicklungsaktivitäten des Unternehmens vor allem auf Pickups und Vans konzentrieren. Nach eigenen Interviews mit Automobilexperten werden über 85% der in den USA produzierten Pkw im Ausland entwickelt, das gilt auch für die Mehrheit der in den USA produzierten SUV-Modelle. Nur im Fall der Pickups und Sportwagen ist die Entwicklung weiterhin vorwiegend in den USA angesiedelt. Diese Globalisierung von Entwicklungsaktivitäten reduziert sicherlich den Anteil von Ingenieuren und Informatikern an der Beschäftigung in der amerikanischen Automobilindustrie.

Ein weiterer Grund für die Unterschiede könnte in der Branchenstruktur liegen. Die deutschen und die japanischen Automobilindustrien sind stark von den jeweils heimischen Unternehmen dominiert, die in den Ländern nicht nur ihre Produktions-, sondern auch ihre Produktentwicklungsstandorte haben. In der amerikanischen Automobilindustrie spielen hingegen die Transplants japanischer und deutscher Automobilunternehmen und -zulieferer eine sehr große Rolle (Florida/Kenney 1991; Rubenstein 2002). Diese Transplants produzieren für den amerikanischen Markt, allerdings befinden sich die Produktentwicklungsaktivitäten nicht in den USA.

Darüber hinaus zeigen Studien ein deutliches Wachstum des Outsourcings von Design und Entwicklungsaktivitäten durch die amerikanische Industrie auf (MacPherson/Vanchan 2010). Allerdings gilt dies in der Automobilindustrie wiederum für alle Länder, auch für Deutschland (VDA 2015) – mit den vorhandenen Daten lässt sich nicht beurteilen, ob die Outsourcingprozesse in den USA stärker ausgeprägt waren. Deutlich ist allerdings, dass im Bereich der Entwicklungsdienstleistungen europäische (und vor allem deutsche) Unternehmen besonders stark sind (VDA 2015).

Die Externalisierung von Ingenieurs- und Softwareentwicklungskompetenzen könnte auch die Form von Akquisitionen angenommen haben. Tatsächlich haben amerikanische Unternehmen seit 2016 massiv in Tech-Startups investiert. General Motors hat 2016 das Mobilitätsdienstleistungen-Startup Sidecar übernommen, und im gleichen Jahr über eine halbe Milliarde Dollar in das Autonomes-Fahren-Startup Cruise Automation investiert. 2017 wurde das Portfolio um den Lidar-Technologieentwickler Strobe erweitert. Ford erwarb seit 2016 mehrere Mobilitätsdienstleistungsanbieter (Chariot, Autonomic.AI, TransLoc), Künstliche-Intelligenz-Startups (SAIPS) und Autonomes-Fahren-Startups (Argo AI, Quantum Signal AI) und selbst FiatChrysler investierte in diesem Bereich (StartMeUp [Autonomes Fahren], LeddarTech [Lidartechnologie]).

Die aufgekauften Startups und IT-Unternehmen beschäftigen eine größere Zahl hochqualifizierter Informatiker und Ingenieure, die den Eindruck des Auseinanderklaffens der Zahl von Ingenieuren in der amerikanischen gegenüber der deutschen Automobilindustrie etwas mindert. So beschäftigte Cruise Automation – das bei weitem Größte der übernommenen Startups – im Jahr 2019 etwa 1.000 Entwickler und plante, die Zahl bald zu verdoppeln (The Newswheel 2019). Allerdings ist zu berücksichtigen, dass auch die deutschen Automobilhersteller in Tech-Startups investieren. So beteiligte sich Volkswagen 2017 mit mehreren Milliarden Euro an Argo AI (und kooperiert hier mit Ford), kaufte das Lidar-Startup Aeva, den Mobilitätsdienstleister Split Finland Oy und das auf mobiles Bezahlen spezialisierte Startup PayByPhone. Daimler investierte vor allem in Mobilitätsdienstleistungen-Startups (Chauffer Privé, Flic, Ridescout, CleverTaxi, MyTaxi, Taxibeat), übernahm 2019 aber auch für einen dreistelligen Millionenbetrag Torc Robotic, ein auf Autono-

mes Fahren im Lkw-Bereich spezialisiertes Startup. Die deutschen Automobilhersteller haben zudem große Venture-Capital-Fonds aufgelegt, um das Engagement im Startup-Bereich auszubauen. Bislang sehr zurückhaltend waren die japanischen Automobilhersteller, allerdings hat Toyota 2018 den Toyota-AI-Ventures-Fonds im Silicon Valley gestartet. Im gleichen Jahr etablierte auch Renault-Nissan einen entsprechenden Fonds.

Die Investitionen der amerikanischen Automobilunternehmen in Softwarestartups können den Unterschied zwischen der Beschäftigung von Ingenieuren und Informatikern in der amerikanischen Automobilindustrie verglichen mit Deutschland und Japan also höchstens relativieren, aber nicht gänzlich in Frage stellen. Die deutschen Unternehmen bauen ihre Engineering-, aber auch Softwareentwicklungskapazitäten massiv aus, während dies für amerikanische Unternehmen nicht im gleichen Maße zuzutreffen scheint.

5.3 Strukturwandel innerhalb der Produktionsarbeiterschaft

Wie veränderte sich die Beschäftigung innerhalb der Produktionsarbeiterschaft? Der grundlegende Aufbau der Berufsstatistiken der hier untersuchten Länder ähnelt sich und erlaubt die Unterscheidung von fünf größeren Tätigkeitsgruppen:

- Montagearbeiter: Diese Gruppe umfasst die mit manueller Herstellungsarbeit befassten Arbeiter. Bei den Automobilherstellern ist diese Gruppe vor allem in den bislang nur begrenzt automatisierten Montagebereichen zu finden.
- Metallarbeiter: Diese Gruppe wird in den für die Automobilindustrie zentralen Bereichen der Metallerzeugung (vor allem Gießereien), der Metallbearbeitung (z.B. Bedienung von Werkzeugmaschinen), des Metallbaus (vor allem Schweißprozesse im Karosseriebau) und des Werkzeugbaus eingesetzt.
- Instandhaltung und Inbetriebnahme von Fertigungsanlagen.
- Andere Produktionsberufe: Hierzu zählen etwa Arbeiter in Bereich der Textiltechnik (z.B. Polsterer bei der Sitzherstellung), der Lackierprozesse oder auch der Qualitätskontrolle.
- In die Analyse werden im Folgenden zudem auch die Shopfloorvorgesetzten einbezogen (in Deutschland die Meisterebene).

Die genaue Aufschlüsselung dieser fünf Tätigkeitsgruppen unterscheidet sich in den nationalen Statistiken teilweise erheblich. Die Analyse wird daher im Folgenden auf der Ebene dieser fünf Tätigkeitsgruppen bleiben, allerdings zur Illustration auch Daten zu Untergruppen mit aufführen.

Anzumerken ist, dass die von der Statistik unterschiedenen Tätigkeitsgruppen nicht direkt die in der arbeits- und industriesoziologischen Forschung zentrale Unterscheidung zwischen Facharbeitern und angelernten Arbeitern abbilden. Die arbeits- und industriesoziologischen Diskussionen über den Ablauf der Automatisierungsprozesse und ihre Folgen drehen und drehen sich um die Frage, inwieweit es zu einer Reprofessionalisierung der Produktionsarbeit (im Sinne einer Stärkung der Facharbeit) und einer Reduktion von stark standardisierten, repetitiven Arbeitsinhalten, die von angelernten Arbeitskräften übernommen werden, kommt (vgl. Kern/Schumann 1984; Jürgens et al. 1993; Schumann et al. 1994; Kuhlmann 2004). Die offiziellen Berufsstatistiken können darauf nur sehr indirekt Antworten liefern. So sind die Tätigkeitsgruppen in der Instandhaltung und Inbetriebnahme von Fertigungsanlagen sicherlich fast ausschließlich mit Fach-

arbeitern besetzt. Im Bereich der Montage- und der Metalltätigkeitsgruppen finden sich allerdings sowohl Facharbeiter als auch angelernte Arbeitskräfte – über das Verhältnis liefert die offizielle Statistik keine Informationen.

Die Statistiken können allerdings Informationen über das Verhältnis der manuellen Herstellungsarbeit am Produkt und der Gewährleistungsarbeit (also Überwachung, Bedienung, Steuerung) in automatisierten Prozessen liefern. Wie die qualitative Analyse gezeigt hat, ist in der Automobilindustrie manuelle Herstellungsarbeit stark in Montagebereichen konzentriert. Wir können also die Entwicklung der montagebezogenen Tätigkeitsgruppen als Indikator für ihre Bedeutung heranziehen. Die Prozesse der Metallerzeugung und -bearbeitung sind hingegen seit längerer Zeit hoch automatisiert – hier dominiert vor allem Gewährleistungsarbeit.

Tabelle 1 präsentiert die Entwicklung für den Fall der amerikanischen Automobilindustrie. Sie zeigt eine bemerkenswerte Stabilität der beruflichen Struktur. Die wichtigsten Veränderungen sind:

- Zu beobachten ist ein leicht steigender Anteil der Montagearbeiter, deren absolute Zahl zwar in der Krise 2008/09 einbricht, dann aber wieder auf ein hohes Niveau zurückkehrt.
- Einen Kontrast bildet die Beschäftigung in den Metallberufen, deren Anteil klar abnimmt. Diese relative Abnahme betrifft vor allem Maschinenbediener, während es kaum eine Veränderung des Beschäftigungsanteils der Schweißer und Lackierereiarbeiter gibt, also der Arbeiter in jenen Bereichen, die zu den Schwerpunkten des Einsatzes von Robotern im Automobilbau zählen. Das ist ein Indikator dafür, dass die wichtigsten Auswirkungen der Automatisierung der letzten Dekaden weniger in der direkten Substitution der menschlichen Arbeitskraft durch Roboter zu suchen sind – Bereiche wie der Karosseriebau sind bereits seit längerem stark automatisiert und die großen Beschäftigungseffekte bereits vor längerer Zeit eingetroffen. Wichtige Veränderungen der Prozesstechnologien scheinen sich vor allem auf Vernetzung und Prozesssteuerung zu beziehen. Neue Prozesskontrolltechniken können hier beispielsweise ermöglichen, dass eine kleinere Zahl von Arbeitskräften einen größeren Maschinenpark bedient.
- Der Anteil der Berufe der Instandhaltung und Installation nimmt ab. Auch dies könnte einerseits mit neuen Prozesskontrolltechniken, aber auch Techniken der präventiven Instandhaltung zusammenhängen. Möglich sind aber auch organisatorische Veränderungen, etwa eine stärkere Integration von Instandhaltungsaufgaben in die Produktionsteams.

