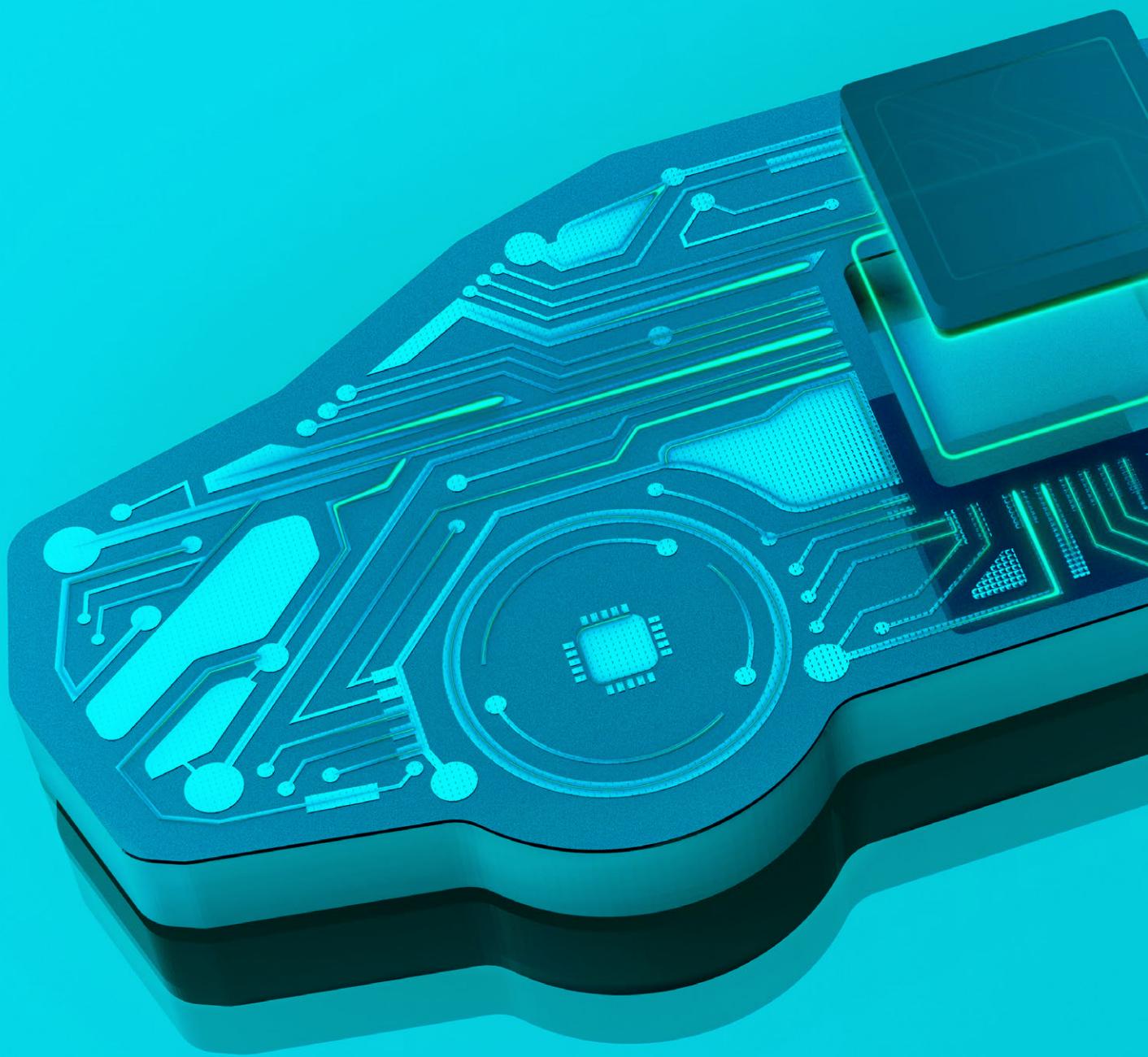


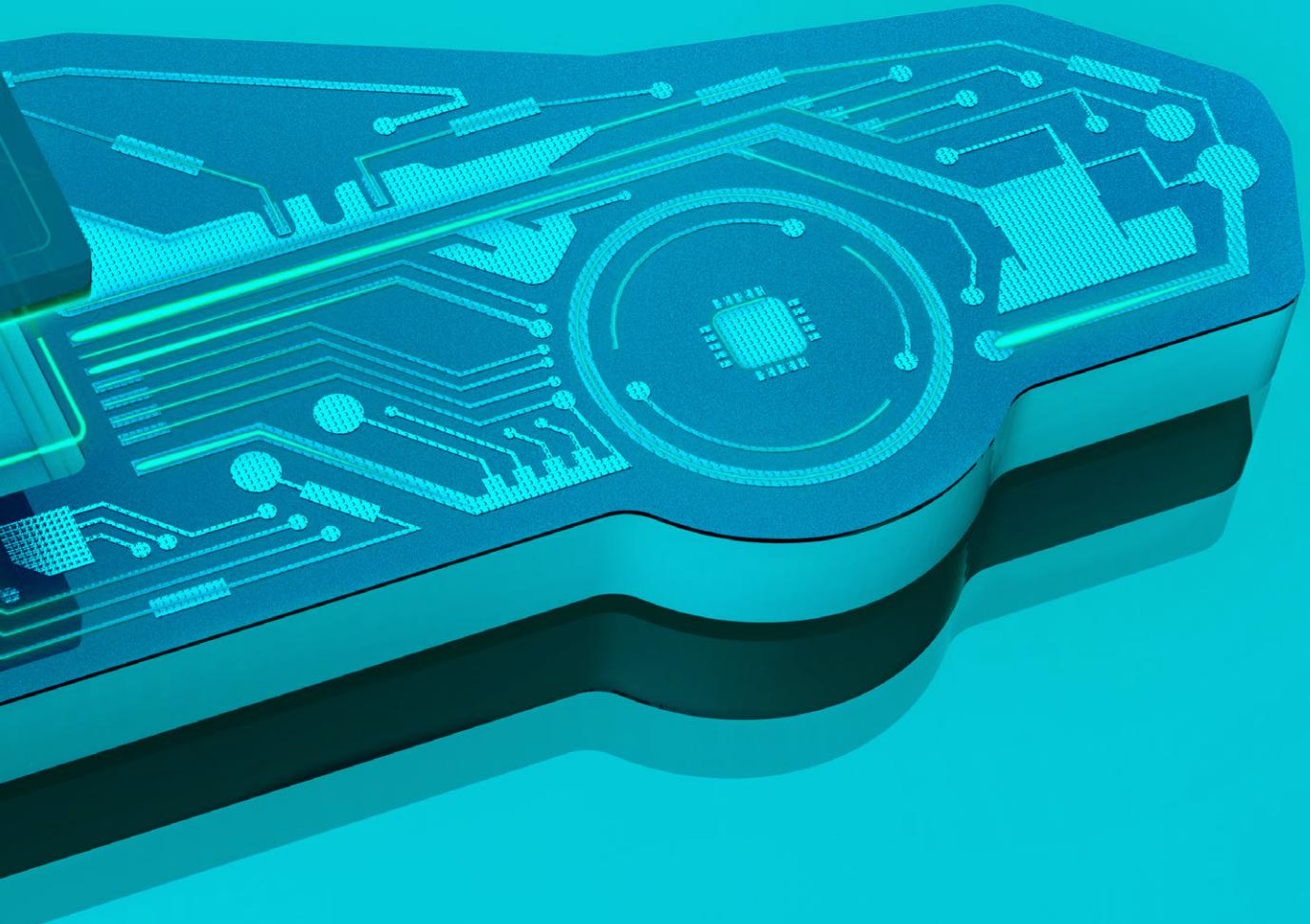
Alexander Ziegler, Eckhard Heidling

Die Automobil- industrie in der Chip-Krise

Herausforderungen – Maßnahmen – Gestaltungsfelder

HyValue





Diese Expertise ist im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsprojekts »HyValue – Hybridisierung in der Value Chain« entstanden und erweitert die in der Hauptphase des Projekts erzielten Ergebnisse. Das interdisziplinäre Verbundvorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Europäischen Sozialfonds (ESF) im Rahmen des Programms »Zukunft der Arbeit« (02L17B060 bis 02L17B064) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut (Laufzeit: April 2019 bis Oktober 2022). Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Zusammenfassung

Die Chip-Krise traf viele Unternehmen der Automobilindustrie unvorbereitet. Zu Beginn der COVID-19-Pandemie im Jahr 2020 rechnete das Management in den OEM mit einem länger währenden Einbruch der Nachfrage nach Fahrzeugen, revidierte die Produktionsplanungen und übermittelte diese Informationen an die Zulieferer. Um Lagerhaltungskosten zu vermeiden, stornierten die Zulieferer wiederum einen Großteil ihrer Bestellungen von Chips bei den Halbleiterherstellern. Als die Fahrzeughnachfrage nach Aufhebung der ersten Lockdowns jedoch unerwartet schnell wieder anzog, hatten die Halbleiterproduzenten in der Zwischenzeit ihre zuvor für die Automobilindustrie reservierten Fertigungskapazitäten zur Befriedigung des rasant gestiegenen Bedarfs an Chips für Büro- und Consumer-Elektronik umgerüstet. Da Chips über die Jahre vom Fensterheber bis hin zur Motorsteuerung in immer weiteren Komponenten moderner Fahrzeuge verbaut wurden, hatte der plötzlich eingetretene Mangel enorme Tragweite für die Automobilindustrie. Fehlte nur ein einzelner Chip, konnte dies dazu führen, dass Fahrzeuge nicht fertiggestellt und ausgeliefert werden konnten. In vielen Unternehmen zwang der Chip-Mangel zu einer Drosselung der Produktion. Schichten wurden gestrichen, Baureihen ausgesetzt, ganze Werke vorübergehend geschlossen und die Beschäftigten wiederholt in Kurzarbeit geschickt.

Auf den ersten Blick scheint die Ursache für dieses disruptive Ereignis in den Lieferketten für Halbleiter in einem klassischen Bullwhip-Effekt zu liegen, bei dem Nachfrageschwankungen sich zu gewaltigen Dissonanzen aufgeschaukelt haben. Die vorliegende industriesoziologische Expertise arbeitet demgegenüber heraus, dass sich das Phänomen der Chip-Krise darin nicht erschöpft und das Problem auf Dauer auch nicht allein mit Maßnahmen innerhalb des methodischen Spektrums des Supply Chain Management in den Griff zu bekommen sein wird. In der Chip-Krise ist vielmehr eine Entwicklungsdynamik offen zutage getreten, die ihre Wurzeln in tieferliegenden strukturellen Veränderungen der Kernprodukte der Automobilindustrie und der Rolle von Halbleitern in Fahrzeugen hat.

Die Elektrifizierung und Softwareisierung der Fahrzeuge, welche die gegenwärtige Transformation der Branche prägen, treiben nicht nur den quantitativen Bedarf an Halbleitern signifikant in die Höhe, sondern verändern auch die Qualität des Halbleitereinsatzes in den Fahrzeugen. Halbleiter avancieren zu strategischen Bausteinen – sowohl als Leistungselektronik bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs als auch als Hochleistungschips, Datentransmitter und Sensorik bei der Neuausrichtung der Software- und Elektronikarchitekturen und der Realisation marktdifferenzierender Softwarefunktionen. Bei der Konzeption der »Software-definierten Elektrofahrzeuge« können sie von den etablierten Automobilherstellern daher nicht länger lediglich als weitere Vorleistungsgüter auf ihre Einkaufsstücklisten gesetzt und ihre Produzenten als Lieferanten von Commodities behandelt werden; sie avancieren vielmehr zu Schlüsselbestandteilen der Fahrzeuge der Zukunft.

Mit der Chip-Krise sind diese Entwicklungen und die damit einhergehenden Herausforderungen für die Unternehmen der Automobilindustrie ins Blickfeld gerückt. Sie verlangen eine weitreichende Neufassung ihrer Halbleiterstrategien und der Zusammenarbeit mit den Unternehmen der Halbleiterbranche. Die Chip-Krise markiert diesen Wendepunkt für den Halbleitereinsatz in der Automobilindustrie. Der Aufmerksamkeitssog, den die Krise in der öffentlichen Wahrnehmung erzeugt, eröffnet in Unternehmen und Politik zugleich Möglichkeitsräume, um nicht nur den Halbleitereinsatz neu zu gestalten, sondern insgesamt die Nachhaltigkeit ihrer Wertstoffströme im Sinne einer Kreislaufwirtschaft zu verbessern.

Die Expertise setzt hier an und exploriert auf Basis von Experteninterviews und der Analyse einer Vielzahl an Dokumenten die Auswirkungen der Chip-Krise auf die Unternehmen der Automobilindustrie sowie ihre Bewältigungsstrategien. Ihr Ziel ist es, die aktuellen Einschätzungen, vorläufigen Erfahrungen und bisherigen Lessons Learned bei Branchenexperten sowie den Führungskräften und Beschäftigten in OEM und Zulieferern zu erfassen, um darauf aufbauend relevante Gestaltungsfelder und Forschungsbedarfe zu identifizieren.

Daraus können erste Überlegungen abgeleitet werden, wie die Unternehmen der Automobilindustrie künftig sowohl besser mit solchen disruptiven Ereignissen in der Wertschöpfungskette umgehen als auch ihre Halbleiterstrategien vor dem Hintergrund der Transformation der Branche zukunftsfähig aufstellen können.

Aufgezeigt wird, dass für eine Neufassung der Halbleiterstrategien und ihre Umsetzung keine Patentrezepte oder Blaupausen existieren, die lediglich ausgerollt werden müssten. Für die Unternehmen der Automobilindustrie gilt es vielmehr, ausgehend von ihren je besonderen Ausgangsbedingungen und Handlungskontexten einen passenden Weg im Einklang mit der Gestaltung ihrer Geschäftsmodelle und Arbeitsprozesse zu erarbeiten. In der Expertise werden sechs Gestaltungsfelder identifiziert, welche in den Unternehmen der Automobilindustrie vorrangig zu bearbeiten sind:

Gestaltungsfeld 1:

Transparenz über Halbleiterbedarfe herstellen – Durchgängige Informationssysteme aufbauen

Gestaltungsfeld 2:

Halbleiterrisiken aktiv bearbeiten – NextGen-Risikomanagement für Disruptionen in Lieferketten etablieren

Gestaltungsfeld 3:

Halbleiter als Kernkomponenten – Ganzheitliche Chip-Strategien für Fahrzeuge entwickeln

Gestaltungsfeld 4:

Kollaborative Wertschöpfungsarchitekturen schaffen – Partnerschaften mit Chip-Herstellern aufbauen

Gestaltungsfeld 5:

Halbleiterkompetenz in der Automobilindustrie stärken – Führungskräfte, Beschäftigte, Studierende und Auszubildende qualifizieren

Gestaltungsfeld 6:

Kreislaufwirtschaft aufbauen – Recycling-Strategien für Halbleiter implementieren

Die Expertise stellt diese sechs Gestaltungsfelder vor. Sie arbeitet zudem heraus, wie sich gegenwärtig die Rolle von Halbleitern im Fahrzeug transformiert, und schafft wichtige Voraussetzungen für ein tieferes Verständnis der in der Chip-Krise zutage getretenen Veränderungsdynamik in der Automobilindustrie sowie der damit einhergehenden Gestaltungsherausforderungen. Damit liefert sie praxisrelevantes Orientierungs- und Gestaltungswissen für Führungskräfte, Beschäftigte und Betriebsräte und bereitet zugleich den Boden für weitere Forschung zum Wandel des Halbleitereinsatzes in der Automobilindustrie vor dem Hintergrund der Transformation der Branche.

Inhalt

1. Die Chip-Krise in der Automobilindustrie – Symptom struktureller Verschiebungen?	8
2. Halbleiter im Fahrzeug: Eine historische Skizze	11
• Die Wertschöpfungsstruktur für Software- und Elektronikkomponenten von Fahrzeugen	14
• Die Automobilindustrie als Markt für die Halbleiterindustrie	16
3. Von Vorleistungsgütern zu strategischen Komponenten: Die Transformation der Rolle von Halbleitern im Fahrzeug	20
• Leistungshalbleiter: Schlüsselkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs	20
• Die Transformation der Fahrzeugsoftware: Halbleiter als Enabler Software-definierter Fahrzeuge	23
4. Die Chip-Krise in der Automobilindustrie: Entwicklungs dynamik und unmittelbare Maßnahmen	29
• Ein perfekter Sturm: Die Entwicklungs dynamik der Chip-Krise in der Automobilindustrie	29
• Die Stunde der Taskforces: Maßnahmen gegen die Chip-Krise in der Automobilindustrie	31
5. Lessons Learned: Sechs Gestaltungsfelder für die Unternehmen der Automobilindustrie	38
6. Die Chip-Krise als Wendepunkt für den Halbleitereinsatz in der Automobilindustrie	52

Appendix

Endnoten	i
Glossar	v
Verzeichnis der Quellen	ix
Impressum	xvii

1.

Die Chip-Krise in der Automobilindustrie – Symptom struktureller Verschiebungen?

Als sich Anfang des Jahres 2020 die Infektionskrankheit COVID-19 über den Erdball zu verbreiten begann, blickte die Automobilindustrie in Deutschland auf ein Jahrzehnt stetigen Wachstums zurück. Nach der Wirtschafts- und Finanzkrise ab 2007 konnten trotz des »Dieselskandals« im Jahr 2015 immer neue Rekorde bei Absatzzahlen, Umsätzen und Gewinnen verbucht werden. Laut Statistischem Bundesamt waren die Umsätze der Unternehmen der Automobilindustrie von € 262,5 Mrd. im Jahr 2009 auf € 436,2 Mrd. im Jahr 2019 gestiegen und auch die Zahl der Beschäftigten hatte in dieser Zeit fast kontinuierlich zugelegt. Garant dafür war insbesondere das Wachstum des chinesischen Markts. Während in den westlichen Märkten die Verkaufszahlen weitgehend stagnierten, war im neuen Wirtschaftswunderland China die Nachfrage nach Automobilen deutscher Herstellung in allen Segmenten explodiert (Puls/Fritsch 2020, 33)¹.

Angesichts der ersten Lockdowns in China im Februar 2020 prognostizierten Analystenhäuser wie IHS Markit und Oliver Wyman rapide fallende Verkaufszahlen für die Automobilindustrie, die auf ein abruptes Ende dieser Wachstumsdynamik hindeuteten (Wayland 2020; Oliver Wyman 2020). Das Management der Automobilkonzerne leitete umgehend Maßnahmen ein, um die Fahrzeugproduktion zurückzufahren. Und auch die Zulieferer von Software- und Elektronikkomponenten sahen sich aufgrund der revidierten Produktionsplanungen ihrer Kunden dazu veranlasst, laufende Bestellungen bei den Produzenten von Mikrocontrollern und Halbleitern für die Automobilindustrie zu stornieren. Als die Nachfrage nach Fahrzeugen allerdings nach einem kurzen Einbruch unerwartet schnell wieder anzug, hatten die Halbleiterproduzenten ihre zuvor für die Automobilindustrie reservierten Fertigungskapazitäten bereits zur Befriedigung des mit der Pandemie rasant gestiegenen Bedarfs an Chips für Consumer-Elektronik, Notebooks und andere Gadgets wie Heimfitnessgeräte umgerüstet. Plötzlich waren in den Halbleiterwerken, den sog. Foundries, daher keine ausreichenden Kapazitäten mehr vorhanden, um die schnell wachsende Nachfrage nach Chips in der Automobilindustrie zu befriedigen.

Da Halbleiter in den Unternehmen der Automobilindustrie über die Jahre nicht nur eine immer wichtigere Rolle bei der Bewältigung der Arbeiten in der Fertigung und den Büros eingenommen haben, sondern auch in einer Vielzahl von Komponenten und Systemen moderner Fahrzeuge verbaut wurden – von der Steuerung der Scheibenwischer und Fensterheber über die Motorsteuerung bis hin zum Infotainmentsystem –, haben diese Dissonanzen in der automobilen Wertschöpfungskette enorme Tragweite für die Branche. Fehlt nur ein einzelner Chip, kann dies dazu führen, dass Fahrzeuge nicht fertiggestellt und ausgeliefert werden können. Der Mangel an Halbleitern zwang viele OEM trotz der hohen Nachfrage nach Fahrzeugen zu einer Anpassung und Drosselung der Produktion (Frieske/Stieler 2022). Stellenweise wurden Fahrzeuge ausgeliefert, in denen Chips für nicht-sicherheitskritische Funktionen wie die Sitzeinstellungen oder bestimmte Elemente im Infotainment fehlten (Walsh 2021). In den Produktionshallen wurden Schichten gestrichen, Baureihen ausgesetzt und viele Werke vorübergehend geschlossen. Viele Beschäftigte wurden in Deutschland wiederholt in Kurzarbeit geschickt. Schuh et al. (2022) schätzen, dass sich die OEM im Jahr 2021 aufgrund fehlender Halbleiter gezwungen sahen, weltweit die Produktion von bis zu 10 Mio. Fahrzeugen zu streichen. Diese Maßnahmen schlugen weitere Wellen und ließen aufgrund des geringeren Angebots an Neuwagen etwa in den USA die Preise für Gebrauchtwagen explodieren (Boudette 2021).

Nachdem OEM und Zulieferer sich zunächst vielfach wechselseitig die Schuld an der Misere gegeben hatten, wurden in den Beschaffungsabteilungen umgehend Taskforces gebildet. Sie arbeiteten unter Hochdruck daran, Transparenz über die Chip-Bedarfe herzustellen, und machten sich fieberhaft auf die Suche nach zusätzlichen Chips, während sie gleichzeitig versuchten, die verfügbaren Chips bestmöglich zu alloklieren, um die Produktion am Laufen zu halten. Das Top-Management der OEM sprach höchstpersönlich bei den Betreibern der Fertigungsstätten für Halbleiter vor und versuchte sich etwaige freierwerdende Kapazitäten zu sichern. Bei der Entwicklung von Krisenbewältigungsstrategien gaben sich die Beratungsunternehmen ein Stelldichein und entwickelten

Kataloge kurz-, mittel- und langfristiger Maßnahmen für die Unternehmen der Automobilindustrie. Auch die Politik reagierte und stellte rund um den Globus hohe Subventionen für Investitionen der Halbleiterindustrie in neue Fertigungsstätten in Aussicht. Da eine Aufstockung der Fertigungskapazitäten für Halbleiter allerdings lange Vorlaufzeiten von mehreren Jahren beansprucht, scheint es, dass Umsatzeinbußen durch den Mangel an Halbleitern in den Unternehmen der Automobilindustrie noch auf unbestimmte Zeit hingenommen werden müssen.

In der Fachöffentlichkeit entspann sich rasch eine intensive Diskussion darüber, welche Lehren aus der Situation für die zukünftige Gestaltung der Wertschöpfungsprozesse in der Automobilindustrie gezogen werden können und wie ihre organisationale Resilienz gestärkt werden kann (Katasaliaki et al. 2022). Anfangs wurde die Chip-Krise von einigen Experten als Beleg für das Scheitern der Prinzipien von Lean Production gedeutet und den Unternehmen der Automobilindustrie u.a. nahegelegt, künftig ihre Lagerhaltung insgesamt auszuweiten, um wieder größere Puffer für Angebots- und Nachfrageschwankungen vorzuhalten und die Abhängigkeiten gegenüber Lieferanten zu reduzieren (Goodman/Chokshi 2021; McLain 2021). Dem hielten andere Experten entgegen, dass gerade diejenigen Unternehmen von der Krise zunächst weniger stark getroffen wurden, deren Transparenz in den Produktionsflüssen und Lieferketten auf einen hohen Reifegrad in der Anwendung von Lean-Production-Methoden zurückzuführen sei. Dies habe es ihnen möglich gemacht, aus vergangenen Lieferengpässen zu lernen und ihr Inventar bei kritischen Gütern gezielt aufzustocken (Kim 2021). Bis auf wenige Ausnahmen (z.B. Frieske/Stieler 2022) gründeten die bisherigen Diskussionen allerdings selten auf empirischen Analysen der gegenwärtigen Erfahrungen, welche die Unternehmen der Automobilindustrie bei der Bewältigung der Chip-Krise machten.

Vor diesem Hintergrund wurden als Erweiterung des Projekts »HyValue – Hybridisierung in der Value Chain« die Auswirkungen der Chip-Krise auf die Unternehmen der Automobilindustrie in der vorliegenden Expertise exploriert. Ziel war es, die bisherigen Erfahrungen und Lessons

Learned bei Branchenexperten sowie den Führungskräften und Beschäftigten in OEM und Zulieferern zu erfassen und zu reflektieren, um darauf aufbauend relevante Gestaltungsfelder und Forschungsbedarfe zu identifizieren, durch deren Bearbeitung die Unternehmen künftig besser mit solchen disruptiven Ereignissen in der Wertschöpfungskette umgehen können. Gleichzeitig sollte ausgelotet werden, inwiefern die im HyValue-Projekt gewonnenen Erkenntnisse rund um den Aufbau eines Prototyps einer unternehmensübergreifenden Kollaborationsplattform für Fahrzeugentwicklungsprojekte (Heimberger et al. 2022) und die Entwicklung eines Konzepts für kollaborative Dienstleistungsarbeit (Heidling/Ziegler 2022) zur Krisenbearbeitung und -bewältigung beitragen können.

In den Interviews mit Expert/-innen aus Unternehmen und Verbänden stellte sich indes schnell heraus, dass sich das Phänomen der Chip-Krise nicht in einer temporären Disruption in der automobilen Wertschöpfungskette erschöpft, der allein mit Maßnahmen innerhalb des methodischen Spektrums des Supply Chain Management beizukommen wäre. In der Chip-Krise, so der Grundton der Gespräche, sei vielmehr eine schon länger schwelende Entwicklungs dynamik offen zutage getreten, die ihre Wurzeln in tieferliegenden strukturellen Veränderungen in den Kernprodukten der Branche hat. Die Elektrifizierung und Softwareisierung der Fahrzeuge, die in den letzten Jahren in der Branche deutlich Fahrt aufgenommen haben (Boes/Ziegler 2021; Pfeiffer/Autor*innenkollektiv 2023), haben nicht nur signifikante Auswirkungen auf den quantitativen Bedarf an Halbleitern in den Fahrzeugen, sondern verändern auch die Qualität des Halbleitereinsatzes: Statt wie bisher lediglich ein weiteres Bauteil auf der Stückliste zu sein, avancieren neben Batterien und Software auch Halbleiter zu strategischen Bausteinen in Software-definierten Elektrofahrzeugen. Mit der Chip-Krise sind diese Entwicklungen und die damit einhergehenden Herausforderungen ins Blickfeld gerückt. Sie verlangen eine weitreichende Neufassung der Halbleiterstrategien in den Unternehmen der Automobilindustrie und ihrer Zusammenarbeit mit den Unternehmen der Halbleiterbranche.