Diese Trends treffen sowohl für die Automobilhersteller als auch für die Zulieferer zu, allerdings auf sehr unterschiedlichen Niveaus. Im Fall der Automobilhersteller (NAICS 3361) machen die Montagearbeiter sogar 75% der Produktionsarbeiter aus (Tabelle 2). Die Press- und Karosseriewerke sind hoch automatisiert und beschäftigen nur noch wenig Personal. Ein anderes Bild ergibt sich bei den Zulieferern. Hier sind noch fast 33% der Produktionsarbeiter den Tätigkeitsgruppen der Metallherstellung und -bearbeitung zuzuordnen; auch hier werden aber immerhin 41% der Produktionsarbeiter der Montage zugeordnet.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Produktionsarbeiter in der amerikanischen Automobilindustrie

	1999	2007	2012	2018
Insgesamt	674.600 (100%)	738.400 (100%)	532.000 (100%)	732.300 (100%)
Assemblers and Fabricators (51-2000)	k.A.	319.800 (43,3%)	248.600 (46,7%)	377.000 (51,5%)
Metal and Plastic Workers (51-4000)	k.A.	k.A.	154.200 (29,0%)	185.200 (25,3%)
<i>Davon:</i>				
<i>Computer Control Programmers and Operators (51-4010)</i>	11.500 (1,7%)	15.500 (2,1%)	16.200 (3,0%)	13.910 (1,9%)
<i>Forming Machine Operators (51-4020)</i>	13.600 (2,0%)	k.A.	8.600 (1,6%)	8.000 (1,1%)
<i>Machine Tool Operators (51-4030)</i>	42.600 (6,3%)	53.200 (7,2%)	30.000 (5,6%)	35.700 (4,9%)
<i>Machinists (51-4040)</i>	14.800 (2,2%)	32.500 (4,4%)	23.500 (4,4%)	23.600 (3,2%)
<i>Molders, molding machine operators (51-4070)</i>	14.700 (2,2%)	k.A.	8.500 (1,6%)	15.000 (2,0%)
<i>Tool and die makers (4110)</i>	16.100 (2,4%)	19.700 (2,7%)	15.600 (2,9%)	14.300 (1,9%)
<i>Welding workers (4120)</i>	40.800 (6,0%)	46.700 (6,3%)	35.500 (6,7%)	44.850 (6,1%)
Other Production Occupations (51-5000 bis 51-9000)	k.A.	k.A.	65.800 (12,4%)	80.000 (10,9%)
<i>Davon:</i>				
<i>Painting workers (51-9120)</i>	15.100 (2,2%)	14.700 (2,0%)	11.200 (2,1%)	14.000 (1,9%)
<i>Inspectors (51-9060)</i>	34.500 (5,1%)	31.500 (4,3%)	22.200 (4,2%)	31.100 (4,2%)
Installation and maintenance occupations (49-000)	58.800 (8,7%)	61.900 (8,4%)	38.800 (7,3%)	50.400 (6,9%)
First-line supervisors (51-1000)	27.500 (4,1%)	33.900 (4,6%)	24.600 (4,6%)	39.700 (5,4%)

Quelle: Eigene Darstellung nach BLS. Substantiellere Veränderungen statistischer Klassifikationen, die die Vergleichbarkeit der Daten einschränken, sind durch eine dickere Linie gekennzeichnet.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Produktionsarbeiter in der amerikanischen Automobilindustrie im Jahr 2018

	Herstellung von Kraftfahrzeugen und Motoren (NAICS 3361)	Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern (NAICS 3362)	Herstellung von Teilen und Zubehör (NAICS 3363)
Insgesamt	187.600 (100%)	121.000 (100%)	423.900 (100%)
Assemblers and Fabricators	141.100 (75,2%)	60.600 (50,0%)	175.200 (41,3%)
Metal and Plastic Workers	14.900 (7,9%)	31.500 (26,0%)	138.800 (32,7%)
Other Production Occupations	10.400 (5,5%)	16.500 (13,6%)	53.200 (12,5%)
Installation and maintenance occupations	11.100 (5,9%)	6.400 (5,3%)	33.000 (7,8%)
First-line supervisors	10.000 (5,3%)	6.000 (4,9%)	23.600 (5,6%)

Quelle: Eigene Darstellung nach BLS.

Im Fall der japanischen Berufsstatistik (Tabelle 3) ist zu berücksichtigen, dass sich die Bezeichnungen der Tätigkeitsgruppen im Vergleich zur amerikanischen Statistik eher an größeren Einsatzbereichen orientieren und sich weniger auf die spezielle Funktion der Beschäftigten beziehen. Zudem werden die Shopfloorvorgesetzten nicht als eine eigene Kategorie erfasst. Deutlich werden hier aber sehr ähnliche Trends wie in den USA.

- Die Montagebeschäftigung bleibt in absoluten Zahlen weitgehend stabil und gewinnt innerhalb der Gruppe der Produktionsarbeiter relativ an Bedeutung. Ihr Anteil liegt nochmal deutlich höher als in den USA, allerdings werden hier die Shopfloorvorgesetzten nicht getrennt ausgewiesen. Berücksichtigt man, dass die Produktionsteams und die Führungsspannen in Japan eher klein sind, nähert sich der Anteil der Montagearbeiter dem amerikanischen Niveau an.
- Der Anteil der Tätigkeitsgruppen der Metallbearbeitung nimmt ab. Im Unterschied zu den USA betrifft die Abnahme allerdings fast alle Tätigkeitsgruppen, also auch Karosseriebauarbeiter (und übrigens auch Lackierereiarbeiter). Diese Entwicklung ist in den Jahren 1995-2005 besonders ausgeprägt, setzt sich aber auch danach fort – wenngleich die Interpretation der Daten hier durch die Einführung einer neuen Tätigkeitsgruppe – der „machine inspection workers“⁸⁰ – eingeschränkt ist. Wiederum spricht diese Entwicklung dafür, dass die beschäftigungsrelevanten Entwicklungen im Bereich der Automatisierung in den letzten Jahrzehnten nicht die manuelle Arbeit und ihre Substitution betreffen

⁸⁰ Der Begriff „Machine inspection workers“ ist die vom SBJ vorgenommene Übersetzung der entsprechenden japanischen Berufskategorie. Diese Kategorie ist nicht ganz klar, zumal sie etwa die Hälfte der Arbeiter in der Metall-Tätigkeitsgruppe umfasst. Gemäß der vom SBJ genutzten Beschreibung dieser Kategorie, sind diese Arbeiter für die „inspection of intermediate and final products in the production activities of various machines“ verantwortlich (SBJ 2015). Das kann auf Qualitätskontrolleure, aber auch Maschinenbediener hindeuten, die für die Überwachung der Maschinen und der produzierten Teile zuständig sind.

haben, sondern vielmehr eine stärkere Vernetzung und Digitalisierung der Prozesssteuerung bedeuteten, die dazu geführt hat, dass die automatisierten Anlagen in der Metallbearbeitung von einer kleineren Gruppe von Beschäftigten bedient werden können. Die im Unterschied zu den USA fallenden Zahlen der Karosseriebauarbeiter könnten mit Bemühungen um Automatisierung von Einlegetätigkeiten durch Material-Handling-Roboter zusammenhängen.

Der Anteil der Instandhaltungsarbeiter ist in Japan im Vergleich zu den USA geringer, was angesichts der stärkeren Integration von Instandhaltungstätigkeiten in die Aufgaben der Produktionsteams plausibel ist (Adler 1995; Jürgens 2015). Eine Aufgliederung nach Automobilherstellern und Zulieferern ist übrigens mit den hier genutzten Daten des japanischen Zensus nicht möglich.

Tabelle 3: Zusammensetzung der Produktionsarbeiter in der japanischen Automobilindustrie

	1995	2005	2010	2015
Gesamt	629.300 (100%)	567.200 (100%)	553.600 (100%)	561.600 (100%)
Assembly workers (JSOC 51a-51f)	299.300 (47,6%)	352.400 (62,1%)	331.200 (59,8%)	351.000 (62,5%)
Metal Workers (JSOC 49a-49j/581-585)	241.700 (38,4%)	143.200 (25,2%)	156.000 (28,2%)	145.800 (26,0%)
<i>Davon:</i>				
<i>Machine tool workers (JSOC 49d)</i>	<i>29.900 (4,7%)</i>	<i>28.800 (5,1%)</i>	<i>19.600 (3,5%)</i>	<i>16.900 (3,0%)</i>
<i>Metal press workers (JSOC 49e)</i>	<i>27.300 (4,3%)</i>	<i>18.300 (3,2%)</i>	<i>12.700 (2,3%)</i>	<i>11.700 (2,1%)</i>
<i>Welding process workers (JSOC 49i)</i>	<i>24.200 (3,8%)</i>	<i>18.200 (3,2%)</i>	<i>15.300 (2,8%)</i>	<i>14.200 (2,5%)</i>
<i>Machine inspection workers (JSOC 581-585)</i>	<i>(in anderen Subkategorien eingeschlossen)</i>	<i>(in anderen Subkategorien eingeschlossen)</i>	<i>73.600 (13,3%)</i>	<i>71.700 (12,8%)</i>
Other Production Occupations	54.700 (8,7%)	44.500 (7,8%)	40.000 (7,2%)	37.700 (6,7%)
<i>Davon:</i>				
<i>Painting workers</i>	<i>19.700 (3,1%)</i>	<i>16.900 (3,0%)</i>	<i>15.900 (2,9%)</i>	<i>14.900 (2,6%)</i>
Maintenance and repair workers (JSOC 551-555)	28.400 (4,5%)	24.300 (4,3%)	26.300 (4,7%)	27.100 (4,8%)

Quelle: Eigene Darstellung nach SBJ. Berufskategorien nach 2015 JSOC. Substantiellere Veränderungen statistischer Klassifikationen, die die Vergleichbarkeit der Daten einschränken, sind durch eine dickere Linie gekennzeichnet.

Die Interpretation der Entwicklung der Beschäftigungszusammensetzung in der deutschen Automobilindustrie (Tabelle 4) steht vor mehreren Herausforderungen. Die erste Schwierigkeit ist,

dass sich die deutsche Statistik nicht so eindeutig wie die japanische an den Einsatzbereichen der Arbeitskräfte (z.B. Montage, Instandhaltung etc.) orientiert und zugleich die Tätigkeitsgruppen viel weiter gefasst sind als in der amerikanischen Statistik. So lässt sich beispielsweise die Gruppe der Montaguearbeiter nicht genau eingrenzen. Während die amerikanische und die japanische Berufsstatistik Montaguearbeiter als eine eigene Gruppe kennt, sind Arbeitskräfte aus der Montage in Deutschland nicht ganz klar zu identifizieren. In der hier vorliegenden Analyse wurden die folgenden Tätigkeitsgruppen der KldB 1988 als montagebezogen klassifiziert: Maschinen- und Gerätezusammensetzer, Montierer, Maschinenschlosser, Elektrogerätemontierer und Hilfsarbeiter. In der KldB 2010 sind die Tätigkeitsgruppen noch weiter zusammengefasst worden. Als montagebezogen wurden basierend auf den Äquivalenztabelle zur Umstellung von KldB 1988 auf KldB 2010 klassifiziert: Tätigkeitsgruppen der Maschinenbau- und Betriebstechnik, die Maschinen- und Gerätezusammensetzer sowie Tätigkeitsgruppen der Kraftfahrzeugtechnik und der Elektrotechnik. Die Einordnung ist allerdings nicht sehr scharf, denn beispielsweise die Tätigkeitsgruppen der Kraftfahrzeugtechnik (z.B. Kfz-Mechatroniker) sind zwar in Montagebereichen verbreitet, finden sich aber auch in der Anlagenführung. Die gleiche Problematik gilt für Instandhaltungstätigkeiten – auch diese sind nicht genau eingrenzbar. Die deutsche Statistik unterscheidet hier Tätigkeiten der Betriebstechnik (Technische Servicekräfte in der Wartung und Instandhaltung), der Mechatronik und Automatisierungstechnik sowie der Elektromaschinenteknik. Wiederum ist die Zuordnung nicht sehr scharf, denn gerade der Mechatroniker ist eine Art Universalberuf der Automobilbranche und findet seinen Einsatz sowohl in der Anlagenführung als auch in der Instandhaltung.

Die zweite große Schwierigkeit in der Interpretation der Daten ist die Tatsache, dass zwischen 2008 und 2012 zwei große statistische Wechsel stattfanden: eine größere Revision der Branchenklassifikation und eine grundlegende Reform der Berufsklassifikation. Aus diesem Grund verfahren wir folgendermaßen. Um Trends in der Entwicklung von Berufsgruppen zu erfassen, werden die Entwicklungen zwischen 1999 und 2007 sowie zwischen 2013 und 2018 getrennt betrachtet, und es wird nur dann auf einen generellen Trend geschlossen, wenn beide übereinstimmen.