Aufbau und empirische Basis der Studie

In den folgenden Ausführungen werden die zentralen Ergebnisse dieser Expertise aufbereitet. Im zweiten Abschnitt geht es zunächst um eine skizzenhafte historische Rekonstruktion der bisherigen Entwicklung des Halbleitereinsatzes im Fahrzeug. Der dritte Abschnitt beleuchtet, wie sich gegenwärtig die Rolle von Halbleitern im Fahrzeug verändert. Dabei stehen mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der Einführung Software-definierter Fahrzeuge zwei Entwicklungsstränge im Fokus. Diese Hintergründe sind Voraussetzung für ein tieferes Verständnis der in der Chip-Krise zutage getretenen Veränderungsdynamik sowie der damit einhergehenden Gestaltungsherausforderungen. Auf dieser Grundlage werden im vierten Abschnitt die Entwicklungen, welche die Chip-Krise ausgelöst haben, eingehend betrachtet und Einblicke in die unmittelbar zu beobachtenden Maßnahmen zur Bewältigung der Situation in den Unternehmen der Automobilindustrie gegeben. Damit ist der Boden bereitet, um im fünften Abschnitt die wesentlichen Gestaltungsfelder für die Unternehmen der Automobilindustrie in der Perspektive einer Neugestaltung ihrer Halbleiterstrategien sowie die damit einhergehenden Herausforderungen zu umreißen. Im abschließenden Ausblick werden die wesentlichen Ergebnisse der Expertise zusammengefasst und weitergehende Forschungsbedarfe skizziert.

Die Expertise gründet auf zwei empirischen Standbeinen. Das erste Standbein bilden qualitative Experteninterviews mit 15 Vertreter/-innen von OEM, Systemzulieferern und Tier-2-Zulieferern in der Automobilindustrie, der Halbleiterindustrie sowie bei Verbänden und Forschungseinrichtungen, die zusätzlich zu den bisherigen empirischen Arbeiten im HyValue-Projekt (Heidling/Ziegler 2022) im Zeitraum von Juni bis Dezember 2022 durchgeführt wurden. Darüber hinaus konnten Zwischenergebnisse in Workshops mit Branchenexpert/-innen sowie mit einer nationalen und internationalen Community von Forscher/-innen zu den Entwicklungsdynamiken von Wertschöpfungsketten zur Diskussion gestellt und evaluiert werden.

Das zweite empirische Standbein der Untersuchung bildet eine umfassende Dokumentenanalyse. Zu den für die Expertise untersuchten Dokumenten zählen einerseits die klassische mediale Berichterstattung zur Chip-Krise mit Artikeln und Reportagen in Tages- und Fachzeitungen, die Geschäftsberichte, Pressemitteilungen und Strategie- und Hintergrundpapiere der Unternehmen der Halbleiter- und der Automobilindustrie sowie die Expertisen von Verbänden und Beratungsunternehmen. Andererseits wurden auch thematisch einschlägige Interviews und Diskussionen mit Experten/-innen und Unternehmensvertreter/-innen im Rahmen von Podcasts, Blogbeiträgen und Vorträgen auf Fachveranstaltungen einbezogen. Bis auf wenige Ausnahmen sind sämtliche analysierten Dokumente öffentlich über das Internet zugänglich und werden als Quellen im Literaturverzeichnis aufgeführt. In der Auswertung wurden diese beiden empirischen Standbeine zum vorliegenden Ausschnitt einer Branchenfallstudie verdichtet.

Großer Dank gebührt allen Expertinnen und Experten, die sich im Rahmen der Interviews geduldig mit unseren Fragen auseinandergesetzt sowie Hinweise und Kontakte zu weiteren Gesprächspartner/-innen vermittelt haben. Besonders bedanken möchten wir uns zudem beim Bundesministerium für Bildung und Forschung und dem Europäischen Sozialfonds für die Förderung der Expertise im Rahmen des HyValue-Projekts sowie dem Projektträger Karlsruhe für die umsichtige Betreuung des Vorhabens. Am ISF München danken wir unseren Kolleg/-innen für viele instruktive Hinweise und kritische Anmerkungen, Frank Seiß für das fundierte Lektorat der vorliegenden Fassung und Torsten Royère für das Layout der Studie.

2.

Halbleiter im Fahrzeug: Eine historische Skizze

Als die Halbleiterindustrie in den 1950er Jahren Gestalt annahm², zählte die Automobilindustrie bereits zu den etablierten Industriezweigen und prägte als eine der Leitbranchen die wirtschaftliche Entwicklung der Nachkriegszeit (Jürgens et al. 1989; Canzler/Knie 2018). Stellvertretend dafür steht der auf Ford gemünzte Begriff des Fordismus, der in der sozialwissenschaftlichen Diskussion zur Bezeichnung des spezifischen Arrangements wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Entwicklung der Nachkriegsepoke Verbreitung gefunden hat (Kuhlmann 2004, 17). Das Spektrum der Technikdomänen, derer sich die Automobilindustrie für die Fahrzeugproduktion bis in die 1950er Jahre hinein bediente, reichte von der Mechanik über die Metallverarbeitung und Thermodynamik bis hin zur Hydraulik und Elektrik, während die Elektronik damals noch kaum eine Rolle spielte.

Elektronische Komponenten wurden in Fahrzeugen zwar vereinzelt schon in den 1930er Jahren verbaut. Es handelte sich dabei um Elektronenröhren in den ersten Autoradios, die etwa von der Firma Blaupunkt hergestellt wurden. Da Autoradios mit Elektronenröhren als Verstärker allerdings sehr energieintensiv, wartungsbedürftig und teuer waren, boten die OEM sie zunächst lediglich als Sonderausstattung in Premiumfahrzeugen an. Mit dem Aufstieg der Halbleitertechnik konnten die Elektronenröhren durch kleinere, robustere und energieeffizientere Transistoren abgelöst werden. In Kombination mit der Erfindung des Drehstromgenerators (Lichtmaschine)³ wurden Autoradios erschwinglich und ab der zweiten Hälfte der 1950er Jahre immer häufiger serienmäßig in Fahrzeugen verbaut (Morris 2014, 329).

Die Konstituierung der Halbleiterindustrie sowie die anhaltende Weiterentwicklung ihrer Erzeugnisse und Fertigungsverfahren (etwa durch Erfindung der Planartechnik und fotolithografischer Verfahren) führte in den 1960er Jahren auch in der Automobilindustrie dazu, neue Einsatzmöglichkeiten für Halbleiter im Fahrzeug zu erschließen. Jenseits der Unterhaltungselektronik wurden erste anwendungsspezifische Schaltkreise zur Überwachung, Steuerung und Regelung der Zündung, der Benzineinspritzung oder des Drehstromgenerators entwickelt⁴. Diese Steuergeräte wurden noch nicht als programmierbare Mikrocontroller realisiert. Stattdessen wurden die

Halbleiterbauelemente der integrierten Schaltkreise auf Leiterplatten entsprechend den Schaltplänen der Systementwickler aufgelötet, um qua ihrer Anordnung allein die gewünschte Funktion auszuführen.

Die Erfindung und Kommerzialisierung des Mikroprozessors bei Intel legte ein Jahrzehnt später die Grundlage für die Entwicklung programmierbarer Fahrzeugsteuergeräte und potenzierte ihre Verwendungsmöglichkeiten. Infolgedessen wurde ab Mitte der 1970er Jahre der Einsatz von Halbleitern in den Fahrzeugen sukzessive ausgeweitet (Bereisa 1983). Viele mechanische, hydraulische und elektromechanische Steuerungseinheiten wurden nun durch sogenannte elektronische Kontrolleinheiten (ECU) ersetzt, die mit Sensoren und Aktoren verbunden wurden.⁵ Diese »Substitutionsinnovationen« (Bierich 1987, 1f) eröffneten exaktere Steuerungsmöglichkeiten und wurden beispielsweise für die Einhaltung von Abgaswerten oder zur Optimierung des Benzinverbrauchs vor dem Hintergrund der Ölpreiskrise 1973 weitgehend unverzichtbar (Shih 2022). Auch wiesen die ECU einen geringeren Verschleiß als beispielsweise mechanische Steuerungen auf und ließen sich mit weniger Aufwand für Fahrzeuge unterschiedlicher Hersteller applizieren, sodass sie mit der Zeit insgesamt zu geringeren Kosten hergestellt werden konnten. Für ihren Einsatz in Fahrzeugen war es erforderlich, die ursprünglich für die Unterhaltungselektronik konzipierten Halbleiterkomponenten an die besonderen Anforderungen in Fahrzeugen anzupassen. Sie mussten bei Temperaturschwankungen, Feuchtigkeit und Erschütterungen funktionsfähig bleiben sowie hohe Anforderungen an elektromagnetische Verträglichkeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und funktionale Sicherheit bei langen Produktlebenszyklen erfüllen (Schäuffele/Zurawka 2016).⁶

Einzelne ECU wurden zunächst dezidiert für bestimmte Funktionsumfänge im Fahrzeug eingesetzt. Zur Funktionsausführung wurden Softwareprogramme erzeugt, die z.B. beim Airbag-Steuergerät in Millisekunden die Daten von Beschleunigungs- und Aufprallsensoren verarbeiten und eine Auslöseentscheidung treffen.

Wie Broy et al. (2007, 356) beschreiben, wirkte diese häufig in Maschinensprache oder C geschriebene Software anfangs streng lokal. Sie blieb funktional und technisch isoliert, angepasst an die beschränkten Rechenkapazitäten und Arbeitsspeicher der ECU und wurde von den Steuergeräteleferanten ähnlich wie bei den Großrechnern in der Anfangszeit der IT-Industrie als Teil des Gesamtprodukts mit der Hardware gebündelt ausgeliefert.⁷

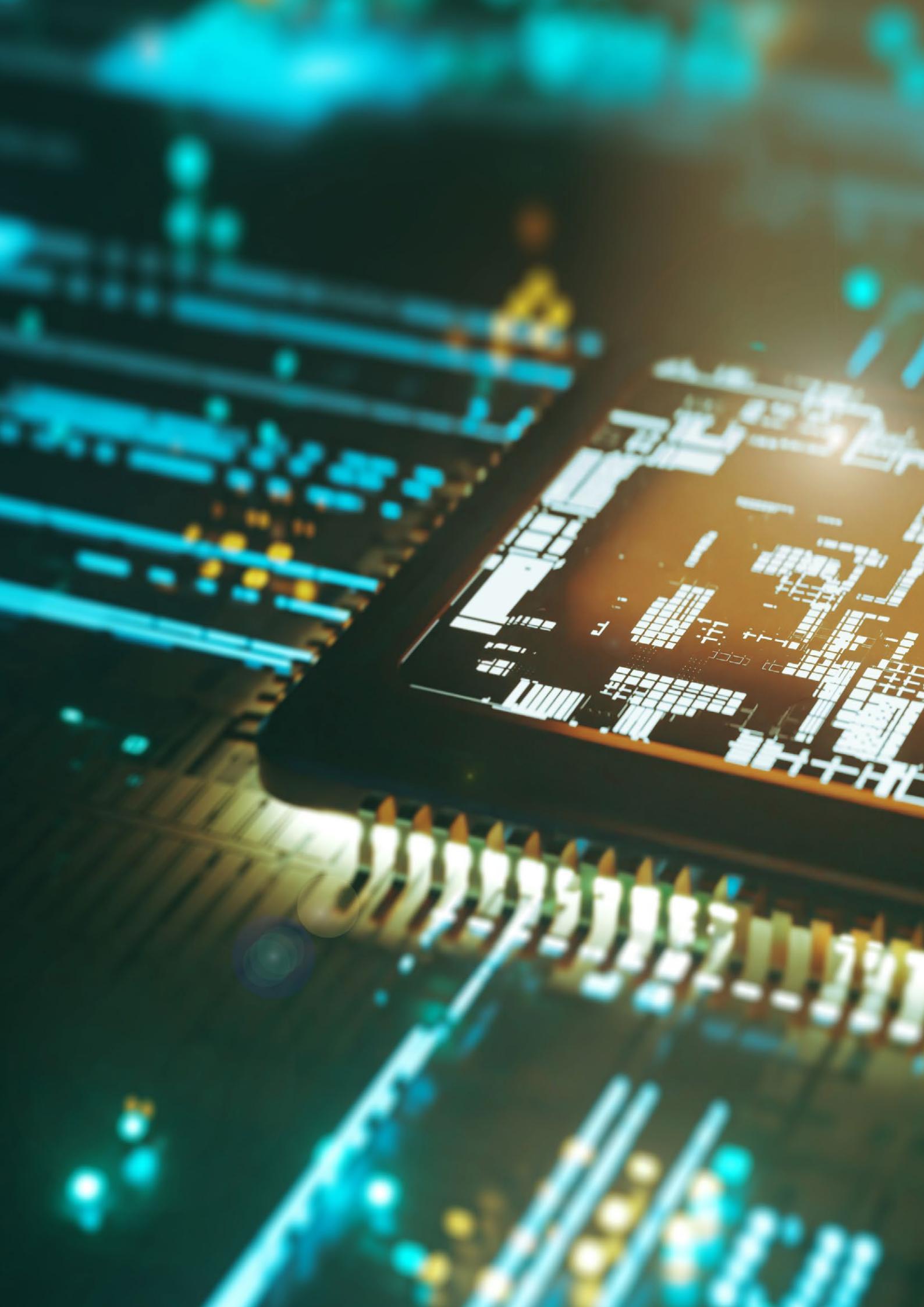
Durch anhaltende Leistungssteigerungen in der Mikroelektronik konnten einzelne ECU auch für mehrere Funktionen verwendet und Daten über Bussysteme wie LIN, CAN, FlexRay oder MOST zwischen den ECU ausgetauscht werden. Dies ermöglichte es, über mehrere ECU verteilte Funktionen zu realisieren.

Zu diesen Systementwicklungen zählen z.B. Fahrdynamiksysteme wie ABS, ASR oder ESC (Bingmann 1993; Vdovic et al. 2019).⁸ In dem Maße, wie nun nicht nur immer mehr bestehende analoge Steuerungen durch ECU ersetzt, sondern auch ECU für neuartige Fahrzeugfunktionen hinzugefügt wurden (Jürgens/Meißner 2005, 77ff), nahm die Software- und Elektronikarchitektur in den Fahrzeugen die Gestalt an, die in ihren Grundzügen in den Fahrzeugen etablierter Hersteller noch heute vorgefunden werden kann. Im Fachjargon hat sich dafür die Bezeichnung E/E-Architektur etabliert. Sie besteht aus einer stetig wachsenden Anzahl dezentral eingesetzter ECU, die über unterschiedliche Bussysteme miteinander verbunden sind. Einer unserer Gesprächspartner fasst die Entwicklung so zusammen:

»Die Halbleitersteuerung ist immer komplexer geworden (...). Es bedeutet, wenn man sich an die Umgebung anpassen muss, dass Sensorik dazukommt, (...) es werden zusätzlich andere Halbleiter noch benötigt, zum Beispiel um elektrische Spannung, Strömung und Ähnliches zu regeln (...) Die Anzahl der Halbleiter ist damit über die Jahre einfach kontinuierlich im Durchschnitt enorm angestiegen.« Projektmanager Systemzulieferer

Im Jahr 2020 wurden beispielsweise bei Volvo Cars die Software- und Elektronik-Architekturen der Fahrzeugmodelle mit ihren unterschiedlichen Ausstattungsvarianten aus einem Set von über 120 ECU zusammengesetzt (Charette 2021).⁹

Die McKinsey-Berater Burkacky et al. (2018) bezeichnen diese Architektur als »add a feature, add a box«-Modell, das zu einer immer weiter steigenden Komplexität des Gesamtsystems geführt hat.



Die Wertschöpfungsstruktur für Software- und Elektronikkomponenten von Fahrzeugen

Für die Struktur der E/E-Architektur prägend ist ferner, dass sie bisher als statisches System konzipiert und realisiert wurde. Sowohl die Halbleiterhardware- als auch sämtliche Softwarekomponenten werden bis zum Produktionsstart neuer Fahrzeuge fertiggestellt, serienreif gemacht und im Produktionsprozess der Fahrzeuge verbaut und installiert. Nach der Auslieferung der Fahrzeuge und auch während der Bauzeit der Modelle sollen im besten Fall keine Änderungen mehr am System erfolgen.

Im Zusammenspiel mit der Evolution der E/E-Architektur hat sich über Jahrzehnte eine organisatorische Arbeitsteilung zwischen OEM und Zulieferern bei der Entwicklung der Software- und Elektronikkomponenten für neue Fahrzeuge bzw. Modellvarianten etabliert:

1. Die OEM legen ihren Schwerpunkt überwiegend auf die Konzeption des Gesamtsystems der E/E-Architektur und ihrer Funktionsumfänge, die Definition von Spezifikationen für die ECU, deren Verifikation und Validierung sowie die Fahrzeugintegration, Kalibration und Erprobung des Gesamtsystems. Darüber hinaus behalten sich manche OEM vor, die Infotainmentsysteme an der Benutzerschnittstelle zu entwickeln und zu gestalten.¹⁰
2. Die Systemzulieferer entwickeln und produzieren die ECU auf Basis der Spezifikationen und verkaufen diese an die OEM. Dabei greifen sie auf ihre Steuergeräteplattformen zurück, die entsprechend den Vorgaben angepasst werden. Häufig vergeben sie darüber hinaus für bestimmte Komponenten und Module Unteraufträge an Tier-2-Zulieferer.

Entsprechend wird somit in der Regel sowohl die Software für die Ausführung der Funktionen der ECU von Zulieferern entwickelt als auch die Auswahl der verwendeten Mikrocontroller und Halbleiter durch diese getätigt und als Gesamtprodukt an die OEM verkauft. Der Kern der Innovationsarbeit an der Entwicklung der Steuergeräteplattformen und der Realisation neuer Fahrzeugfunktionen, z.B. Fahrassistenzsystemen, liegt damit bisher ebenfalls in der Hand der Zulieferer (Kalkowski/Mickler 2015, 97).¹¹

Diese Arbeitsteilung schlägt sich in der Wertschöpfungsstruktur im Software- und Elektronik-Bereich nieder. So gab etwa der ehemalige Vorstandsvorsitzende von

Volkswagen, Herbert Diess, im Jahr 2021 an, dass lediglich 10% der Software in den Fahrzeugen des Konzerns im OEM entwickelt werde, während 90% von Zulieferern stammten (Matthes/Menzel 2021). Für die Entwicklung der Fahrzeugelektronik und -software prägend sind folglich unternehmensübergreifende Prozesse, die häufig mehrere Zulieferer umfassen und entlang von Projekten organisiert werden (Heidling 2014; Kalkowski/Mickler 2015; Hab/Wagner 2017). Auf Grundlage dieser Arbeitsteilung hat sich komplementär eine Organisations- und Prozessstruktur herausgebildet, welche wiederum die Formierung der Software- und Elektronikarchitektur verstärkt hat. Sie repräsentierte bis in die 2010er Jahre hinein den »Stand der Technik« (Knie 1991, 35) und wurde als »highly successful division of labor« (Broy et al. 2007, 357) angesehen.¹²

Als Vorgehensmodell zur Strukturierung der Entwicklungsprojekte von ECU hat sich in der Automobilindustrie das V-Modell etabliert (Schäuffele/Zurawka 2016; Schmidner/Timinger 2022). In der Regel entwerfen zu Beginn des Entwicklungsprozesses neuer Fahrzeugmodelle Systementwickler beim OEM aufbauend auf die Vorarbeiten bei Vorgängermodellen die E/E-Architektur und legen die funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen an die zu entwickelnden Teilsysteme fest. Darauf aufbauend werden Spezifikationen für die Teilsysteme erstellt, die in Lastenheften an Systemzulieferer weitergegeben werden. Beim Systemzulieferer analysieren Funktionsentwickler die Anforderungsspezifikation, zerlegen diese ggf. in Teilfunktionen und erstellen ein Pflichtenheft. Im nächsten Schritt werden die entsprechenden Funktionen mit Hilfe modellbasierter Entwicklungsumgebungen modelliert (z.B. MATLAB/Simulink). Diese modellierten Teilfunktionen werden dann codiert. Anschließend wird die Software der Teilfunktionen integriert und getestet. Die getesteten Arbeitsprodukte wandern zurück an die zuständigen OEM-Abteilungen, wo sie verifiziert und mit Verfahren wie einem Hardware-in-the-Loop-System validiert werden. Ergebnis eines durchlaufenen Zyklus des V-Modells ist das »Produkt«, wobei es sich hierbei um einen bestimmten Reifegrad (Funktionsmuster, Prototyp, Vorserialmuster etc.) des geplanten Endproduktes handeln kann (Zurawka/Schäuffele 2016, 26).¹³ Zum Abschluss erfolgt die Gesamtintegration der entwickelten Systeme ins Fahrzeug beim OEM.

Um die Integration der heterogenen ECU zu verbessern, wurde im Jahr 2003 in der Branche mit AUTOSAR eine Entwicklungspartnerschaft initiiert, in der die Etablierung einer hardwareunabhängigen standardisierten Softwarearchitektur für elektronische Steuergeräte betrieben wird. Diese Referenzarchitektur soll sicherstellen, dass Steuergeräte unterschiedlicher Hersteller miteinander kompatibel sind und in Bezug auf Zuverlässigkeit und funktionale Sicherheit einheitlich verifiziert und validiert werden können (Jakobs/Tröger 2017).¹⁴ In vielen Bereichen sind es aufgrund der skizzierten Arbeitsteilung die Tier-1- oder

manchmal auch Tier-2-Zulieferer, welche die für die Fahrzeugsysteme benötigten Halbleiter beschaffen und im Wertschöpfungsprozess die Schnittstelle zu den zumeist entweder als Tier-2- oder Tier-3-Zulieferern klassifizierten Halbleiterunternehmen kontrollieren. Die historisch gewachsene Arbeitsteilung hatte zugleich die Nebenfolge, dass es die OEM bisher nur peripher interessieren musste, welche Halbleiter in den Steuergeräten ihrer Fahrzeuge verbaut werden und woher diese stammen. Aus der Perspektive der Halbleiterindustrie stellt sich diese Arbeitsaufteilung folgendermaßen dar:

»Der Automobilhersteller selbst ist ja selten direkt im Kontakt mit einem Chip-Hersteller. Das sind in der Tat dann die Tier-1 (...) die OEM definieren die Anforderungen, die dann irgendwann mal kaskadiert an den jeweiligen Hersteller in der Kette ankommen«

Experte Halbleiterindustrie

Häufig sahen die Zulieferer ihrerseits wiederum keine Notwendigkeit darin, die Informationen über die verwendeten Mikrocontroller und Halbleiter mit den OEM zu teilen. Der Risikokapitalist Olaf Sakkers (2020) beschreibt die E/E-Architekturen in den Fahrzeugen etablierter OEM daher auch als eine Zusammensetzung aus »intra vehicle fiefdoms«,

die von den jeweiligen Systemzulieferern kontrolliert und verteidigt werden. Dabei verweisen unsere Gesprächspartner darauf, dass die Tier-1-Zulieferer bei der Verteidigung ihrer Einflusssphären gegenüber den OEM z.T. auch auf die vertragliche Situation verweisen können:

»Der Tier-1 hat ja Verträge nicht nur mit einem OEM, sondern noch mit anderen OEM. Deswegen verbitten sich auch manche Tier-1, dass man gemeinsam mit dem OEM und mit dem Tier-2, 3, 4 spricht. Das ist auch vertraglich und politisch schwierig. Manche nehmen tatsächlich an so Mehr-Party-Calls gar nicht teil, weil sie sagen, wir sind euer Lieferant und der Rest geht euch nichts an.«

Branchenexperte

Die dezentrale Bestimmung über den Halbleitereinsatz und dessen Verkopplung mit der Software bei Tier-1- und Tier-2-Zulieferern trug ferner dazu bei, dass in Fahrzeugen bisher nur wenige Standardhalbleiter für verschiedene ECU verwendet werden und die Mikrocontroller zum Teil sehr heterogen sein können. Wie ein Gesprächspartner schildert, habe sich ein »Flickenteppich« etabliert, durch den insgesamt die Verwundbarkeit im Produktionsprozess steigt: Wenn nur einer der für die ECU benötigten Halbleiter fehlt, können Fahrzeuge nicht fertiggestellt und ausgeliefert werden.

An dieser skizzenhaften historischen Rekonstruktion wird deutlich, dass der gegenwärtige Halbleitereinsatz in Fahrzeugen wie die Entwicklung der E/E-Architekturen weniger Ergebnis von im vollen Bewusstsein aller Optionen und Folgen getroffenen strategischen Entscheidungen in den Unternehmen der Automobilindustrie sind, sondern, wie die soziologische Forschung auch bei anderen Technologien wie dem Dieselmotor zeigen konnte, vielmehr das Resultat eines »Schließungs- und Konsolidierungsprozesses« (Knie 1991, 306).

Immer weitere Halbleiter-basierte ECU wurden über die Jahre anlassbezogen in bestehende Fahrzeugkonzeptionen integriert und ihr Einsatz aufbauend auf der jeweiligen Vorgängergeneration ausgeweitet. Um dieses Gefüge herum bildeten sich Organisationsstrukturen und Einflussssphären aus, welche es wiederum stabilisierten. Eine grundlegende Re-Konzeptualisierung der E/E-Architektur und damit auch des Halbleitereinsatzes hat bis weit in die 2010er Jahre nicht stattgefunden.

Wie im dritten Abschnitt deutlich wird, stößt diese sedimentierte Gestaltungsweise angesichts des qualitativen Bedeutungsgewinns von Halbleitern, Software und dem Internet bei der Gestaltung der Fahrzeuge nun zunehmend an Grenzen und wird von neuen Wettbewerbern grundlegend in Frage gestellt.