- Grundsätzlich ist anzumerken, dass in der deutschen Automobilindustrie der Anteil von Arbeitskräften in Montagetätigkeiten – soweit sich diese eingrenzen lassen – deutlich niedriger ist als in den USA und Japan. Dies könnte vor allem an der in den letzten Dekaden sehr stark ausgeprägten Verlagerung von arbeitsintensiven Produktionsprozessen (Montagen) in die Niedriglohnländer Mitteleuropas liegen, insbesondere bei den Automobilzulieferern (Jürgens/Krzywdzinski 2009 und 2010; Krzywdzinski 2014; Schwarzkocher et al. 2019), denn die leicht höhere Automatisierung von Montageprozessen in deutschen Automobilwerken im Vergleich zu Japan und den USA kann diesen großen Unterschied der Beschäftigungsanteile nicht erklären. Ein klarer Trend des Anteils der Montagebeschäftigung ist in der deutschen Automobilindustrie in den letzten 10-20 Jahren nicht zu erkennen – auch nicht im Sinne eines Schrumpfens.
- Die Tätigkeitsgruppen der Metallherstellung und -bearbeitung zeigen in beiden hier unterschiedenen Perioden keinen klaren Trend. Allerdings gibt es deutliche Verschiebungen innerhalb dieser Tätigkeitsgruppen. Der Anteil der Tätigkeitsgruppen der Metallbearbeitung und der Schweißtechnik nimmt deutlich ab. Zugleich nimmt aber der Anteil der Maschinen- und Anlagenführer deutlich zu. Dies könnte einerseits mit technischen Ver-

änderungen zusammenhängen, etwa mit der Automatisierung von Restbeständen an manuellen Schweißarbeiten oder von Einlegetätigkeiten im Karosseriebau. Es könnte aber auch Veränderungen der statistischen Zuordnung in den Unternehmen gegeben haben. So gibt es eine Entwicklung hin zu breiteren Berufsbildern (etwa dem Mechatroniker), die universell eingesetzt werden – es könnte sein, dass Beschäftigte, die früher einer Tätigkeitsgruppe im Bereich des Metallbaus (etwa Fachkräfte für Schweißtechnik) zugeordnet wurden, nun als Anlagenführer klassifiziert werden.

Tabelle 4: Zusammensetzung der Produktionsarbeiter in der deutschen Automobilindustrie

	1999	2007	2013	2018
Insgesamt	394.200 (100%)	410.400 (100%)	458.800 (100%)	487.500 (100%)
Montagebezogene Berufe	113.100 (28,7%)	135.500 (32,9%)	163.800 (35,7%)	169.800 (34,7%)
Metallberufe	185.500 (47,0%)	180.300 (44,0%)	152.000 (33,1%)	161.300 (33,1%)
<i>Davon:</i>				
<i>Berufe in der Metallerzeugung</i>	5.100 (1,3%)	4.500 (1,1%)	7.400 (1,6%)	7.700 (1,6%)
<i>Berufe in der Metallbearbeitung</i>	93.800 (23,8%)	89.900 (21,9%)	68.700 (15,0%)	69.300 (14,2%)
<i>Berufe im Metallbau und Schweißtechnik</i>	59.900 (15,2%)	57.700 (14,0%)	25.900 (5,6%)	26.200 (5,4%)
<i>Berufe in der Werkzeugtechnik</i>	13.600 (3,4%)	13.000 (3,2%)	12.700 (2,8%)	11.500 (2,4%)
<i>Maschinen- und Anlagenführer</i>	13.000 (3,3%)	14.600 (3,6%)	37.200 (8,1%)	46.500 (9,5%)
Andere Produktionsberufe	61.800 (15,7%)	60.400 (14,7%)	82.000 (17,9%)	91.000 (18,7%)
<i>Davon:</i>				
<i>Berufe in der Lacktechnik</i>	20.600 (5,2%)	16.200 (3,9%)	12.300 (2,7%)	11.900 (2,4%)
<i>Qualitätssicherung</i>	19.500 (4,9%)	21.400 (5,2%)	25.400 (5,5%)	26.100 (5,4%)
Automatisierungsbezogene Berufe: Wartung und Instandhaltung, Berufe der Mechatronik, Automatisierungstechnik, Elektromaschinenteknik	19.000 (4,8%)	19.200 (4,6%)	39.100 (8,5%)	43.400 (9,0%)
Aufsichtskräfte in der Produktion	11.200 (2,8%)	11.400 (2,8%)	19.200 (4,1%)	19.000 (3,9%)

Quelle: Eigene Darstellung nach BA. Substantiellere Veränderungen statistischer Klassifikationen, die die Vergleichbarkeit der Daten einschränken, sind durch eine dickere Linie gekennzeichnet.

- Die Tätigkeitsgruppen des Komplexes Instandhaltung-Automatisierungstechnik-Mechatronik machen einen etwas höheren Anteil der Beschäftigung aus als in den USA und

Japan. Im gesamten hier betrachteten Zeitraum nimmt der Anteil dieser Tätigkeitsgruppen in der deutschen Automobilindustrie zu. Eine Erklärung kann die steigende Komplexität von Prozesstechnologien in der Automobilindustrie sein, auf die die deutschen Unternehmen mit einer Modernisierung der Berufsbilder und Aufbau von Fachpersonal antworten (Jürgens 2020; Krzywdzinski 2020; Kuhlmann 2004).

Die hier dargestellten Trends des Wandels der Beschäftigung in der Produktionsarbeiterschaft gelten in gleichem Maß für Automobilhersteller und für Automobilzulieferer, allerdings auf unterschiedlichen Niveaus (vgl. Tabelle 5). Bei den Automobilherstellern machen Montagearbeiter einen deutlich höheren Anteil der Produktionsarbeiterschaft aus als bei den Automobilzulieferern, während es sich bei den Metallberufen umgekehrt verhält. Das liegt daran, dass zentrale Prozesse der Metallbearbeitung (Gießen, mechanische Bearbeitung der Teile und Komponenten bis hin zum Verschweißen von Baugruppen) nicht mehr schwerpunktmäßig von den Automobilherstellern selbst, sondern von den Zulieferern übernommen werden. Die Prozesse der Metallbearbeitung bei den Automobilherstellern (Presswerke, Karosseriewerke) sind seit längerer Zeit hoch automatisiert, so dass die Montagebereiche im Hinblick auf Beschäftigung einen deutlich größeren Anteil haben.

Tabelle 5: Zusammensetzung der Produktionsarbeiter in der deutschen Automobilindustrie im Jahr 2018

	Herstellung von Kraftfahrzeugen und Motoren (WZ 2008 291)	Herstellung von Karosserien, Aufbauten und Anhängern (WZ 2008 292)	Herstellung von Teilen und Zubehör (WZ 2008 293)
Insgesamt	232.500 (100%)	26.900 (100%)	228.100 (100%)
Montagebezogene Berufe	99.800 (42,9%)	10.000 (37,4%)	59.600 (26,1%)
Metallberufe	50.600 (21,8%)	9.800 (36,4%)	100.800 (44,2%)
Andere Produktionsberufe	42.200 (18,1%)	4.300 (16,0%)	44.500 (19,5%)
Automatisierungsbezogene Berufe	28.700 (12,4%)	1.400 (5,1%)	13.300 (5,8%)
Aufsichtskräfte	10.500 (4,5%)	900 (3,2%)	7.700 (3,2%)

Quelle: Eigene Darstellung nach BA.

Wie oben ausgeführt, geben die in den Tabellen dargestellten Anteile der Tätigkeitsgruppen leider keinen Aufschluss darüber, inwieweit es sich um Facharbeiter oder um angeleitete Arbeitskräfte handelt. Für die 1990er Jahre liegen Fallstudien von deutschen Automobilwerken vor (Schumann et al. 1994; Kuhlmann 2004), die Aufschluss über die Beschäftigungsstrukturen in der Montage und im Karosseriebau geben. Die Automatisierung hatte in den 1990er Jahren die Strukturen im Karosseriebau stark verändert. Anfang der 1990er Jahre bestand die Produktionsarbeiterschaft in den Karosseriewerken noch zu 60-70% aus der Handarbeit am Produkt (Schweißen, Oberflächen-

bearbeitung etc.), zu 20-30% aus angelernten Maschinenbedienern und Einlegern, sowie max. 10% aus Facharbeitern in der Anlagenführung. Im Jahr 2000 zeigten moderne Karosseriewerke der Automobilhersteller einen Anteil von etwa 30% Anlagenführern (Facharbeitern), etwa 40-50% (oftmals angelernten) Maschinenbedienern und Einlegern sowie 20-30% Handarbeitern am Produkt (z.B. Oberflächenbearbeitung und Nacharbeit mit einem relativ hohen Anteil an Facharbeitern) (Kuhlmann 2004: 245).

In der Montage bestand die Produktionsarbeiterschaft Ende der 1990er Jahre aus bis zu 10% Facharbeitern (vorwiegend Anlagenführer in den automatisierten Inseln der Montage), etwa 25-40% gehobenen angelernten Arbeitern (vorwiegend Maschinenbedienung sowie komplexere manuelle Aufgaben) und etwa 25-40% einfachen Angelernten (Kuhlmann 2004: 178).

Aufgrund des graduellen Wandels der Automatisierung im Karosseriebau und in der Montage können wir erwarten, dass sich diese Strukturen nur in einem langsamen Tempo verändert haben. Anzunehmen wäre ein leichter Anstieg des Anteils der Facharbeiter und eine leichte Abnahme der angelernten Arbeitskräfte – aufgrund der steigenden Komplexität der Technologien und auch aufgrund der Rekrutierung der Automobilhersteller, die attraktive Arbeitgeber sind und Arbeiter mit einer Berufsausbildung auch für solche Bereiche rekrutieren können, in denen nicht unbedingt eine Berufsausbildung vorausgesetzt wird.⁸¹

Wie können wir die Befunde dieses Unterkapitels zusammenfassen? Grundsätzlich lassen sich in den Beschäftigungsdaten der Automobilindustrie seit den 1990er Jahren kaum Anzeichen dafür finden, dass der technische Wandel eine Automatisierung manueller Tätigkeiten in der Montage bedeutet hätte. Montagebeschäftigung (wie übrigens auch Logistiktätigkeiten) zeigt eine erstaunliche Stabilität.

⁸¹ Da die Statistik der Bundesagentur für Arbeit keine Informationen über den Einsatzbereich der Arbeiter gibt, ist es nicht möglich, sie für einen direkten Vergleich mit Fallstudien aus den 1990er und 2000er Jahren zu nutzen. Um den Anteil der angelernten Arbeitskräfte zu ermitteln, können zwar die seit 2013 vorliegenden Angaben genutzt werden, zur Feststellung ob es sich um Arbeitsplätze mit Anforderungen auf „Helferniveau“ oder „Fachkraftniveau“ handelt. Die Bezeichnung „Helfer“ ist dabei unglücklich; es ist unklar, ob damit alle angelernten Arbeitskräfte erfasst werden oder nur sehr kurz angelernte Arbeitskräfte mit einfachen Tätigkeiten. Es ist auch nicht bekannt, wie zuverlässig die Angaben der Unternehmen über die Zuordnung der Niveaus sind. Die Statistik zeigt für die Produktionsarbeiterschaft in der Automobilherstellung einen sehr niedrigen Anteil von 17% Arbeitskräften auf „Helferniveau“ unter den montagebezogenen Tätigkeitsgruppen, den Tätigkeitsgruppen der Metallbearbeitung und anderen Produktionsberufen. Plausibel ist dieser Wert von 17% nur, wenn angenommen wird, dass er bei weitem nicht alle angelernten Arbeitskräfte in der direkten Produktion in Automobilwerken umfasst, sondern ausschließlich kurz angelernte Arbeitskräfte in einfachen Tätigkeitsbereichen. Die Statistik liefert auch Angaben darüber, ob die Arbeitskräfte eine abgeschlossene Ausbildung haben oder nicht. Diese Angaben sind allerdings sehr wenig aussagekräftig, da nicht klar ist, ob es sich um eine einschlägige Berufsausbildung handelt. In den Automobilunternehmen wurden oftmals Arbeiter rekrutiert, die in einem gänzlich anderen Beruf (z.B. Bäcker) eine Berufsausbildung hatten, aber in der Automobilproduktion als angelernte Arbeitskräfte arbeiteten. Die Statistik der Bundesagentur für Arbeit gibt für 2018 den Anteil von Produktionsarbeitern ohne Berufsausbildung in Tätigkeitsgruppen der Metallherstellung und -bearbeitung mit 5% an. Für montagebezogene Tätigkeitsgruppen liegt der Anteil der Produktionsarbeiter ohne Berufsausbildung 2018 bei 10%. Offenbar handelt es sich um Angaben, ob überhaupt ein Ausbildungsabschluss vorliegt, und nicht ob dieser Abschluss für die Automobilproduktion eine Relevanz hat.