Die Automobilindustrie als Markt für die Halbleiterindustrie

Mit der wachsenden Zahl der in den Fahrzeugen verbauten ECU hat sich die Automobilindustrie zu einem stetig wachsenden Markt für die Halbleiterindustrie entwickelt.¹⁵ Der Anteil der Kosten von elektronischen Komponenten und Systemen an den Gesamtfahrzeugkosten war Schätzungen der Unternehmensberatung Deloitte von 1% im Jahr 1960 bereits auf bis zu 40% im Jahr 2017 gestiegen (zit. n. Charette 2021).¹⁶ Insgesamt betrachtet, fällt der Anteil der von der Halbleiterindustrie an die Automobilindustrie gelieferten Erzeugnisse am Halbleitermarkt gegenüber anderen Zielbranchen wie der Unterhaltungselektronik oder dem Servermarkt jedoch noch gering aus. Im Jahr 2018 betrug er weltweit 11,5% (\$ 53,9 Mrd.) bei einem Volumen des Gesamtmarkts von \$ 469 Mrd. (SIA 2019, 10; ZVEI 2019, 25). Es wird kolportiert, dass der Chip-Bedarf des Tech-Konzerns Apple allein das Marktvolumen des gesamten Chip-Bedarfs der weltweiten Automobilindustrie übersteigt (Buchenau et al. 2021). Für europäische Halbleiterunternehmen stellt die Automobilindustrie mit einem Anteil von 35% ähnlich wie für die japanische Halbleiterindustrie den größten Abnehmer dar.¹⁷ Allerdings ist der

Anteil der europäischen Halbleiterindustrie am weltweiten Halbleitermarkt in den letzten 20 Jahren kontinuierlich gesunken und steht aktuell bei 9%. Gegenüber anderen Segmenten des Halbleitermarkts weist die Automobilindustrie als Zielbranche eine Reihe von Besonderheiten auf.

Erstens zählen zu den führenden Halbleiterproduzenten für den Automobilbereich bisher nicht die umsatzstärksten Konzerne der Halbleiterindustrie wie Intel, Samsung, TSMC oder Qualcomm. Stattdessen handelt es sich um Unternehmen wie die in Europa ansässigen Infineon, NXP Semiconductors, STMicroelectronics sowie die Halbleiter-Sparte von Bosch, Renesas und ROHM aus Japan oder Onsemi, Texas Instruments, Micron und Analog Devices aus den USA. Diese Unternehmen designen in der Regel ihre Chips und fertigen diese auch selbst. In den letzten Jahren werden die Designs aber auch immer öfter an Auftragsfertiger (Foundries) übergeben, welche die Halbleiter aus Wafern herstellen. Infineon und NXP erzielen unter den Halbleiterproduzenten mit jeweils knapp 12% Marktanteil die höchsten Umsätze in der Automobilindustrie.

Ein klarer Marktführer hat sich bisher jedoch nicht herauskristallisiert (Frieske et al. 2022, 81).¹⁸ Auch bei den Auftragsfertigern für den Bereich der Automobilindustrie dominieren nicht allein Branchenschwergewichte wie TSMC und Samsung den Markt. Das von AMD abgespaltenen Unternehmen GlobalFoundries, das seine Fertigungsverfahren stärker an die speziellen Anforderungen der

Automobilindustrie angepasst hat, spielt ebenfalls eine wichtige Rolle (Stroh 2017).

Zweitens wurden bisher die meisten der in der Automobilindustrie verwendeten Chips mit Strompfaden bei Nanometergrößen von über 20 Nanometer gefertigt:

»Die Technologie, die Automobilhersteller benutzen, laufen teilweise noch auf 400, 600 Nanometer. Wenn ich das z.B. mit neuen Intel-Chips vergleiche, dann denke ich noch an die Mondlandung. Also das sind Uralt-Chips, die da teilweise verbaut werden, die sind für die Hersteller teilweise nicht mehr lukrativ.« Branchenexperte

Die leistungsstärksten Chips am Markt hingegen verfügen über Strompfade mit Nanometergrößen im einstelligen Bereich – Tendenz fallend.¹⁹ Zur Herstellung der Chips für die Automobilindustrie müssen von den Halbleiterprodu-

zenten daher häufig noch ältere Fertigungsverfahren eingesetzt werden (Scholz 2022). Wie ein Gesprächspartner schildert, ist ein solcher Einsatz gerade bei Nutzfahrzeugen besonders ausgeprägt:

»Auf der Nutzfahrzeugseite haben sie sehr lange Laufzeiten der Produkte, teilweise 15, 20 Jahre. Da sind die Entwicklungszyklen länger. Dort haben wir auf der Elektronikseite jetzt gesehen, auch in der Krise, dass manche Mikrocontroller einfach keine Gewichtung mehr haben bei einem Infineon, Texas Instruments, weil sie sagen: End of Life, Mini-Stückzahlen.« Branchenexperte

Drittens werden in der Automobilindustrie weniger Standardhalbleiter als in anderen Zielbranchen verwendet:

»Der Anteil der spezialisierten Halbleiter ist deutlich höher in der Automobilindustrie als in der Consumer-Industrie zum Beispiel (...) denn die Fahrzeuge sind sehr unterschiedlich, (...), weil der eine macht das Design so und so, und da müssen die Halbleiter zusammenspielen (...) die dann nur für eine Baureihe oder Ähnliches zum Tragen kommen. Das ganze Thema macht die Automobil-Halbleiterei sehr komplex.« Experte Halbleiterindustrie

Durch die hohe Variantenvielfalt fallen die Stückzahlen bei der Produktion von Chips zudem deutlich kleiner aus als in anderen Zielbranchen. Dementsprechend lassen sich bei der Herstellung geringere Skaleneffekte und damit auch

niedrigere Margen erzielen. Dies trägt u.a. dazu bei, dass die Automobilindustrie als Absatzmarkt für die großen Hersteller bisher wenig attraktiv war:

»Wir versuchen natürlich immer – was Elektronik angeht – so gut es geht, bei Herstellern direkt zu kaufen, wobei ein Samsung oder so gar nicht mit uns redet, weil unsere Stückzahlen halt so gering sind im Vergleich zu Unterhaltungselektronik, das ist dem halt wurscht.« Einkäufer Systemzulieferer

Viertens herrscht bei den Unternehmen in der Automobilindustrie häufig die Erwartung vor, dass die Halbleiterproduzenten ihre Chips zu Festpreisen zu den bei Just-in-time- und Just-in-sequence-Strategien erforderlichen Zeitpunkten in die Werke liefern. Während die Unternehmen der Automobilindustrie ihre Bestellungen teilweise mit Vorlaufzeiten von 12 Wochen aufgeben, benötigen die Halbleiterproduzenten bis zu 24 Monate Vorlauf für ihre Produktion. In der Zusammenarbeit zwischen Halbleiterindustrie und Kunden aus der Unterhaltungselektronik ist es verbreitet, längerfristige Entwicklungspartnerschaften zu schließen und teilweise auch mehrjährige Vereinbarungen über Liefermengen zu treffen (Schuh et al. 2022). Während die Unternehmen der Automobilindustrie so Kosten für Lagerhaltung einsparen konnten, trugen bisher primär

die Chip-Hersteller die Unsicherheiten und Risiken bei ihren Investitionen in Designs und Fertigungskapazitäten für die Automobilindustrie.

Fünftens müssen die Chip-Produzenten für die Belieferung der Automobilindustrie wie auch für andere stärker regulierte Zielmärkte wie den Gesundheits- oder Energiesektor spezielle Kompetenzen aufbauen. Um in sicherheitskritischen Anwendungen in den Fahrzeugen eingesetzt werden zu können, ist es zum Beispiel erforderlich, dass die Mikrocontroller und Halbleiter Zertifizierungsprozesse für Automotive durchlaufen. Wie ein Gesprächspartner schildert, müssen Chipproduzenten zur Erfüllung dieser Anforderungen entsprechendes Know-how aufbauen:

„Es ist ja so, in der Automobilindustrie kommt ja noch so eine Komplexität hinzu. Man muss Automotive-zertifiziert sein, man muss Automotive können. Es ist nicht so, dass man, wie bei anderen Industrien, einfach mal den Anbieter wechseln kann oder Ähnliches. Die Anzahl der Anbieter, die das machen können, ist einfach begrenzt. Das ist meistens dann für einen Bereich maximal eine Handvoll, die man dann in Betracht ziehen kann, überhaupt so ein Produkt liefern zu können oder in der Lage sind, die Anforderungen zu erfüllen. (...) Um einen Halbleiterhersteller, der aus dem Consumer-Bereich kommt, dazu zu bringen, Automobil-Halbleiter zu liefern und herzustellen, das braucht viele Jahre, um genau zu sein. Also da reden wir nicht von ein paar, sondern mindestens fünf bis zehn Jahre, um jemand dahin zu bringen.“

Experte Halbleiterindustrie

Angesichts dieser Besonderheiten der Automobilindustrie als Zielbranche für die Halbleiterproduzenten mussten auch die weltweit führenden OEM in der Krise die Erfah-

rung machen, dass sie, wie ein Gesprächspartner schildert, in der Prioritätenrangliste der Halbleiterkonzerne nicht zwingend an erster Stelle stehen:

»Der OEM-Vorstand wollte persönlich zu Halbleiterhersteller Y gehen und ihm wird gesagt, ja, wir schauen mal, ob wir einen Termin haben. Wenn ein Apple-Vorstand kommen würde zu einem Halbleiterhersteller, würde die Aussage nicht sein, wir schauen mal.« Führungskraft OEM

Hinzu kommt, dass die Automobilindustrie als Zielmarkt für die Halbleiterindustrie gegenwärtig eine Reihe tiefgreifender Veränderungen durchläuft. Diese Veränderungen

und ihre Auswirkungen auf den Halbleiterbedarf sowie die Zusammenarbeit zwischen beiden Branchen stehen im Zentrum des folgenden Abschnitts.

3.

Von Vorleistungsgütern zu strategischen Komponenten: Die Transformation der Rolle von Halbleitern im Fahrzeug

Aktuell potenzieren vor allem zwei Entwicklungen den Bedarf an Halbleitern in der Automobilindustrie: einerseits die Elektrifizierung des Antriebsstrangs, andererseits die Transformation der Software- und Elektronikarchitektur und die Realisation neuer Software-basierter Anwendun-

gen in den Fahrzeugen. In den vergangenen Jahren haben diese Entwicklungen, wie ein Gesprächspartner schildert, enorm an Fahrt aufgenommen und stellen gerade in ihrem Zusammenwirken die etablierten Unternehmen der Branche vor neuartige Herausforderungen:

»Elektrofahrzeuge und autonome Steuerung oder andere höhere Funktionen, diese Entwicklungen sind wirklich kumuliert aufgetreten. (...) Für die Autoindustrie war dieser Anstieg an Funktionen, der gerade in den letzten Jahren passiert ist, doch schneller, als es üblich ist. Die Autoindustrie ist normalerweise darauf vorbereitet, peu à peu werden Dinge eingeführt, das dauert seine Zeit, die Zyklen sind sehr lang. Also man braucht wirklich Jahre, um gewisse Funktionen einzuführen. Und in den letzten Jahren haben sich aber so viele Funktionen so schnell entwickelt, dass das auch für die Automobilindustrie einfach schlecht vorherzusagen war.«

Branchenexperte

Die damit einhergehenden Veränderungen für den Halbleiterbedarf werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Leistungshalbleiter: Schlüsselkomponenten des elektrischen Antriebsstrangs

Ein zentraler Treiber des wachsenden Bedarfs für Halbleiter in der Automobilindustrie ist die Elektrifizierung des Antriebsstrangs. In den letzten zwanzig Jahren konnte die Konkurrenzfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs gegenüber Antrieben mit Verbrennungsmotor sukzessive gesteigert werden. Dahinter steht das Zusammenwirken verschiedener Entwicklungen. Dazu zählen die kontinuierliche Arbeit an technologischen Neuerungen wie insbesondere die Adaption und Weiterentwicklung der Lithium-Ionen-Technologie für die Konstruktion der in den Fahrzeugen verwendeten Batteriezellen (Eberhard 2006); der Ausbau und die Weiterentwicklung einer Ladeinfrastruktur; zunehmende Skaleneffekte durch die Steigerung

der Produktion von Elektrofahrzeugen; anhaltende Verschärfungen der gesetzlichen Vorgaben zur Emissionsreduktion²⁰ sowie staatliche Subventionen für die Anschaffung von emissionsfreien Fahrzeugen über Kaufprämien und andere wirtschaftspolitische Instrumente. Damit nähern sich die durchschnittlichen Kosten eines Elektrofahrzeugs immer stärker den durchschnittlichen Kosten von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor an (Ewing 2023), wenngleich in der vergangenen Dekade die Ausweitung der Ölproduktion insbesondere in den USA auf Grundlage neuer Fördermethoden wie Superfracking dieser Angleichung entgegenwirkte.

Mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs verändert sich der Bedarf an Halbleitern im Fahrzeug. Während viele Komponenten wie Einspritzungssysteme, Kolben, Auspuffrohre oder Abgasreinigung, die in Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor eingesetzt werden, nun nicht mehr benötigt werden (Bauer et al. 2020), steigt gegenläufig der Bedarf an Halbleitern im Fahrzeug.