Eine tendenzielle (wenngleich eher langsame) Abnahme der Beschäftigung zeigt sich hingegen in der Fertigung am ehesten in Tätigkeitsgruppen und Berufen, die für hoch automatisierte Bereiche typisch sind, beispielsweise in der Maschinenbedienung, aber auch im Bereich des Schweißens. Dies könnte durch Automatisierung von Resttätigkeiten (etwa von Einlegetätigkeiten durch Material-Handling-Roboter) oder durch die zunehmende Vernetzung und Weiterentwicklung der Prozesssteuerung erklärt werden, die es den Arbeitern erlaubt, eine zunehmend größere Menge von Anlagen zu überwachen und zu steuern.

6. Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie führt zu einer Reihe von Schlussfolgerungen. Erstens ist hervorzuheben, dass der technische Wandel in der Automobilindustrie nicht primär als eine Zunahme der Automatisierung zu verstehen ist. Seit den 1990er bis zu den 2010er Jahren sind die Automatisierungsniveaus in Presswerken, im Karosseriebau und der mechanischen Bearbeitung auf einem sehr hohen (oftmals der Vollautomatisierung nahen) Niveau gleich geblieben – zumindest, wenn wir von Nachzüglern der Automatisierung, insbesondere unter den Kleinen und Mittleren Unternehmen, absehen. Die Entwicklungen drehen sich um eine immer höhere Komplexität der Technik, um die Kombination verschiedener Materialien, eine höhere Präzision und höhere Flexibilität. Die Montageprozesse bleiben wiederum relativ wenig automatisiert; hier hat es seit den 1990er Jahren nur geringe Änderungen gegeben. Diese Unterschiede zwischen Montage und Karosseriebau reflektieren die stofflich-technischen Besonderheiten der jeweiligen Produktionsprozesse.

Dies legt nahe, den in der Forschung derzeit sehr beliebten und überschätzten Indikator der Roboterdichte stärker zu problematisieren – sein Wert als Indikator für Automatisierung scheint fraglich. Seit den 1990er Jahren hat sich die Roboterdichte in der Automobilindustrie verdreifacht, die Automatisierungsniveaus sind aber weitgehend gleichgeblieben. Dies hängt damit zusammen, dass eine höhere Roboterzahl oftmals die erhöhte Komplexität eines automatisierten Prozesses anzeigt und nicht unbedingt die Erhöhung des Automatisierungsgrades selbst.

Die Fixierung auf Roboter übersieht zudem, dass der Wandel von Beschäftigungsstrukturen weniger durch Automatisierung der Produktion als durch Digitalisierung in den indirekten Bereichen der Entwicklung, Konstruktion oder auch Planung getrieben wurde. Der Einsatz digitaler Tools hat hier auf der einen Seite den Aufwand für Berechnungen, Simulationen und Datenabgleich enorm reduziert. Dies wird auf der anderen Seite aber mehr als kompensiert durch die rasant steigende Komplexität der Entwicklungs- und Planungsprozesse aufgrund steigender Modellvielfalt, kürzeren Modellzyklen, steigender Komponentenvielfalt, steigenden Anforderungen an Sicherheit und Qualität sowie auch der Globalisierung und Fragmentierung der Logistikketten. Ohne die Digitalisierung wären diese Entwicklungen nicht möglich gewesen. In den letzten Jahren sind zudem mit der Elektromobilität und dem autonomen Fahren neue Innovationsthemen wichtig geworden, die eine massive Stärkung der Entwicklungskapazitäten der Unternehmen erfordern. Die Bedeutung von Wissensarbeit nimmt in vielen Bereichen der Automobilindustrie zu.

Diese historische Analyse führt zu einigen allgemeinen Überlegungen im Hinblick auf die Debatte über die Zukunft der Automatisierung und Digitalisierung.

- Erstens ist eine Ableitung von Automatisierungspotentialen auf der Ebene einzelner Berufe oder Tätigkeitsgruppen (z.B. Frey/Osborne 2013; Dengler/Matthes 2018) nur bedingt sinnvoll. Vielmehr gilt es, die stofflich-technischen Bedingungen auf der Ebene eines gesamten Fertigungsprozesses zu betrachten. Einzelne Montagetätigkeiten können durchaus sehr stark routinisiert sein, weshalb Montagearbeiter nach Frey und Osborne (2013) mit 98%iger Wahrscheinlichkeit mittelfristig durch Automatisierung bedroht sein sollen. Die Betrachtung der Montageprozesse in der Automobilindustrie zeigt allerdings, dass die Vielfalt der Einzeltätigkeiten sowie der Teile- und Modellvarianten, die Schwankungen der Produktionsvolumina und des Produktmixes sowie eine Fertigungsumgebung, in der Roboter sich nur schwer bewegen können (z.B. der Innenraum des Autos) bislang sehr schwierige Bedingungen für die Automatisierung der Montage bieten.
- Dies führt zu der zweiten Überlegung, dass die Analyse von Automatisierungsprozessen die Entwicklung der Produktarchitekturen berücksichtigen muss. Dieser Punkt ist in der hier vorliegenden Analyse nur an einigen Stellen kurz angesprochen worden, weil es einen ganz radikalen Wandel der Produktarchitekturen im Automobilbau in den letzten zwei Dekaden nicht gegeben hat. Dennoch wird deutlich, dass Produktarchitekturen die Automatisierbarkeit beeinflussen. Um beim Beispiel der Montage zu bleiben, reduziert beispielsweise die Wende von Verbrennungs- zu Elektromotoren die Komplexität des Automobils im Bereich Antriebsstrang – dies könnte die Automatisierung von Montageschritten im Motorraum erleichtern.
- Drittens ist zu berücksichtigen, dass die Produkte selbst einem starken Wandel unterworfen sind. Die abstrakte Abschätzung von Automatisierungspotentialen auf der Ebene der Tätigkeiten bzw. Berufe (Frey/Osborne 2013; Dengler/Matthes 2018) beruht aber auf einem statischen Modell, weil sie die Tätigkeiten aus dem Kontext der Produkte und Prozesse herausnimmt. Im Fall der Automobilindustrie trieben die steigenden Anforderungen an Qualität und Sicherheit der Autos die Digitalisierung der Prozesse und die Entwicklung neuer Fertigungstechnologien voran; der Druck zur Reduktion des Fahrzeuggewichts wegen steigender Umweltnormen führte zur Nutzung neuer Materialien und veränderte wiederum die Fertigungsverfahren; hinzu kommen die Innovationen im Bereich der Antriebstechnologien und die Schritte hin zum Autonomen Fahren. Diese Entwicklungen haben die Anforderungen im Bereich der Produktentwicklung und Fertigungsplanung enorm gesteigert und die Digitalisierung bedeutete hier oftmals, die Instrumente für die Bewältigung dieser neuen Anforderungen bereitzustellen. Dabei wurden sicherlich auch manche Prozesse im Bereich der Kalkulation und Simulation automatisiert – zugleich stieg aber die Komplexität der Entwicklung und Planung so stark, dass sowohl mehr menschliche Arbeit als auch mehr technische Unterstützung benötigt wurden.
- Viertens muss betont werden, dass technische Innovationen oftmals erst dann zu Produktivitätsfortschritten führen, wenn sie mit organisatorischen Innovationen verbunden werden. Dieser Punkt ist von der Forschung über den Wandel der Produktionssysteme in der Automobilindustrie immer wieder herausgearbeitet worden (Jürgens 1997 und 2020; Williams et al. 1992; Adler 1988). Auswirkungen technischer und organisatorischer Veränderungen lassen sich dementsprechend zumeist kaum auseinanderhalten.

Die zweite wichtige Schlussfolgerung dieser Studie sind die Unterschiede in den Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen der deutschen, japanischen und amerikanischen Automobilindustrien. Die Vielfalt der Unternehmensstrategien wird in der gegenwärtigen Diskussion, die oftmals einen universellen und globalen Trend der Automatisierung und Digitalisierung annimmt, häufig übersehen. Es zeigt sich, dass es sehr unterschiedliche Motivkonstellationen und Einschätzungen über die Leistungsfähigkeit, Kosten und Vorteile der Technik gibt. Die deutsche Automobilindustrie bleibt der Orientierung an High-Tech-Automatisierung treu und treibt die Technikentwicklung im Karosseriebau (etwa Lasertechnik, Einsatz neuer Materialien wie Aluminium) voran; sie hält an Bemühungen um Automatisierung der Montage fest (auch wenn sie bislang nur wenig Früchte tragen); und sie gehört zu den Vorreitern der „digitalen Fabrik“. Die japanischen Unternehmen gehen mit einer etwas größeren Technikskepsis vor und weisen der Flexibilität und Beherrschbarkeit der Komplexität in der Produktion einen großen Stellenwert zu. Die amerikanischen Unternehmen wiederum scheinen Investitionen in Fertigungstechnik derzeit eher nachrangig zu behandeln. Sie sind 2009 durch eine massive Krise gegangen und müssen ihre Ressourcen besonders stark auf Innovationsthemen wie Elektromobilität und Autonomes Fahren konzentrieren. Eine Rolle könnte aber auch die organisationale Innovationsschwäche der amerikanischen Automobilhersteller spielen, die von Autorinnen wie Helper und Henderson (2014) auf die Organisationsstrukturen und das fehlende Vertrauen zwischen den Akteuren in der Organisation und in der Industrie zurückgeführt wird.

Auch diese Schlussfolgerung führt zu einer allgemeinen Überlegung im Hinblick auf die Zukunft der Automatisierung und Digitalisierung. Sie verdeutlicht, dass es eine Vielfalt der Entwicklungspfade gibt und dass noch offen ist, inwieweit sich der Weg einer offensiven Digitalisierung und Automatisierung überhaupt als erfolgreich erweisen wird. Die für die deutsche Automobilindustrie charakteristische Vorreiterrolle bei Digitalisierung und Automatisierung könnte ein Vorteil sein oder sich auch als teures Overengineering erweisen – übrigens nicht zum ersten Mal (Jürgens/Naschold 1994).

Inwiefern lassen sich Auswirkungen der jeweiligen Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze auf Beschäftigungsstrukturen identifizieren? Grundsätzlich ist an dieser Stelle Vorsicht angebracht, denn der deskriptive Ansatz der hier verfolgten Analyse erlaubt keine Identifikation von Kausalbeziehungen.

Es ist – als dritte zentrale Schlussfolgerung dieser Studie – festzustellen, dass in allen drei Ländern die Beschäftigung in den manuell geprägten Montagebereichen eine erstaunliche Stabilität zeigt. Von einer kontinuierlichen Reduktion der Montagebeschäftigung ist wenig zu sehen. Langfristig zeigen sich eher abnehmende Anteile der Beschäftigung in Tätigkeitsgruppen, die in hoch automatisierten Bereichen eingesetzt werden – typischerweise im Bereich der Schweiß- und Lackiertätigkeiten, teilweise auch im Bereich der Maschinenbedienung. Dies kann teilweise das Resultat der Automatisierung von Einlegetätigkeiten durch Material-Handling-Roboter sein. Es scheint zudem, dass die zunehmende Digitalisierung eine zunehmende Effizienz der Steuerung, Bedienung und Instandhaltung von Anlagen ermöglicht.

Es ist zu beobachten, dass die unter dem Stichwort „digitale Fabrik“ versammelten Investitionen in die Digitalisierung der Produktentwicklung und Planung nicht mit einem Abbau von Beschäftigung in Ingenieurbereichen einhergehen. Im Gegenteil: gerade im Fall der deutschen Automobil-

industrie, die besonders stark in Konzepte der „digitalen Fabrik“ investiert, zeigt sich ein massiver Aufbau von Beschäftigung in den Tätigkeitsgruppen der Ingenieure und Informatiker. Sicherlich tun allerdings Entwicklungen im Bereich der Elektromobilität und des autonomen Fahrens ihren Teil dazu, das Wachstum der Beschäftigung von Ingenieuren und Informatikern zu fördern.

Es werden allerdings, so die vierte zentrale Schlussfolgerung, Unterschiede zwischen Deutschland, Japan und den USA deutlich, die einerseits die Unterschiede der Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze reflektieren, andererseits aber auch die arbeitspolitischen Leitbilder spiegeln.

Die deutsche Automobilindustrie zeigt einen kontinuierlichen und langfristigen Wandel: der Anteil der Arbeiter an der Gesamtbeschäftigung nimmt ab, innerhalb der Produktionsbelegschaften gibt es eine gewisse Verschiebung hin zu höheren Facharbeiteranteilen, der Anteil der Ingenieure und Informatiker steigt stark an. Dies lässt sich als eine Fortsetzung der Professionalisierungsstrategien ansehen, mit denen die deutsche Automobilindustrie auch schon in den letzten Jahrzehnten auf technologischen Wandel reagiert hat. Die japanische Automobilindustrie zeigt einen ähnlichen, wenngleich etwas langsamer ablaufenden Trend. Die Beschäftigungsstrukturen der amerikanischen Automobilindustrie scheinen hingegen wie eingefroren und der Anteil der Ingenieure und Informatiker frappierend niedrig, zumindest im Vergleich mit Deutschland und Japan.

Ein Teil dieser Unterschiede ist nun vielleicht auf die Grenzen der hier genutzten Statistiken zurückzuführen. So wird beispielsweise die Globalisierung der Produktentwicklungsaktivitäten der Unternehmen nicht berücksichtigt. Sie ist im Fall der amerikanischen Unternehmen besonders stark ausgeprägt, was einen Teil der Unterschiede zwischen den Ländern in der Entwicklung der Zahl der Ingenieure erklärt. Es ist auch durchaus wahrscheinlich, dass der Wandel der Beschäftigungsstruktur in der deutschen Automobilindustrie nicht nur auf Technik bzw. Automatisierung zurückzuführen ist, sondern auch (oder noch mehr) auf die massiven Verlagerungsprozesse von Produktion aus Deutschland insbesondere nach Mittelosteuropa (Jürgens/Krzywdzinski 2009 und 2010) – hier gibt es aber keinen systematischen Vergleich zwischen den drei untersuchten Ländern, eine Abschätzung der Bedeutung des technischen Wandels und der Verlagerungsprozesse ist an dieser Stelle daher nicht möglich. Bemerkenswert ist allerdings, dass im Fall der japanischen Automobilindustrie, die deutlich weniger durch Verlagerung von Produktion ins Ausland geprägt wurde, auch ein mit Deutschland vergleichbarer (wenngleich langsamerer) Wandel der Beschäftigungsstrukturen festzustellen ist. Hervorzuheben ist auch, dass im amerikanischen Fall zwar eine durchaus starke Verlagerung von Produktion an Niedriglohnstandorte (in diesem Fall nach Mexiko) stattgefunden hat, die Struktur der Beschäftigung in der amerikanischen Automobilindustrie aber bemerkenswert stabil geblieben ist. Diese Entwicklungen sprechen dafür, dass Automatisierungs- und Digitalisierungsansätze auch unabhängig von der Standortverlagerung ein Treiber des hier beschriebenen Wandels der Beschäftigung sein könnten. Die Länderunterschiede reizen zur Diskussion, inwieweit sich auch Schlussfolgerungen im Hinblick auf zukünftige Wettbewerbsfähigkeit der jeweiligen drei Länder ableiten lassen. Der Wandel der Beschäftigungsstrukturen in der deutschen Automobilindustrie zeigt den Versuch, im Hinblick auf Digitalisierung und Automatisierung eine Vorreiterrolle zu spielen und eigene Kompetenzen aufzubauen, während sich insbesondere in der amerikanischen Automobilindustrie die Strategie abzeichnet, Kompetenzen der Digitalisierung und Automatisierung extern einzukaufen und nicht selbst aufzubauen. Das spricht gegen die oftmals in der öffentlichen Debatte geäußerte

These, dass die deutsche Industrie gerade bei der Digitalisierung hinter ihren Konkurrenten in den USA oder Asien zurückliege.

Allerdings ist hier nochmal auf die Gefahr einer Übertechnisierung und eines Overengineering hinzuweisen. Zudem wird die Zukunft der Automobilindustrie nicht allein von den Automatisierungs- und Digitalisierungsansätzen abhängen. Entscheidend wird die Entwicklung zukunftsfähiger Produkte sein, also nachhaltiger Fahrzeuge, die an moderne Mobilitätskonzepte angepasst sind. In der nächsten Zukunft bedeutet das nicht nur einen Wandel hin zur Elektromobilität und dem Autonomen Fahren, sondern auch Veränderungen im Hinblick auf den Stellenwert, den individuelles Eigentum an Fahrzeugen noch hat. Das sind große strategische Herausforderungen, denen sich die Automobilunternehmen stellen müssen.

Literaturverzeichnis

- Acatech (2015), *Smart Maintenance für Smart Factories*, München/Berlin: Acatech
- Acatech/Forschungsunion (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, München/Berlin: Acatech.
- Acemoglu, Daron, & Restrepo, Pascual (2017), *Robots and jobs: Evidence from US labor markets*, NBER Working Paper No. 23285, Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.
- Acemoglu, Daron, & Restrepo, Pascual (2018), *Artificial Intelligence, Automation and Work*, NBER Working Paper 24196, Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research.
- Adler, Paul (1988), Managing flexible automation. *California Management Review* 30(3): 34-56.
- Adler, Paul (1995), 'Democratic Taylorism': the Toyota production system at NUMMI. In: Steve Babson (Hg.). *Lean work: Empowerment and exploitation in the global auto industry*. Detroit: Wayne State University Press, S. 207-219.
- Adler, Paul, & Cole, Robert (1993), Designed for Learning: A Tale of Two Auto Plants. *Sloan Management Review* 34(3): 85-94.
- Adler, Paul, Goldoftas, Barbara, & Levine, David I. (1999), Flexibility versus efficiency? A case study of model changeovers in the Toyota production system. *Organization Science* 10(1): 43-68.
- Aksoy, Cevat Giray, Berkay, Ozkan, & Philip, Julia (2019), *Robots and the Gender Pay Gap: Evidence from Europe*, Paper presented at the 2nd IZA/CREA Workshop: Exploring the Future of Work, 5./6. December 2019, Bonn: IZA
- Arntz, Melanie, Gregory, Terry, & Zierahn, Ulrich (2017), Revisiting the risk of automation. *Economics Letters* 159: 157-160.
- Autor, David H., Levy, Frank, & Murnane, Richard J. (2003), The skill content of recent technological change: An empirical exploration. *The Quarterly Journal of Economics* 118(4): 1279-1333.
- Baethge-Kinsky, Volker, Kuhlmann, Martin, & Tullius, Knut (2018), Technik und Arbeit in der Arbeitssoziologie – Konzepte für die Analyse des Zusammenhangs von Digitalisierung und Arbeit. *AIS-Studien*, 11(2): 91-106.
- Berggren, Christian (1997), Advanced automation or alternative production design? A reflection on the new Japanese assembly plants and the alternative approach of Volvo Uddevalla. In: Koichi Shimokawa; Ulrich Jürgens, & Takahiro Fujimoto (Hg.), *Transforming Automobile Assembly*. Berlin: Springer, S. 335-343.
- Boes, Andreas; Kämpf, Tobias; Gül, Katrin; Langes, Barbara; Lühr, Thomas; Marrs, Kira, & Ziegler, Alexander (2016), Digitalisierung und 'Wissensarbeit'. Der Informationsraum als Fundament der Arbeitswelt der Zukunft. *Aus Politik und Zeitgeschichte (APUZ)*, 66 (18-19): 32-39.
- Boudette, Neal (2018), Inside Tesla's Audacious Push to Reinvent the Way Cars Are Made, *New York Times* 30.6.2018, <https://www.nytimes.com/2018/06/30/business/tesla-factory-musk.html> (12.5.2020).
- Boyer, Robert, & Freyssenet, Michel (2000), *Productive Models. The Conditions of Profitability*, London: Palgrave Macmillan.

- Brown, Stuart (2004), Toyota's Global Body Shop. *Fortune Magazine* 9.2.2004. Verfügbar unter https://archive.fortune.com/magazines/fortune/fortune_archive/2004/02/09/360102/index.htm (12.5.2020).
- Bundesagentur für Arbeit (2010), *Beschäftigungsstatistik: Umstellung der Klassifikation der Wirtschaftszweige von WZ 2003 auf WZ 2008*, Nürnberg: Bundesagentur für Arbeit. Verfügbar unter <https://statistik.arbeitsagentur.de/cae/servlet/contentblob/4370/publicationFile/116196/Metho-denbericht-Beschaeftigungsstatistik-Umstellung-Klassifikation.pdf> (12.5.2020).
- Bureau of Labor Statistics (BLS) (2010), *What's New in the 2010 SOC*, Washington, DC: BLS. Verfügbar unter https://www.bls.gov/soc/soc_2010_whats_new.pdf (12.5.2020).
- Butollo, Florian, Jürgens, Ulrich, & Krzywdzinski, Martin (2018), Von Lean Production zur Industrie 4.0. Mehr Autonomie für die Beschäftigten?. *Arbeits- und Industriesoziologische Studien* 11(2): 75-90.
- Cacilo, Andrej, & Haag, Michael (2018), *Beschäftigungswirkungen der Fahrzeugdigitalisierung*, Study Nr. 406, Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.
- Calabrese, Giuseppe (2001), R&D globalisation in the car industry. *International Journal of Automotive Technology and Management* 1(1): 145-159.
- Carbonero, Francesco; Ernst, Ekkehard, & Weber, Enzo (2020), *Robots Worldwide: The Impact of Automation on Employment and Trade*, IAB Discussion Paper 7/2020, Nürnberg: IAB.
- Chanaron, Jean-Jacques, & Lung, Yanick (1999), Product Variety, Productive Organization, and Industrial Models. In: Yannick Lung; Jean-Jacques Chanaron; Takahiro Fujimoto, & Daniel Raff (Hg.), *Coping with Variety. Flexible Production Systems for Product Variety in the Auto Industry*, Aldershot: Ashgate, S. 3-34.
- Christensen, Clayton (1997), *The Innovator's Dilemma*, Boston: Harvard Business School.
- Coffey, Dan, & Thornley, Carole (2006), Automation, motivation and lean production reconsidered. *Assembly Automation* 26(2): 98-103.
- Cusumano, Michael (1985), *The Japanese automobile industry: Technology and management at Nissan and Toyota*, Cambridge, MA: Harvard University Asia Center.
- Daimler (2020), „Factory 56“. Mercedes-Benz Cars steigert Flexibilität und Effizienz in der Produktion. Verfügbar unter <https://www.daimler.com/innovation/produktion/factory-56.html> (12.5.2020).
- Daito, Eisuke (2000), Automation and the Organization of Production in the Japanese Automobile Industry: Nissan and Toyota in the 1950s. *Enterprise & Society* 1(1): 139-178.
- Dengler, Katharina, & Matthes, Britta (2018), The impacts of digital transformation on the labour market: Substitution potentials of occupations in Germany. *Technological Forecasting and Social Change* 137: 304-316.
- Director General for Policy Planning (Statistical Standards) (2007), *Japan Standard Industrial Classification* (Rev. 12, November 2007). Historical Background and Revision, Tokyo: Ministry of Internal Affairs and Communications, Verfügbar unter https://www.soumu.go.jp/english/dgpp_ss/seido/sangyo/san07-1.htm (12.5.2020).
- Director General for Policy Planning (Statistical Standards) (2009), *Comparison Table of Groups*, Tokyo: Ministry of Internal Affairs and Communications, Verfügbar unter https://www.soumu.go.jp/main_content/000327410.pdf (12.5.2020).