Dies betrifft insbesondere den Bereich der Leistungselektronik, welche die elektrische Energie in den Fahrzeugen konvertiert und steuert (Emadi 2017). Neben dem auch bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor vorhandenen Niederspannungsnetz regelt Leistungselektronik in Elektrofahrzeugen das Zusammenspiel von Batterie und Elektromotor im Hochspannungsnetz. Die Leistungselektronik steuert z.B. den Ladevorgang der Batterie, wandelt den Gleichstrom der Batterie in Wechselspannung für die Elektromotoren um und steuert den Elektromotor.²¹ Zugleich ermöglicht sie etwa auch die Aufnahme von Energie durch regeneratives Bremsen (Lindemann 2019). Die dafür eingesetzten Leistungshalbleiter (z.B. In-

verter, Gleichstromkonverter) müssen hohe Spannungen (von 400-Volt- bis zu 800-Volt-Bordnetzen)²² verarbeiten können. Seit einigen Jahren bereits wird intensiv daran gearbeitet, eine neue Generation von Leistungshalbleitern aus Wafers aus Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN) zu etablieren. Die Verwendung dieser Materialien soll aufgrund der gegenüber anderen Substraten höheren Halbleitereffizienz u.a. größere Reichweiten und schnellere Ladevorgänge beim batteriegetriebenen Fahrzeug möglich machen (Ding et al. 2017).²³

Zur Steuerung der Batterie und der Komponenten der Leistungselektronik werden wiederum Mikrocontroller wie Batteriemanagementeinheiten oder Zellüberwachungseinheiten eingesetzt, in denen auch künftig Silizium-Halbleiter verbaut werden. In Kombination mit der Software z.B. für Batteriemanagementsysteme, Motorsteuerung und Temperaturmanagement wird der Halbleitereinsatz zu einem differenzierenden Moment bei der Gestaltung des Antriebsstrangs in den Fahrzeugen, wie auch ein Gesprächspartner verdeutlicht:

»Die Leistungselektronik ist aktuell eine Core Kompetenz (...) weil das in Sachen Effizienz vom Antrieb, also Reichweiten, was zusammenhängt mit Verbrauch logischerweise, Performance aktuell ein sehr dynamisches Umfeld ist und als Game Changer gesehen wird, wenn man die Kompetenz beherrscht.« Führungskraft Systemzulieferer

Über die Weiterentwicklung der Software und der Halbleiter kann die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebs gesteigert werden, um etwa größtmögliche Reichweiten bei möglichst geringen Kosten zu erzielen.

Insgesamt werden den Berechnungen von Analysten und Beratungshäusern zufolge in Fahrzeugen mit elektrischem Antrieb mehr als doppelt so viele Halbleiter verbaut wie in herkömmlichen Fahrzeugen. Laut der Managementberatung Kearney belaufen sich die Kosten für sämtliche Halbleiter, welche in einem Antriebsstrang mit Verbrennungsmotor bei einem durchschnittlichen Fahrzeug eingesetzt werden, auf \$ 90. Die Kosten für die Halbleiter, die für den elektrischen Antriebsstrang benötigt werden, betragen hingegen durchschnittlich \$ 580 und liegen damit 544,4% höher (Shiao et al. 2021). Dem Automotive Electronics Component Model der Managementberatung Roland Berger zufolge beliefen sich die Kosten für Elektronik (Halbleiter + Software) in einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor im Jahr 2019 durchschnittlich noch auf \$ 3.145.

Demgegenüber wird prognostiziert, dass die Kosten für elektronische Komponenten in einem batterieelektrischen und autonom fahrenden Fahrzeug bis zum Jahr 2025 um 124% auf durchschnittlich \$ 7.030 steigen werden. Ihr Anteil an den Gesamtfahrzeugkosten lege demnach von 16% auf 35% zu (Meissner et al. 2020, 7).

Immer häufiger beschränken sich die Hersteller der Halbleiter für Leistungselektronik und ihre Steuerung allerdings nicht darauf, lediglich die Halbleiterhardware zu liefern, sondern steigen in die Entwicklung von Software ein. So hat beispielsweise NXP eine Partnerschaft mit der Continental-Tochter Elektrobit geschlossen, um gemeinsam die Entwicklung einer Lösung für ein Batteriemanagementsystem zu betreiben, welches Halbleiterhardware und Software umfasst (Schäfer 2022).

Für die etablierten Unternehmen der Automobilindustrie gestaltete es sich bis vor kurzer Zeit noch schwierig, vorherzusehen, wie sich die Nachfrage nach Elektro-

fahrzeugen entwickeln wird, und die Produktionskapazitäten darauf anzupassen – insbesondere, wenn parallel die Nachfrage nach Fahrzeugen mit konventionellem Antriebsstrang weiter bedient wird. Inmitten der Corona-Pandemie änderte sich diese Situation.

Im August 2022 verabschiedete das CARB eine neue Regulation mit dem Ziel, ab 2035 nur mehr emissionsfreie Fahrzeuge auf Kaliforniens Straßen zuzulassen, und im Oktober 2022 wurde bekannt, dass sich auch Mitgliedstaaten und Parlament der EU auf ein Gesetz geeinigt haben, wonach ab dem Jahr 2035 nur noch emissionsfreie Fahrzeuge zugelassen werden sollen (Wittich et al. 2022). Auf dem weltgrößten Markt für Automobile in China wurde ein solcher Zeitpunkt bisher zwar noch nicht festgelegt. Im September 2020 gab aber die chinesische Regierung das Ziel aus, bis zum Jahr 2060 die gesamte Wirtschaft CO₂-neutral zu gestalten, und fördert in diesem Zusammenhang massiv den Verkauf von Elektrofahrzeugen durch Kaufprämien, sodass China zu einem der weltweit führenden Märkte für Elektrofahrzeuge aufgestiegen ist (Meng Fang/Zhou 2022).

Diese politischen Weichenstellungen schufen neue Rahmenbedingungen für die etablierten Hersteller, die z.T. bereits zuvor bekanntgegeben hatten, dass künftig nur noch vollelektrische Modelle entwickelt werden sollen. Volkswagen und Audi beispielsweise planen damit, ab dem Jahr 2026 nur mehr vollelektrische Fahrzeuge zu entwickeln sowie in der EU ab dem Jahr 2033 nur noch vollelektrische Fahrzeuge zu verkaufen (Gomoll 2022; Fasse 2021).

Während bis vor kurzem viele OEM den Elektroantrieb als eine mögliche Option unter weiteren alternativen Antriebstechnologien wie Wasserstoff und E-Fuels betrachtet hatten, gaben sie nun ähnlich gelagerte Zielstellungen bekannt. Angesichts dessen ist gegenwärtig davon auszugehen, dass die Nachfrage nach Leistungshalbleitern in der Automobilindustrie weiter anziehen wird.

Die Transformation der Fahrzeugsoftware: Halbleiter als Enabler Software-definierter Fahrzeuge

Zur Ausweitung des Halbleitereinsatzes in den Fahrzeugen trägt zudem der anhaltende Bedeutungsgewinn von Fahrzeugsoftware bei der Gestaltung der Produkte bei. Heute ist nicht nur die Ausstattung von Fahrzeugen mit einer Vielzahl softwarebasierter Sicherheitsfunktionen wie z.B. einem Notfallbremsassistenten gesetzlich vorgeschrieben und Voraussetzung für ihre Zulassung. Gerade bei Premiumfahrzeugen geben zudem vom Infotainment über Fahrassistenzsysteme bis hin zum autonomen Fahren immer häufiger softwarebasierte Funktionen den Ausschlag bei den Kaufentscheidungen von Kunden (Weiß et al. 2018).²⁴ Und auch für die Leistungsfähigkeit des elektrischen Antriebsstrangs spielt die Qualität der Software zur Steuerung der Leistungselektronik, der Batteriesysteme und der Ladeinfrastruktur eine entscheidende Rolle. Bereits zu Beginn der 2000er Jahre bezifferten Branchenexperten den Anteil von Softwareentwicklung an der Innovationsaktivität in der Automobilindustrie auf 80% (Leen/Heffernan 2002, 88), sodass in einem Premiumfahrzeug bereits im vergangenen Jahrzehnt durchschnittlich bis zu hundert Millionen sog. Lines of Code zu finden waren (Broy et al. 2011). Um zu funktionieren, ist diese Fahrzeugsoftware auf Halbleiter angewiesen, auf denen sie gespeichert und ausgeführt wird und welche permanent Daten über ihre Umgebung generieren sowie diese Datenströme in Millisekunden zwischen Recheninstanzen, Sensoren und Aktoren übertragen. Die etablierten Software- und Elektronikarchitekturen in den Fahrzeugen stoßen in den gegenwärtigen Innovationsprozessen allerdings zunehmend an Grenzen.

Einerseits hat die immer größere Anzahl dezentral eingesetzter ECU ungeachtet der Etablierung standardisierter Referenzarchitekturen für die Steuergeräteentwicklung wie AUTOSAR die Komplexität in den Fahrzeugentwicklungsprozessen potenziert und ist zu einem dauerhaften Problemherd und Kostentreiber geworden (Zerfowski/Crepin 2019, 37; Antinyan 2020). Bei der Integration ins Gesamtsystem müssen die ECU der unterschiedlichen Zulieferer in ihrem Zusammenspiel aufwendig getestet und kalibriert werden. Softwarefehler können dadurch teilweise erst zu einem sehr späten Zeitpunkt im Entwicklungsprozess bemerkt werden. Korrekturarbeiten verursachen dann nicht nur hohe Kosten, sondern können auch Produktionsstarts gefährden.²⁵ Immer häufiger treten Probleme mit der Software zudem auch nach der Auslieferung im Betrieb der Fahrzeuge auf. Den Daten der US-Bundesbehörde für Straßen- und Verkehrssicherheit (NHTSA) zufolge hat sich die Zahl der durch Softwareprobleme verursach-

ten Rückrufaktionen in den USA zwischen 2009 und 2019 insgesamt verdreifacht. Die Behebung dieser Probleme in Werkstätten verursacht ebenfalls hohe Kosten und stellt gleichzeitig ein Sicherheitsrisiko dar, wenn Fahrzeuge mit Softwarefehlern bis zum Zeitpunkt der Fehlerbehebung weiter im Straßenverkehr unterwegs sind (Lilly 2020).

Andererseits sind die etablierten Software- und Elektronikarchitekturen auf die Anforderungen komplexer und datenintensiver Anwendungen etwa in den Bereichen Infotainment, bei Fahrassistenzsystemen oder gar bei autonomen Fahrfunktionen nicht ausgelegt. Die enormen Leistungsanforderungen, die solche Anwendungen an die eingesetzten Halbleiter stellen, erfordern den Einsatz von Hochleistungs-System-on-Chips (SoC) mit Strompfaden im einstelligen Nanometerbereich und können mit den bis dato in der Automobilindustrie verwendeten Mikrocontrollern nicht mehr realisiert werden.²⁶ Auch um dem Wunsch vieler OEM nachzukommen und nach der Auslieferung der Fahrzeuge weitere Softwarefunktionen aufzuspielen und monetarisieren zu können, wird es erforderlich, wie bei Smartphones und PCs, den Einsatz der Halbleiterhardware nicht primär auf Kostenoptimierung zu trimmen, sondern zusätzliche Ressourcen ins Fahrzeug einzubauen und potenzielle Ausbaustufen bereits bei der Konzeption der Fahrzeuge zu berücksichtigen. Halbleitereinsatz wird dadurch, wie der Branchenexperte Henner Lehne formuliert, »vom reinen Teile-Thema immer mehr zum Tech-Thema« (zit. n. Stroh 2021).

Demgegenüber eröffnet die Weiterentwicklung bei einer Reihe von Schlüsseltechnologien Möglichkeitsräume dafür, Fahrzeugsoftware anders zu entwickeln, neu einzusetzen und die Grenzen etablierter Software- und Elektronikarchitekturen zu überwinden. Die Erhöhung der Datenübertragungsraten im Fahrzeug durch Technologien wie Automotive Ethernet, CAN FD sowie 5G und die Weiterentwicklung von Virtualisierungstechnologien für Automotive schaffen zum Beispiel Grundlagen dafür, Fahrzeugkomponenten, Halbleiterhardware und Fahrzeugsoftware stärker voneinander zu entkoppeln, sodass eine kleinere Anzahl an Hochleistungsschips für deutlich größere Funktionsumfänge im Fahrzeug eingesetzt werden kann.²⁷ Darauf hinaus ermöglichen die Vernetzung der Fahrzeuge mit IT-Infrastrukturen in Public oder Private Clouds über das Internet und die Verbesserung der Übertragungstechniken eine Vielzahl neuer Anwendungen wie das Sammeln und Auswerten von Fahrdaten der Fahrzeugflotten oder

den Zugriff auf die Fahrzeugsoftware aus der Ferne, um diese updaten, konfigurieren, erweitern und bedienen zu können (z.B. Türentriegelung via Smartphone).