- Director General for Policy Planning (Statistical Standards) (2013), *Japan Standard Industrial Classification* (Rev. 13, October 2013). Historical Background and Revision, Tokyo: Ministry of Internal Affairs and Communications, Verfügbar unter https://www.soumu.go.jp/english/dgpp_ss/seido/sangyo/san13-1.htm (12.5.2020).
- Evers, Maren, Krzywdzinski, Martin, & Pfeiffer, Sabine (2019), Wearable Computing im Betrieb gestalten. Rolle und Perspektiven der Lösungsentwickler im Prozess der Arbeitsgestaltung. *Arbeit – Zeitschrift für Arbeitsforschung, Arbeitsgestaltung und Arbeitspolitik* 28(1): 3-27.
- Florida, Richard, & Kenney, Martin (1991), Transplanted organizations: The transfer of Japanese industrial organization to the US. *American Sociological Review* 56(3): 381-398.
- Florida, Richard, & Kenney, Martin (1994), The globalization of Japanese R&D: the economic geography of Japanese R&D investment in the United States. *Economic Geography* 70(4): 344-369.
- Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (1988), *Fortschritte in der Montage*, Dokumentation der 19. IPA-Arbeitstagung, Stuttgart: Fraunhofer IPA.
- Frey, Carl Benedikt, & Osborne, Michael (2013), *The Future of Employment*, Oxford: Oxford Martin School.
- Freyssenet, Michel (1999), Competitive strategies, industrial models and assembly automation templates. In: Anna Comacchio; Giuseppe Volpato, & Arnaldo Camuffo (Hg.), *Automation in Automotive Industries*, Berlin: Springer, S. 31-45.
- Fujimoto, Takahiro (1992), *Why Do Japanese Companies Automate Assembly Operations?*, Discussion paper for the Berlin Workshop on Assembly Automation, Berlin (WZB), November 1992, Verfügbar unter: <http://www.cirje.e.u-tokyo.ac.jp/research/dp/92/f15/dp.pdf> (12.5.2020)
- Fujimoto, Takahiro (1997), Strategies for Assembly Automation in the Automobile Industry. In: Koichi Shimokawa; Ulrich Jürgens, & Takahiro Fujimoto (Hg.), *Transforming Automobile Assembly*, Berlin: Springer, S. 211-237.
- Fujimoto, Takahiro (2000), Shortening Lead Time through Early Problem Solving – A New Round of Capability-building Competition in the Auto Industry. In: Ulrich Jürgens (Hg.), *New Product Development and Production Networks*, Berlin: Springer, S. 23-53.
- Giordano, Lorraine (1992), *Beyond Taylorism. Computerization and the New Industrial Relations*, Basingstoke: Macmillan.
- Goolsbee, Austan, & Krueger, Alan (2015), A Retrospective Look at Rescuing and Restructuring General Motors and Chrysler. *Journal of Economic Perspectives* 29(2): 3-24.
- Graetz, Georg, & Michaels, Guy (2018), Robots at work. *Review of Economics and Statistics* 100(5): 753-768.
- Groschen, Erica, Helper, Susan, MacDuffie, John Paul, & Carson, Charles (2019), *Preparing U.S. Workers and Employers for an Autonomous Vehicle Future*, Upjohn Institute Technical Report No. 19-036. Kalamazoo, MI: W.E. Upjohn Institute for Employment Research.
- Günther, Georg, Benisch, Michael, Dankl, Andreas, & Isopp, Jutta (2015), *Roadmap der Instandhaltung 4.0*. Salzburg: Salzburg Research.
- Helper, Susan, & Henderson, Rebecca (2014), Management Practices, Relational Contracts, and the Decline of General Motors. *Journal of Economic Perspectives* 28(1): 49-72.

- Heßler, Martina (2014), Die Halle 54 bei Volkswagen und die Grenzen der Automatisierung. Überlegungen zum Mensch-Maschine-Verhältnis in der industriellen Produktion der 1980er-Jahre. *Zeithistorische Forschungen* 11(1): 56-76.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2018), Einleitung: Digitalisierung industrieller Arbeit. In: Hartmut Hirsch-Kreinsen; Peter Ittermann, & Jonathan Niehaus (Hg.), *Digitalisierung industrieller Arbeit: die Vision Industrie 4.0 und ihre sozialen Herausforderungen*. Baden-Baden: Nomos, S. 13-32.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut, & ten Hompel, Michael (2015), Digitalisierung industrieller Arbeit: Entwicklungsperspektiven und Gestaltungsansätze. In: Birgit Vogel-Heuser; Thomas Bauernhansl, & Michael ten Hompel (Hg.), *Handbuch Industrie 4.0*, Berlin: Springer, S. 1-20.
- Hsieh, L.-H., Schmahls, T., & Seliger, G. (1997), Assembly Automation in Europe – Past Experience and Future Trends. In: Koichi Shimokawa; Ulrich Jürgens, & Takahiro Fujimoto (Hg.), *Transforming Automobile Assembly*, Berlin: Springer, S.19-37.
- IFR (2019), World Robotics 2019, Frankfurt am Main: IFR.
- Ingrassia, Paul, & White, Joseph (1994), *Comeback: the fall and rise of the American automobile industry*, New York: Simon & Schuster.
- Jürgens, Ulrich (1995), Group work and the reception of Uddevalla in German car industry. In: Ake Sandberg (Hg.), *Enriching Production. Perspectives on Volvo's Uddevalla Plant as an Alternative to Lean Production*, Aldershot: Avebury, S. 199-216.
- Jürgens, Ulrich (2015), Lean production. In: David Guest, & David Needle (Hg.), *Wiley Encyclopedia of Management*, Vol. 5 (Human Resource Management), Hoboken, NJ: Wiley, S. 1-3, <https://doi.org/10.1002/9781118785317.weom050138>.
- Jürgens, Ulrich (2020), *Arbeit und Automatisierung in der Automobilindustrie* [Manuskript, im Erscheinen].
- Jürgens, Ulrich (Hg.) (1997), *New Product Development and Production Networks*, Berlin: Springer.
- Jürgens, Ulrich, & Krzywdzinski, Martin (2009), Changing East-West Division of Labour in the European Automotive Industry. *European Urban and Regional Studies* 16(1): 27-42.
- Jürgens, Ulrich, & Krzywdzinski, Martin (2010), *Die neue Ost-West-Arbeitsteilung. Arbeitsmodelle und industrielle Beziehungen in der europäischen Automobilindustrie*, Frankfurt/New York: Campus.
- Jürgens, Ulrich, & Krzywdzinski, Martin (2016), *New Worlds of Work. Varieties of Work in Car Factories in the BRIC Countries*, Oxford: Oxford University Press.
- Jürgens, Ulrich, & Meißner, Heinz-Rudolf (2005), *Arbeiten am Auto der Zukunft*, Berlin: sigma.
- Jürgens, Ulrich, & Naschold, Frieder (1994), Arbeits- und industriepolitische Entwicklungspässe in der deutschen Industrie in den neunziger Jahren. In: Zapf, Wolfgang (Hg.), *Institutionenvergleich und Institutionendynamik*, Berlin: sigma, S. 239-270.
- Jürgens, Ulrich, Malsch, Thomas, & Dohse, Knuth (1988), *Moderne Zeiten in der Automobilfabrik*, Berlin: Springer.
- Jürgens, Ulrich, Malsch, Thomas, & Dohse, Knuth (1993), *Breaking from Taylorism. Changing Forms of Work in the Automobile Industry*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Jürgens, Ulrich, Wilhelm, Miriam; Ishida, Mitsuo, & Nakamura, Keisuke (2012), *Ein Vergleich der Personalsysteme bei Volkswagen und Toyota*, Berlin: WZB [unveröffentlicher Projektbericht].

- Katz, Harry, MacDuffie, John Paul, & Pil, Frits (2013), Crisis and recovery in the US auto industry: Tumultuous times for a collective bargaining pacesetter. In: Howard Stanger; Paul Clark, & Ann Frost (Hg.), *Collective Bargaining Under Duress: Case Studies of Major North American Industries*, Champaign, IL: Labor and Employment Research Association, S. 45-80.
- Kern, Horst, & Schumann, Michael (1984), *Das Ende der Arbeitsteilung*, München: C.H. Beck.
- Klier, Thomas, & Rubenstein, James (2010), The changing geography of North American motor vehicle production. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society* 3(3): 335-347.
- Klier, Thomas, & Rubenstein, James (2012), Detroit back from the brink? Auto industry crisis and restructuring, 2008-11. *Economic Perspectives* 36(2): 35-54.
- Kobayashi, Hideo, Yingshan, Jin, & Schroeder, Martin (2015), ASEAN economic community and the regional automotive industry: impact of ASEAN economic integration on two types of automotive production in Southeast Asia. *International Journal of Automotive Technology and Management* 15(3): 268-291.
- Krafcik, John (1988), Triumph of the Lean Production System. *Sloan Management Review* 30(1): 41-52.
- Krzywdzinski, Martin (2014), How the EU's Eastern Enlargement Changed the German Productive Model. The Case of the Automotive Industry. *Revue de la Régulation – Capitalisme, Institutions, Pouvoir* 15(1): 1-61.
- Krzywdzinski, Martin (2016), *Technologie, Qualifikationen und internationale Arbeitsteilung. Anmerkungen zu der Diskussion über Industrie 4.0*. WZB Discussion Paper SP III 2016-301. Berlin: WZB.
- Krzywdzinski, Martin (2017), Automation, Skill Requirements, and Labour-Use Strategies. High-wage and Low-wage Approaches to High-tech Manufacturing in the Automotive Industry. *New Technology, Work and Employment* 32(3): 247-267.
- Krzywdzinski, Martin (2019), Globalisation, Decarbonisation and Technological Change. Challenges for the German and CEE Automotive Supplier Industry. In: Béla Galgóczi (Hg.), *Towards a Just Transition. Coal, Cars and the World of Work*, Brussels: European Trade Union Institute, S. 215-241.
- Krzywdzinski, Martin (2020), Alternative Models of Lean Production: Germany. In: Thomas Janoski, & Darina Lepadatu (Hg.), *The International Handbook of Lean Production*, Cambridge: Cambridge University Press [forthcoming].
- Krzywdzinski, Martin, & Ulrich Jürgens (2019), Transfer deutscher und japanischer Ansätze der Facharbeiterausbildung an die BRIC-Standorte. Volkswagen und Toyota im Vergleich. In: Michael Gessler; Martina Fuchs, & Matthias Pilz (Hg.), *Konzepte und Wirkungen des Transfers Dualer Berufsausbildung*, Wiesbaden: Springer VS, S. 281-319.
- Kuhlmann, Martin (2004), *Modellwechsel. Die Entwicklung betrieblicher Arbeits- und Sozialstrukturen in der deutschen Automobilindustrie*, Berlin: sigma.
- Kuka (2016), *Matrix-Produktion: Ein Beispiel für Industrie 4.0*, Augsburg: Kuka, Verfügbar unter <https://www.kuka.com/de-de/branchen/loesungsdatenbank/2016/10/solution-systems-matrix-produktion> (12.5.2020)
- Lamming, Richard (1996), Squaring lean supply with supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management* 16(2): 183-196.

- Lara, Arturo, & Carrillo, Jorge (2003), Technological globalization and intra-company coordination in the automotive sector: the case of Delphi-Mexico. *International Journal of Automotive Technology and Management* 3(1): 101-121.
- Lechowski, Grzegorz, & Krzywdzinski, Martin (2019), *Governing "digital transformation" through transnational technological standards*. Paper presented at the SASE Annual Conference, 27-29 June 2019, The New School, New York City.
- Leitner, Peter (1999), Japan's post-war economic success: Deming, quality, and contextual realities. *Journal of Management History* 5(8): 489-505.
- Liker, Jeffrey (2004), *The Toyota Way. Fourteen management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, New York: McGraw-Hill.
- Liker, Jeffrey, Fleischer, Mitchell, Nagamachi, Mitsuo, & Zonnevylle, Michael (1992), Designers and their Machines: CAD Use and Support in the US and Japan. *Communications of the ACM* 35(2): 77-95.
- Liker, Jeffrey; Haddad, Carol, & Karlin, Jennifer (1999), Perspectives on Technology and Work Organization. *Annual Review of Sociology* 25: 275-596.
- MacDuffie, John Paul (2013), Modularity-as-Property, Modularization-as-Process, and Modularity-as-Frame: Lessons from Product Architecture Initiatives in the Global Automotive Industry. *Global Strategy Journal* 3(1): 8-40.
- MacDuffie, John Paul, & Helper, Susan (1997), Creating lean suppliers: diffusing lean production through the supply chain. *California Management Review* 39(4): 118-151.
- MacDuffie, John-Paul, & Pil, Frits (1997), From Fixed to Flexible: Automation and Work Organization Trends from the International Assembly Plant Study. In: Koichi Shimokawa; Ulrich Jürgens, & Takahiro Fujimoto (Hg.), *Transforming Automobile Assembly*, Berlin: Springer, S. 238-254.
- MacKenzie, Donald, & Judy Wajcman (1985), *The Social Shaping of Technology*, Milton Keynes: Open University Press.
- MacPherson, Alan, & Vanchan, Vida (2010), The Outsourcing of Industrial Design Services by Large US Manufacturing Companies. *International Regional Science Review* 33(1): 3-30.
- Malsch, Thomas (1987), Die Informatisierung des betrieblichen Erfahrungswissens und der „Imperialismus der instrumentellen Vernunft“. *Zeitschrift für Soziologie* 16(2): 77-91.
- McKinsey (2016), *Automotive revolution – perspective towards 2030*, New York: McKinsey.
- McLoughlin, Ian (1989), CAD – The 'Taylorisation' of drawing office work? *New Technology, Work & Employment* 4(1): 27-39.
- McLoughlin, Ian (1990), Management, Work Organisation and CAD – Towards Flexible Automation? *Work, Employment & Society* 4(2): 217-237.
- Milkman, Ruth, & Pullman, Cydney (1991), Technological change in an auto assembly plant: The impact on workers' tasks and skills. *Work and Occupations* 18(2): 123-147.
- Mudambi, Ram, & Helper, Susan (1998), The 'close but adversarial' model of supplier relations in the US auto industry. *Strategic Management Journal* 19(8): 775-792.
- Niimi, A.; Matsudaira, Y. (1997), Development of a New Vehicle Assembly Line at Toyota: Worker-oriented, Autonomus, New Assembly System. In: Koichi Shimokawa; Ulrich Jürgens, & Takahiro Fujimoto (Hg.), *Transforming Automobile Assembly*, Berlin: Springer, S. 82-93.

- Noble, David (1979), Social Choice in Machine Design: The Case of Automatically Controlled Machine Tools. In: Andrew Zimbalist (Hg.), *Case Studies on the Labor Process*, New York: Monthly Review Press, S. 18–50.
- Nof, Shimon (2009), Automation: What It Means To Us Around the World. In: Shimon Nof (Hg.), *Springer Handbook of Automation*, Berlin: Springer, S. 13–52.
- Okamuro, Hiroyuki (2000), CAD/CAM Utilization Patterns in Japan and Germany. In: Ulrich Jürgens (Hg.), *New Product Development and Production Networks*, Berlin: Springer, S. 407–424.
- Petersen, Peter (1999), Total quality management and the Deming approach to quality management. *Journal of Management History* 5(8): 468–488.
- Pfeiffer, Sabine (2019), Produktivkraft konkret. Vom schweren Start der Leichtbauroboter. In: Florian Butollo, & Sabine Nuss (Hg.), *Marx und die Roboter*, Berlin: Dietz, S. 156–177.
- Rammert, Werner (1999), Produktion von und mit „Wissensmaschinen“. Situation sozialen Wandels hin zur „Wissensgesellschaft“. In: Konrad Wilfried, & Wilhelm Schumm (Hg.), *Wissen und Arbeit. Neue Konturen von Wissensarbeit*. Münster: Westfälisches Dampfboot, S. 40–57.
- Ro, Young K., Liker, Jeffrey K., & Fixson, Sebastian K. (2007), Modularity as a strategy for supply chain coordination: The case of US auto. *IEEE Transactions on Engineering Management* 54(1): 172–189.
- Rothfelder, Jeff (2017), *At Toyota, the automation is human-powered*, Verfügbar unter <https://www.fastcompany.com/40461624/how-toyota-is-putting-humans-first-in-an-era-of-increasing-automation> (12.5.2020).
- Rothstein, Jeffrey (2016), *When Good Jobs Go Bad. Globalization, De-Unionization, and Declining Job Quality in the North American Auto Industry*, New Brunswick: Rutgers University Press.
- Rubenstein, James (2002), *The changing US auto industry: A geographical analysis*, London: Routledge.
- Salerno, Mario Sergio (2001), The characteristics and the role of modularity in the automotive business. *International Journal of Automotive Technology and Management* 1(1): 92–107.
- Salzmann, Harold (1989), Computer-Aided Design: Limitations in Automating Design and Drafting. *IEEE Transactions on Engineering Management* 36(4): 252–261.
- Sandberg, Ake (1994), *Enriching Production. Perspectives on Volvo's Uddevalla plant as an alternative to lean production*, Aldershot: Avebury.
- Schmitt, Bertel (2019), *Inside Toyota's Takaoka #2 Line*, Verfügbar unter <https://www.thedrive.com/tech/26955/inside-toyotas-takaoka-2-line-the-most-flexible-line-in-the-world> (12.5.2020).
- Schulz-Schaeffer, Ingo (2008), *Technik als Gegenstand der Soziologie*, TUTS-Working Paper 3–2008, Berlin: Technische Universität Berlin.
- Schumann, Michael, Baethge-Kinsky, Volker, Kuhlmann, Martin, Kurz, Constanze, & Neumann, Uwe (1994), *Trendreport Rationalisierung – Automobilindustrie, Werkzeugmaschinenbau, Chemische Industrie*, Berlin: sigma.
- Schwarz-Kocher, Martin, Krzywdzinski, Martin, & Korflür, Inger (Hg.) (2019), *Standortperspektiven in der Automobilzulieferindustrie. Die Situation in Deutschland und Mitteleuropa unter dem Druck veränderter globaler Wertschöpfungsstrukturen*, Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung.

- Shaiken, Harley (1984), *Work Transformed: Automation and Labor in the Computer Age*, New York: Holt, Rinehart, and Winston.
- Shibata, Hiromochi (2009), A comparison of the roles and responsibilities of manufacturing engineers in Japan and the United States. *International Journal of Human Resources Management* 20(9): 1896-1913.
- Spath, Dieter, Ganschar, Oliver, Gerlach, Stefan, Hämmerle, Moritz, Krause, Tobias, & Schlund, Sebastian (2013), *Produktionsarbeit der Zukunft–Industrie 4.0*, Stuttgart: Fraunhofer Verlag.
- Statistics Bureau of Japan (2015), *Classification of occupations used for the 2015 census (Heisei 27–nen kokuseichōsa ni mochiiru shoku–gyō–bun–rui)*, Tokyo: SBJ.
- Statistisches Bundesamt (2003), *Klassifikation der Wirtschaftszweige mit Erläuterungen* Ausgabe 2003, Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, Verfügbar unter https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/Downloads/klassifikation-wz-2003-erlaeuterung.pdf?__blob=publicationFile (12.5.2020).
- The Newswheel (2019), *GM's Cruise Automation Plans to Hire More Than 1,000 New Employees*, Verfügbar unter <https://thenewswheel.com/gms-cruise-automation-plans-to-hire-more-than-1000-new-employees/> (12.5.2020).
- VDA (2015), *Automotive Entwicklungsdienstleistung. Zukunftsstandort Deutschland*. Materialien zur Automobilindustrie Nr. 48. Frankfurt am Main: VDA.
- Volkswagen (2019), *Volkswagen mit neuer Software–Einheit*, Verfügbar unter <https://www.volkswagenag.com/de/news/2019/06/volkswagen-with-new-software-unit.html> (12.5.2020).
- Volkswagen (2020), *High–Tech am laufenden Band*, Verfügbar unter <https://id3.vw-newsroom.com/de/high-tech-am-laufenden-band-5537> (12.5.2020).
- Wajcman, Judy (2006), New connections: social studies of science and technology and studies of work. *Work, Employment and Society* 20(4): 773–786.
- Wilkesmann, Uwe (2005), Die Organisation von Wissensarbeit. *Berliner Journal für Soziologie* 15(1): 55–72.
- Williams, Karel, Haslam, Colin, & Williams, John (1992), Ford versus Fordism: The Beginning of Mass Production?. *Work, Employment and Society* 6(4): 517–555.
- Womack, James, Jones, Daniel, & Roos, Daniel (1991), *The Machine That Changed the World. The Story of Lean Production*, New York: Harper Perennial.

Anhang: Erläuterungen zu den Datenquellen

Auswertung der Fachpresse

In die Analyse wurden alle Artikel der *Automobil Produktion* ab 1992 einbezogen, die sich als Kernthema mit Entwicklungen der Automatisierung und mit Prozesstechnik befassen. Insgesamt wurden 393 Artikel identifiziert. Ergänzend wurden mit den Stichworten „Automation“ sowie den Namen der amerikanischen Automobilhersteller Artikel auf den Onlineplattformen *Automation World* sowie *Automotive Manufacturing Solutions* gesucht. Die Recherche ergab 20 Artikel auf *Automation World* sowie 21 auf *Automotive Manufacturing Solutions*, die sich schwerpunktmäßig mit Automatisierungsstrategien befassen. Japanische Zeitschriften und Onlineplattformen konnten aufgrund der Sprachbarriere nicht recherchiert werden. Als Alternative wurden im Rahmen einer allgemeinen Onlinerecherche Überblicksberichte über die Entwicklung bei dem japanischen Flaggschiffhersteller Toyota gesucht. Schließlich wurden hier fünf Artikel herangezogen, die umfassendere Hintergrundreportagen boten. Die insgesamt 439 Artikel wurden jeweils kurz im Hinblick auf die wichtigsten Schlagworte und Aussagen zusammengefasst. Anschließend wurden die Inhalte nach Unternehmensbereichen (Montage, Karosseriebau, Presswerk, Lackiererei, indirekte Bereiche), Technik und Ländern geordnet ausgewertet.