Im Zusammenspiel stellt der Innovationsdruck, den wandelnde Marktanforderungen einerseits und neue technologische Möglichkeiten andererseits induzieren, das in der

Zentralisierung der Software- und Elektronikarchitektur: Auf dem Weg zum Software-definierten Fahrzeug

Über Jahrzehnte wurden die evolutionäre Entwicklung der Software- und Elektronikarchitektur und der statische Charakter des Systems nach Auslieferung der Fahrzeuge kaum in Frage gestellt. Dies änderte sich in der ersten Hälfte der 2010er Jahre. Im Model S von Tesla, das im Jahr 2012 auf den Markt kam, sollten die Potenziale der zu diesem Zeitpunkt verfügbaren technologischen Möglichkeiten des in Entstehung befindlichen »Internet der Dinge« (Ziegler 2020, 27-44) für die Entwicklung der Fahrzeugsoftware adaptiert und nutzbar gemacht werden, um eine dynamische Software- und Elektronikarchitektur im Fahrzeug zu realisieren. Dies geschah zu einem Zeitpunkt, an dem die etablierten OEM sich darauf konzentrierten, ihre Infotainment-Systeme mit dem Internet zu verbinden und diesen Bereich der Fahrzeugsoftware updatefähig zu machen (Taub 2016; Coppola/Morisio 2017, 3f). Bei Tesla wurde das Ziel gesetzt, ein System zu entwickeln, bei dem die gesamte Software im Fahrzeug kontinuierlich über eine Internetverbindung verändert werden kann. Gleichzeitig sollten bei den sicherheitsrelevanten Funktionen im Fahrzeug höchste Anforderungen im Bereich funktionaler Sicherheit erfüllt werden. Grundvoraussetzung für die Verwirklichung dieser Aufgabenstellung war, dass Tesla mit der etablierten Arbeitsteilung in der Automobilindustrie brach und als OEM viele Bausteine bei der Entwicklung von Fahrzeugsoftware nicht mehr an Zulieferer vergab. Stattdessen wurde im Unternehmen eine eigene Organisation für die Entwicklung von Fahrzeugsoftware aufgebaut, für die auch viele Spezialisten in Automotive Software von Systemzulieferern rekrutiert wurden. Die »Vehicle Software Organization« erhielt den Auftrag, neben dem Infotainment auch die Software für Funktionen wie Motorsteuerung, Thermomanagement, Ladevorgänge, Türenentriegelung, Fenster, Fahrassistenz bis hinein in den Bereich der fest in die Steuergeräte eingebetteten Firmware (vom Bootloader bis hin zum Echtzeitbetriebssystem – RTOS) selbst zu entwickeln. Statt über Automobilzulieferer bezog Tesla somit auch die meisten der in seinen Fahrzeugen verwendeten SoCs und Mikrocontroller direkt von Halbleiterproduzenten wie die Chips für Infotainment von

Automobilindustrie über Jahrzehnte etablierte »techno-economic paradigm« sowie die korrespondierenden »organizational practices« (Perez 2002, 14) für die Gestaltung der Software- und Elektronikarchitekturen in den Fahrzeugen in Frage und damit nicht zuletzt auch den Halbleiter-einsatz.

Intel und AMD, digitale Signalprozessoren (DSP) zur kontinuierlichen Bearbeitung von Audio- und Videosignalen von Texas Instruments sowie weitere Chips von Freescale (heute NXP) oder Melexis.²⁸

Parallel wurde eine durchgängige Tool Chain für Entwicklung, Testautomatisierung, Validierung, Kalibration und Inbetriebnahme neuer Fahrzeugsoftware via OTA-Updates aufgebaut. Bei der Arbeit an der Etablierung dieser Architektur und Toolchain durchliefen die Entwickler/-innen bei Tesla einen umfassenden Lernprozess. Als Neugründung hatte das Unternehmen gegenüber etablierten OEM den Vorteil, dass es zunächst mit einer kleinen Flotte an Fahrzeugen beginnen und die Lernerfahrungen sukzessive skalieren konnte. Statt für Funktionsumfänge jeweils eine dezidierte ECU einzubauen, wurde die Entscheidung getroffen, Hochleistungscomputer für bestimmte Zonen ins Fahrzeug zu integrieren und diese über leistungsfähige Datenverbindungen sowohl untereinander als auch mit Sensoren, Aktoren und kleineren Mikrocontrollern zu verknüpfen. Die Hochleistungscomputer wurden mit einer Hardwareabstraktionsschicht ausgestattet und können große Funktionsumfänge in den Zonen Autopilot (Fahrassistenzsysteme und autonome Fahrfunktionen), Infotainment und Instrument Cluster, der Karosserie und dem Chassis (elektrischer Antriebsstrang) ausführen. Ein Terminal Gateway verknüpft die Systeme im Fahrzeug über das Internet mit Backend-IT-Infrastrukturen. Die Zahl der im Model S und in Folgemodellen verbauten ECU konnte dadurch deutlich reduziert werden.²⁹ Gegenüber den etablierten Software- und Elektronikarchitekturen geht die bei Tesla umgesetzte Variante einer »zonal architecture« (Meissner et al. 2020, 12; Kouthon 2022) mit einer Reihe von Veränderungen einher und eröffnet neue Möglichkeiten. Unter der Überschrift »Software-definiertes Fahrzeug« wurden nicht nur ähnliche Varianten bei weiteren Elektro-Startups wie NIO und Lucid Motors nachgebaut. In der zweiten Hälfte der 2010er Jahre gab diese Architektur auch den in immer weiteren OEM und Systemzulieferern verfolgten Anstrengungen Orientierung, die auf eine Neufassung der etablierten E/E-Architekturen zielten.

Veränderung des Softwareentwicklungsprozesses

Bisher wurde die in den Fahrzeugen zum Einsatz kommende Software im Einklang mit dem Produktentstehungsprozesses entwickelt, getestet, validiert sowie appliziert und im Zuge der Herstellung der Fahrzeuge aufgespielt. Die Struktur des Softwareentwicklungsprozesses blieb sehr stark an den übergeordneten Fahrzeugentwicklungsprozess und dessen Zeitrahmen angepasst. Die gesamte Software- und Elektronikarchitektur wurde entsprechend primär als statisches System konzipiert (Jakobs/Tröger 2017, 1479). Änderungen sowohl an der Fahrzeugsoftware als auch der Halbleiterhardware sollten jeweils nur bei neuen Bau- und Modellreihen eingeführt werden. Traten in den Fahrzeugen Softwareprobleme auf, konnten sie lediglich über die Verknüpfung mit der OBD-2-Diagnosebuchse und das Diagnose-Kommunikationsprotokoll UDS in der Werkstatt diagnostiziert und die Software angepasst werden (Kessler 2017).³⁰ Für im Feld befindliche Fahrzeuge existierten somit nur sehr beschränkte Möglichkeiten, über ihren Lebenszyklus hinweg veränderte Informationsanforderungen umzusetzen oder andere als die noch während des Entwicklungsprozesses angelegten Datenparameter zur Fehlerdiagnose auszuwerten.

Mit der Arbeit an der Realisation von Software-definierten Fahrzeugen verändert sich dieser bestehende Softwareentwicklungsprozess in der Automobilindustrie. Die auf Statik ausgelegte Architektur verwandelt sich im Software-definierten Fahrzeug durch die stärkere Entkopplung der Software von der Halbleiterhardware, die Einführung serviceorientierter Kommunikation innerhalb der Software-Anwendungen (Ziegler 2021, 14ff) und die internetbasierte Verknüpfung mit einem Backend in eine dynamische Architektur. Nicht nur im Infotainment-Bereich, sondern in sämtlichen Domänen des Fahrzeugs wird daran gearbeitet, die Software- und Elektronikarchitektur so zu gestalten, dass die gesamte Fahrzeugsoftware über den Lebenszyklus der Fahrzeuge weiterentwickelt und via Software-Updates aus der Ferne modifiziert werden kann.³¹ Durch diesen Mechanismus können kontinuierlich Fehler in der Software behoben, Softwarekonfigurationen angepasst oder Verbesserungen an der bestehenden Software (z.B. Optimierung der Benutzerschnittstelle, Reduktion von Technical Debt und Code Refactoring) implementiert, aber auch neue Funktionen in Betrieb genommen werden.³² Zugleich wird es möglich, statt mehrere unterschiedliche Versionen eine aktuelle Version der Fahrzeugsoftware auf der gesamten Flotte zu betreiben (sofern die Halbleiterhardware dies zulässt), die sich lediglich in den Konfigurationen

(z.B.länderspezifisch) unterscheidet.

Durch die Dynamisierung der Fahrzeugsoftware nehmen bei ihrer Entwicklung mit den Gestaltungsmöglichkeiten zugleich die Ungewissheitsdimensionen zu. Statt wie bisher die Fahrzeugsoftware primär als kompliziertes System mit sog. »known unknowns« zu betrachten und sie in der dem Entwicklungsprozess zugrunde gelegten Vorgehensweise entsprechend zu behandeln, nimmt Fahrzeugsoftware nun immer mehr den Charakter eines emergenten komplexen Systems mit vielen sog. »unknown unknowns« an (Kurtz/Snowden 2003). Das etablierte V-Modell stößt angesichts dieser Komplexität des Arbeitsgegenstands an Grenzen (Ziegler et al. 2020, 43ff; Böhle et al. 2016). Gerade bei neuartigen Anwendungen wie der Entwicklung autonomer Fahrfunktionen liefert eine Vorgehensweise, bei der in der Anfangsphase alle Eigenschaften der zu entwickelnden Software spezifiziert werden, um dann sequenziell nach Plan entwickelt und validiert zu werden, keine guten Ergebnisse. Stattdessen hat es sich in diesen Kontexten etabliert, Annahmen frühzeitig in Softwareinkremente zu überführen, diese immer wieder durch Experimente zu testen und auf das Feedback aus den Tests die weitere Entwicklung aufzubauen. Neben einer Veränderung des Technologieeinsatzes sind daher zur Ausschöpfung der Potenziale zentralisierter Software- und Elektronikarchitekturen auch eine Reihe von Maßnahmen zur Neugestaltung der Entwicklungsprozesse unerlässlich (Pfeffer et al. 2019).

Im Zuge dessen werden Vorgehensweisen und Praktiken agiler Softwareentwicklung und DevOps (Johnson et al. 2018; Dumitrescu et al. 2021; Kim et al. 2022) auf den Automotive-Kontext adaptiert und eine entsprechende Toolchain für die kontinuierliche Weiterentwicklung der Fahrzeugsoftware aufgebaut. Dazu zählt beispielsweise die Etablierung eines verteilten Versionskontrollsystems beim OEM zur Verwaltung der gesamten Fahrzeugsoftware³³ und der Aufbau einer automatisierten Test- und Validierungsumgebung, in der neue Softwareinkremente kontinuierlich getestet, validiert (insbesondere im Hinblick auf funktionale Sicherheit) und in Betrieb genommen werden können. Vergleichbar mit den Praktiken kontinuierlicher Integration und Inbetriebnahme in Tech-Unternehmen (CI/CD) soll durch solche Automatisierungsschritte im Entwicklungsprozess der Code-Build-Deploy-Loop signifikant vereinfacht und verkürzt werden (Daum 2022).³⁴ Bei den etablierten OEM können mittlerweile viele Unternehmen die Software im Infotainment-Bereich und einigen weiteren Subsystemen aus der Ferne updaten.

BMW beispielsweise ist überdies auch in der Lage, wie Tesla die gesamte Software in seinen Fahrzeugen auf sämtlichen ECU mit Updates zu versorgen, und praktiziert dies eigenen Angaben zufolge seit dem Jahr 2019 (BMW 2022a; Bielawski et al. 2020, 2).

Zum anderen reduziert sich durch den Einsatz von Hochleistungscomputern, die viele Funktionen parallel ausführen können, die Komplexität der Gesamtarchitektur und der Integrationsaufwand. Neben geringeren Testaufwänden können dadurch insgesamt die Zahl der Steuergeräte verringert und weniger Kabel verbaut werden. Bei Elektrofahrzeugen wirken sich sowohl Gewichtsreduktion als auch Steigerungen der Energieeffizienz bei den Halbleitern unmittelbar auf die Reichweite aus.³⁵ Die Verringerung der Zahl der Steuergeräte hat zudem zur Folge, dass von den OEM auch deutlich weniger Lieferketten gemanagt werden müssen.

Insgesamt schafft die Einführung einer zentralisierten Software- und Elektronikarchitektur die Basis dafür, die Entwicklung der Fahrzeugsoftware vom Entwicklungsprozess sowohl der Fahrzeugkomponenten als auch der Elektronikhardware deutlich stärker zu entkoppeln. Die Entwicklung von Fahrzeugsoftware kann einer eigenen Geschwindigkeit folgen. Sie endet allerdings auch nicht mehr mit dem Produktionsstart, sondern kann über den gesamten Lebenszyklus der Fahrzeuge aufrechterhalten

werden. Durch die Internetfähigkeit der Fahrzeuge entstehen dabei auch neue Anforderungen an das Risikomanagement und die Gewährleistung von Cyber Security. Im Jahr 2016 gelang es Mitarbeiter/-innen des chinesischen Tech-Konzerns Tencent, über WLAN Zugriff auf das Gateway und darüber auf den CAN-Bus des Model S zu erhalten, sodass sie das Fahrzeug aus der Ferne steuern konnten (Nie et al. 2017). Um diese Sicherheitslücke zu beheben, wurde bei Tesla ein kryptografisches Verfahren entwickelt, das bei jedem auf die Fahrzeuge aufzuspieldenden Softwareupdate zuvor einen digitalen Sicherheitscode überprüft.³⁶

Um die Potenziale zentralisierter Software- und Elektronikarchitekturen ausschöpfen zu können, formulieren viele etablierte OEM den Anspruch, ihre Wertschöpfungstiefe in der Softwareentwicklung auszuweiten. Während auf der einen Seite Branchengrößen wie Volkswagen (Cariad) und Toyota (Arene) eigene Tech-Einheiten zum Aufbau zentralisierter Software- und Elektronikarchitekturen eingerichtet haben, führen auf der anderen Seite Systemzulieferer wie Bosch, Continental, ZF oder Aptiv umfassende Reorganisationen ihrer Abteilungen für Automobil-elektronik und Fahrzeugsoftware durch, schließen neue Partnerschaften und erweitern ihr Portfolio um Zukäufe mit dem Ziel, ihren Kunden einheitliche Lösungen für die Gestaltung »Software-definierter Fahrzeuge« offerieren zu können.