Auswertung der Statistiken der International Federation of Robotics (IFR)

Für Deutschland und Japan konnten die benötigten Angaben direkt der IFR-Datenbank entnommen werden. Für den Fall der USA mussten die Angaben vor 2016 neu berechnet werden. Die IFR-Datenbank weist den Bestand an Industrierobotern für die USA erst ab 2004 aus, allerdings sind die Angaben bis inklusive 2015 fehlerhaft und viel zu niedrig.⁸² Die Angaben über den Roboterbestand in den USA wurden neu berechnet, indem die Schätzungen des IFR über die Roboterichte in der amerikanischen Automobilindustrie herangezogen wurden, die der IFR in seinen Printpublikationen ausweist.

Im Hinblick auf die Angaben für Japan ist zu berücksichtigen, dass die Definition von Industrierobotern zwischen der IFR und der Japanese Robot Association (JARA) erst 2000 harmonisiert wurde. Die von der JARA vor 2000 genutzte Definition führt im Vergleich zu anderen Ländern zu überhöhten Angaben.

Grundsätzlich gilt, dass die Angaben über den Roboterbestand eine Schätzung darstellen. Der Bestand von Industrierobotern wird vom IFR auf der Basis der Neuinstallationen der vergangenen

⁸² Der Bestand an Industrierobotern wird vom IFR basierend auf den Angaben über Neuinstallationen berechnet. Dabei wird eine Lebensdauer eines Roboters von zwölf Jahren angenommen. Da die IFR-Datenbank auch die Neuinstallationen an Robotern in den USA erst ab 2004 ausweist, entsprechen erst die Bestandsangaben ab 2016 dem Standard. Die Bestandsangaben für 2004 sind hingegen identisch mit den Neuinstallationen im Jahr 2004, die Bestandsangaben für 2005 die Summe der Neuinstallationen für 2004 und 2005 etc. Dies impliziert, dass der Roboterbestand vor 2004 Null gewesen wäre, was natürlich vollkommen falsch ist. Die für die IFR-Datenbank zuständige Statistikabteilung wurde von uns über diesen Fehler informiert, allerdings haben wir dazu keine inhaltliche Rückmeldung bekommen.

zwölf Jahre berechnet – es wird also eine Lebensdauer der Roboter von zwölf Jahren unterstellt. Wie die IFR (2019: 22) selbst feststellt, könnte die typische Lebensdauer auch höher liegen, etwa bei 15 Jahren. Nach Erfahrungen des Autors der hier vorliegenden Analyse könnte der IFR aber auch die Lebensdauer der Industrieroboter zumindest für den Fall der Automobilindustrie überschätzen, da es nicht unüblich ist, dass Automobilhersteller beim Wechsel der Produktgenerationen auch die Produktionsausrüstung auswechseln – und das Alter einer Produktgeneration liegt deutlich unter zwölf Jahren.

Auswertung der Beschäftigungsstatistiken

Eine Grundproblematik der hier genutzten Statistiken sind die Veränderungen der zugrundeliegenden Klassifikationssysteme. Diese werden hier genauer erläutert.

Für die USA werden die Daten der Occupational Employment Statistics (OES) des Bureau of Labor Statistics (BLS) herangezogen. Seit den 1990er Jahren gab es eine Reihe von Veränderungen in den zugrundeliegenden Klassifikationssystemen der OES. Im Hinblick auf die Berufsstatistiken fand eine grundlegende Revision 1999 statt, als die Standard Occupational Classification (SOC) eingeführt wurde. 2010 wurde die revidierte SOC 2010 eingeführt, die jedoch für 90% aller Berufe und für die in diesem Paper relevanten Berufskategorien nur editorische Revisionen brachte, die die Definitionen und damit Zuordnungen zu Berufen nicht substantiell veränderten (BLS 2010). Im Hinblick auf die Industrieklassifikationssysteme fand eine grundlegende Revision 2002 statt. Vor 2002 wurde die Standard Industrial Classification (SIC) genutzt, 2002 fand die Umstellung auf das North American Industry Classification System (NAICS) statt, die mit erheblichen Veränderungen in der Klassifikation von Betrieben einherging. In diesem Paper werden Daten ab Jahr 1999 herangezogen, allerdings ist zu berücksichtigen, dass im Falle der USA die Angaben vor 2002 nur bedingt mit den späteren Jahren vergleichbar sind.

Für Japan wird der Population Census des Statistics Bureau of Japan (SBJ) genutzt. Auch im Falle Japans gab es im Untersuchungszeitraum einige Veränderungen der statistischen Konzepte. Für die Berufsstatistik nutzt der Japan Population Census die Japan Standard Occupational Classification (JSOC), die im Untersuchungszeitraum dieser Studie zwei Revisionen durchlief, im Jahr 1997 und im Jahr 2009. Während die Revision 1997 für die hier relevanten Berufsgruppen eher editorischen Charakter hatte, brachte die Revision von 2009 eine erhebliche Neuordnung der Berufe, so dass sich dadurch eine Diskontinuität in den Daten ergibt (Director General for Policy Planning [Statistical Standards] 2009). Durch einen Abgleich der Klassifikationen auf der Ebene der Einzelberufe wurde in der vorliegenden Studie versucht, diese Diskontinuitäten auszugleichen, allerdings bleibt die Vergleichbarkeit der Daten etwas eingeschränkt. Für die Industrieklassifikation wurde in den Jahren 1995–2015 die Japan Standard Industrial Classification (JSIC) genutzt. In dem hier fokussierten Untersuchungszeitraum fanden Revisionen der JSIC in den Jahren 2002, 2007 und 2013 statt, die allerdings im Hinblick auf die Automobilindustrie keine größeren Veränderungen implizierten (Director General for Policy Planning [Statistical Standards] 2007 und 2013).

Die Daten für den Fall der deutschen Automobilindustrie stammen von der Bundesagentur für Arbeit (BA). Seit den 1990er Jahren gab es auch im deutschen Fall eine Reihe von Veränderungen in den zugrundeliegenden Klassifikationssystemen. Im Fall der Berufsstatistik fand im Jahr 2012

eine grundlegende Umstellung von der Klassifizierung der Berufe Ausgabe 1988 (KldB 1988) zur Klassifizierung der Berufe Ausgabe 2010 (KldB 2010) statt. Die beiden Klassifikationen unterscheiden sich erheblich in ihrer Systematik und der Definition von Einzelberufen. Basierend auf den Äquivalenztabelle der BA wurde in der hier vorliegenden Studie versucht, eine möglichst genaue Passung der Daten durch Matching auf der Einzelberufesebene herzustellen, allerdings repräsentiert die Umstellung der Klassifikation einen so großen Bruch, dass sie die Vergleichbarkeit der Daten vor und nach 2012 einschränkt.

Auch in der Industrieklassifikation hat es im hier betrachteten Zeitraum Veränderungen gegeben. Im Jahr 2003 fand eine Umstellung von der Klassifikation der Wirtschaftszweige 1993 (WZ 1993) auf die Klassifikation der Wirtschaftszweige 2003 (WZ 2003) statt, die allerdings eine „behutsame Aktualisierung“ der Zuordnungen bedeutete und im Falle der Automobilindustrie keine größeren Verschiebungen mit sich brachte (Statistisches Bundesamt 2003). Eine weitere Umstellung von der WZ 2003 auf die Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008) hat es im Jahr 2008 gegeben. Für den hier betrachteten Fall der Automobilindustrie bedeutete die Umstellung, dass auf der einen Seite von den 887.000 Beschäftigten nach WZ 2003 etwa 74.000 Personen anderen Wirtschaftszweigen neu zugeordnet wurden (vorwiegend dem Maschinen- und Anlagenbau), auf der anderen Seite 133.000 Beschäftigte, die zuvor vor allem der Herstellung von IT-Technik, der Metallerzeugung sowie Gummi- und Kunststoffprodukten zugerechnet wurden, nun zur Automobilindustrie gehörten. Insgesamt veränderten sich damit in der Zusammensetzung etwa 14% der der Automobilindustrie zugerechneten Beschäftigung (Bundesagentur für Arbeit 2010). Insbesondere die Umstellung auf die WZ 2008 bedeutete eine Verschiebung, die die Vergleichbarkeit der Daten etwas einschränkt.

Tabelle A1: Industrie- und Berufsklassifikationen in den genutzten Datensätzen

	Industrieklassifikation	Berufsklassifikation
USA: Occupational Employment Statistics	1999-2001 SIC 2002-2018 NAICS	1999-2018 SOC
Japan: Population Census	1995-2015 SIC	1995-2005 JSOC 2010-2015 JSOC (major revision)
Deutschland: Beschäftigungsstatistik der Bundesagentur für Arbeit	1999-2008 WZ 1993, WZ 2003 2008-2018 WZ 2008	1999-2011 KldB 1988 2013-2018 KldB 2010

Quelle: eigene Darstellung

Discussion Paper der Forschungsgruppe "Globalisierung, Arbeit und Produktion"

- Robert Scholz** SP III 2020-301
Regionale Gestaltung von Arbeit: Beschäftigung, Mitbestimmung, Personalaufwand und Ausbildung in den 50 größten Unternehmen in Berlin, 31 Seiten
- Moore, Phoebe V.** SP III 2019-302
The Mirror for (Artificial) Intelligence. Working in Whose Reflection?, 25 pages
- Martin Krzywdzinski, Franziska Cooman, Svenja Christen** SP III 2019-301
„Ich arbeite ganz anders und besser als früher“. Praxis und Potentiale von Jobsharing in Unternehmen, 61 Seiten
- Robert Scholz and Sigurt Vitols** SP III 2018-304
Co-determination: a driving force for Corporate Social Responsibility in German companies?, 29 pages
- Florian Butollo, Ulrich Jürgens, Martin Krzywdzinski** SPIII 2018-303
From Lean Production to Industrie 4.0. More Autonomy for Employees?, 22 pages
- Grzegorz Lechowski** SP III 2018-302
Beyond "dependent development" in a high-tech industry?
The interplay between domestic institutions and transnational sectoral governance in the trajectories of emerging Polish IT firms, 47 pages
- Maren Evers, Martin Krzywdzinski, Sabine Pfeiffer** SP III 2018-301
Designing Wearables for Use in the Workplace
The role of solution developers, 26 pages
- Martin Krzywdzinski, Axel Schröder** SP III 2017-302
Globale Rahmenvereinbarungen in der europäischen Automobilindustrie, 45 Seiten
- Robert Scholz** SP III 2017-301
German Model or German Models? The spatial distribution of capital and labour in the corporate governance of stock listed companies, 28 pages
- Martin Krzywdzinski** SP III 2016-301
Technologie, Qualifikationen und internationale Arbeitsteilung.
Anmerkungen zu der Diskussion über Industrie 4.0, 39 Seiten
- Martin Krzywdzinski** SP III 2014-301
Leistungsanreize, Leistungsverhalten und die Bedeutung des soziokulturellen Kontextes aus ökonomischer, psychologischer und soziologischer Perspektive, 80 Seiten

- Yan Hao** **SP III 2012-304**
The Reform and Modernization of Vocational Education and Training in China, 18 pages
- Elena Shulzhenko** **SP III 2012-303**
Human Resource Management and Labour Relations in Post-Transitional Russia, 59 pages
- Nan Yu** **SP III 2012-302**
All in Transition – Human Resource Management and Labour Relations in the Chinese Industrial Sector, 43 pages
- Soumi Rai** **SP III 2012-301**
Human Resource Management and Labour Relations in the Indian Industrial Sector, 42 pages

All discussion papers are downloadable:
<http://www.wzb.eu/en/publications/discussion-papers/>