Realisation neuer Anwendungen und Transformation der Kundenbeziehung

Die Zentralisierung der Software- und Elektronikarchitektur ermöglicht Automobilherstellern darüber hinaus die Umsetzung einer Reihe neuer Anwendungen im und um das Fahrzeug. Durch die Verknüpfung mit Backend-IT-Infrastrukturen können Daten über das Fahrverhalten in Data Lakes gesammelt und ausgewertet werden (Geurking 2022). Diese Daten lassen sich zum Beispiel dafür nutzen, die Entwicklungsprozesse von Fahrzeugkomponenten zu verbessern. Sie können jedoch auch zur Grundlage für neue Anwendungen wie Predictive Maintenance, datenbasiertes Flottenmanagement und personalisierte Kfz-Versicherungen oder die Integration der Angebote des globalen »Informationsraums« (Boes 2005) – von der Musik-, Karaoke-, und Video-App bis hin zu Videospielen und Navigation – ins Infotainment der Fahrzeuge werden. Durch die Verbindung von Backend-IT-Infrastrukturen mit den Fahrzeugen entsteht die Möglichkeit für OEM und Dritte, eine permanente digital vermittelte Beziehung zu den Endkunden

aufrechtzuerhalten(Boes/Ziegler 2021, 36) und Software-basierte Funktionen über den Produktlebenszyklus der Fahrzeuge eigenständig zu monetarisieren. Sofern zuvor in den Fahrzeugen verbaut, können dann z.B. auch Sitzheizungen oder zusätzliche Motorleistung via Software-update aktiviert werden und mit den Beleuchtungssystemen und der Karosserie kann das Erscheinungsbild des Fahrzeugs personalisiert werden.³⁷ Um all diese Möglichkeiten ausführen zu können, gilt es bei der Fahrzeugkonzeption skalierbare Halbleiter-Hardwareressourcen vorzusehen, die ggf. erst zu einem späteren Zeitpunkt im Lebenszyklus der Fahrzeuge beansprucht werden.

Der Einsatz von Hochleistungs-SoC in den Fahrzeugen ermöglicht zudem die Realisation von Funktionen, für die hohe Speicher- und Rechenkapazitäten benötigt werden. Neben dem Infotainment zählt dazu insbesondere der Bereich des automatisierten (z.B. Abstands-, Spurhalte- und Parkassistenten) und autonomen Fahrens – sei es in

bestimmten abgegrenzten Operational Design Domains (ODD) wie auf Autobahnen, in Pkws und Lkws oder bei sog. Robotaxis, die aktuell in geographisch begrenzten Gebieten von Unternehmen wie Waymo (San Francisco/Phoenix), GM Cruise (San Francisco) oder Baidu (Wuhan, Chongqing, Shenzhen) mittlerweile ohne Sicherheitsfahrer betrieben werden. Im Fahrzeug können durch Einsatz von Hochleistungs-SoC Machine-Learning-Algorithmen betrieben werden, welche nahezu in Echtzeit Sensordaten wie Kamera, Radar, Ultraschall, Lidar sowie Kartendaten verarbeiten und das Fahrzeug steuern. Die Entwicklung und das Training dieser Algorithmen wiederum erfordert einen kontinuierlichen wechselseitigen Transfer von Fahrzeugdaten zwischen Fahrzeug und Cloud-Infrastrukturen, in denen die Machine-Learning-Algorithmen außerhalb der Fahrzeuge weiterentwickelt, mit Simulationsdaten trainiert, revidiert und auf funktionale Sicherheit getestet werden, ehe wieder eine neue Version als Upgrade der

AV-Software auf dem SoC in den Fahrzeugen in Betrieb genommen wird.

Diese Neuausrichtung der Software- und Elektronikarchitektur in den Fahrzeugen und die Anbindung der Fahrzeuge ans Internet transformiert die Rolle von Halbleitern im Fahrzeug weiter. Im Zusammenspiel mit Software steigen sie zu strategischen Bausteinen bei der Konzeption der Fahrzeuge auf. Zugleich verdichten sich die Anzeichen, dass sich im Zuge dessen die Wertschöpfungsstruktur verändert, innerhalb derer sie hergestellt werden und ihren Weg in die Fahrzeuge der OEM finden.

Vom Tier 3 zum Tier 0.5: Die Ambitionen der Hersteller von Hochleistungschips in der Automobilindustrie

Die Bemühungen der OEM und Systemzulieferer zur Neuausrichtung der Software- und Elektronikarchitekturen in den Fahrzeugen haben zur Folge, dass die führenden Chip-Konzerne umfassende Anstrengungen unternehmen, um ihre Aktivitäten in der Automobilindustrie auszuweiten. Aufbauend auf ihre Kernkompetenzen treiben sie die Entwicklung von energieeffizienten Hochleistungschips für die Automobilindustrie voran und suchen sich als Partner für die OEM auf ihrem Weg zum Software-definierten Elektrofahrzeug in Stellung zu bringen. Neben der Leistungselektronik zielen sie dabei insbesondere darauf, die für Infotainment, Fahrassistenz und autonomes Fahren benötigten Chips bereitzustellen. In der Regel beschränken sie sich dabei allerdings nicht darauf, lediglich die Chips zu liefern, sondern offerieren die passenden Softwareentwicklungs- und Laufzeitumgebungen zur Erstellung von Anwendungen für ihre Chips bis hin zu integrierten Lösungen z.B. für Fahrassistenz und weiten damit zugleich ihre Softwareentwicklungsumfänge signifikant aus.

So übernahm der nach Umsätzen weltgrößte Halbleiterkonzern Intel im März 2017 das israelische Unternehmen Mobileye für \$ 15,3 Mrd. Mobileye entwickelt Software für Fahrassistenzsysteme sowie autonome Fahrfunktionen und designt sowohl mit der EyeQ-Reihe die dafür benötigten Chips als auch Sensorik wie die Kameras selbst.³⁸ Nvidia, einer der führenden Chip-Designer der für KI-Anwendungen besonders geeigneten Graphical Process Units (GPUs), stellte im Jahr 2015 auf der Consumer

Electronics Show (CES) in Las Vegas das speziell für Fahrassistenzsysteme und autonomes Fahren entworfene SoC Nvidia DRIVE vor und hat dessen GPU-Architektur seither kontinuierlich weiterentwickelt sowie mit Nvidia HYPERION passfähige Softwarewerkzeuge für die Entwicklung von autonomen Fahrfunktionen entwickelt. Auch der Marktführer beim Design von Chips für Android-Smartphones und drahtlose Kommunikation, Qualcomm, arbeitet seit einigen Jahren intensiv daran, die Automobilindustrie zu einem wichtigen Wachstumsmarkt für sein Geschäft zu machen. Mit Snapdragon RIDE Flex hat Qualcomm auf der CES 2023 das erste SoC sowohl für Infotainment als auch für Fahrassistenz und autonome Fahrfunktionen vorgestellt und beansprucht nicht weniger als das »digitale Chassis« für die Fahrzeuge der Zukunft bereitzustellen. Das Ausstechen des Automobilzulieferers Magna bei der Übernahme der Software-Sparte Arriver des schwedischen Systemzulieferers Veoneer für \$ 4,5 Mrd. unterstreicht zudem, dass Qualcomm ebenfalls Wertschöpfungsumfänge in der Softwareentwicklung für Fahrassistenz und autonome Fahrfunktionen aufbaut und u.a. im Rahmen einer Partnerschaft mit BMW an der Bereitstellung eines integrierten Systems für Fahrassistenz und autonome Fahrfunktionen arbeitet (Bundeskartellamt 2022; BMW 2022b). Samsung wiederum steigert nicht nur seinen Absatz von Memory-Chips und Kameras für die Automobilindustrie, sondern hat im Jahr 2017 auch die Chip-Serie Exynos Auto V für das Infotainment und die Telekommunikation im Fahrzeug aufgelegt, die heute

beispielsweise in Fahrzeugen von Volkswagen und Audi eingesetzt wird. Auch die Aufträge für den Zielmarkt Automobilindustrie beim größten Chipauftragsfertiger der Welt, TSMC, haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Unter anderem wird kolportiert, dass TSMC von Tesla ausgewählt wurde, um die neue Generation des von Tesla selbst designten Chips Hardware 4.0 für automatisiertes Fahren im 4-Nanometer-Prozess zu fertigen (Lambert 2022). Berichten zufolge soll TSMC zur Befriedigung des steigenden Bedarfs der Automobilindustrie auch den Bau seiner ersten europäischen Fertigungsstätte in Dresden sowie einer Fertigungsstätte in Japan in Erwägung ziehen (Li et al. 2022).

Hatte die Automobilindustrie bisher eher den Charakter eines Nischenmarkts für die führenden Unternehmen der Halbleiterindustrie, sehen sie im Kontext der Bemühungen um eine Neuausrichtung der Software- und Elektronikarchitektur jetzt umfassende Wachstumschancen. McKinsey geht davon aus, dass die mit Software und Elektronik in der Automobilindustrie erzielten Umsätze von \$ 238 Mrd. im Jahr 2020 auf \$ 469 Mrd. im Jahr 2030 zulegen werden (Burkacky et al. 2019). Die führenden Unternehmen der Halbleiterindustrie versuchen sich einen Teil dieses Kuchens zu sichern.

In der Zusammenarbeit mit den Unternehmen der Automobilindustrie treten die Halbleiterkonzerne jedoch anders auf als diejenigen Unternehmen, die bisher die Halbleiter und Mikrocontroller für die Automobilindustrie produzierten. Statt ihre Erzeugnisse nahezu ausschließlich

an die Zulieferer der OEM zu verkaufen, wollen sie in direkte Geschäftsbeziehungen zu den OEM treten. Statt ihre Erzeugnisse kurzfristig zu Festpreisen zu liefern, erwarten sie, dass die Unternehmen der Automobilindustrie längerfristige Partnerschaften eingehen, in denen auf Augenhöhe kooperiert wird, Risiken geteilt sowie Beteiligungen an möglichen Erträgen aus der Zusammenarbeit gewährt werden. Berichten der Financial Times und des Handelsblatts zufolge traf etwa Nvidia mit Mercedes die Vereinbarung, an den im Rahmen der Partnerschaft für die Entwicklung von autonomen Fahrfunktionen erzielten Umsätzen zu 50% beteiligt zu werden (Nuttall 2020; Hohensee 2023). Und Qualcomm soll sich von BMW vertraglich zugesichert haben lassen, dass es die Ergebnisse der gemeinsamen Entwicklungspartnerschaft für autonome Fahrfunktionen weiter vermarkten kann (Hubik/Hofer 2022). Damit gerät das etablierte Wertschöpfungsgefüge zwischen Automobilindustrie und Halbleiterindustrie in Bewegung. Irwin (2023a) deutet diese Entwicklungen dahingehend, dass Chip-Hersteller wie Mobileye, Nvidia und Qualcomm anstreben, eine neue Rolle in der Automobilindustrie einzunehmen, und schlägt für sie die Bezeichnung Tier 0.5 vor.

Diese grundlegende Transformation der Rolle von Halbleitern in den Fahrzeugen war bereits im Gange als die Chip-Krise im Zuge der COVID-19-Pandemie ausgelöst wurde. Ihrer Entwicklungsdynamik in der Automobilindustrie und den unmittelbar in den Unternehmen getroffenen Maßnahmen zu ihrer Bewältigung spürt der folgende Abschnitt nach.

4.

Die Chip-Krise in der Automobilindustrie: Entwicklungs dynamik und unmittelbare Maßnahmen

„Also, in der Vielzahl an Themen, die dann kulminieren, ja, Corona, also Corona per se, dass die Work Force nicht da war, dann Lockdowns, dann, dass die Container auch nicht an der richtigen Stelle waren, dann, dass der Markt selber überhaupt nicht aus den Puschen kam, wegen der langen Lead-Zeiten, das, glaube ich, hat noch keiner von uns, auch die, die jetzt bald in Rente gehen, in der Ausprägung gehabt. Es gab immer wieder Krisen, starke Nachfrage im Nutzfahrzeugmarkt oder Qualitätsthemen, hat jeder schon mal gehabt, aber so was ist, glaube ich, ‚unseen‘. Da gab es keine Blaupause. Oder, da lege ich mich sogar fest. Da gab es keine Blaupause.“ Führungskraft Systemzulieferer

Die Automobilindustrie schlitterte durch einen klassischen, aber in seinen Aufschaukelungseffekten außergewöhnlichen »Bullwhip-Effekt« (Lee et al. 1997)³⁹ in die Chip-Krise. In der Vergangenheit war es zwar immer wieder zu Störungen in den Lieferketten für Halbleiter gekommen (Katasaliaki et al. 2022). Diese werden jedoch allesamt von den aktuellen Entwicklungen in den Schatten gestellt. Die Automobilindustrie zählte zu den Branchen, welche von der allgemeinen Mangelsituation an Halbleitern am stärksten getroffen wurden. Wie der zu Beginn des Abschnitts zitierte Gesprächspartner schildert, hatten

selbst Führungskräfte und Beschäftigte mit langjähriger Berufserfahrung in der Branche eine vergleichbare Situation in ihrer Laufbahn noch nie erlebt. In diesem Abschnitt werden im ersten Schritt die Hintergründe, welche zu diesen gewaltigen Dissonanzen in den Lieferketten der Automobilindustrie geführt haben, eingehender beleuchtet. Im zweiten Schritt wird exemplarisch das Spektrum der Maßnahmen dargestellt, die unmittelbar von den Unternehmen der Automobilindustrie ergriffen wurden, um die Auswirkungen des Halbleitermangels auf ihre Verwertungsprozesse zu minimieren.

Ein perfekter Sturm: Die Entwicklungs dynamik der Chip-Krise in der Autoindustrie

Anfang des Jahres 2020 begann sich das COVID-19-Virus rasch um den Erdball zu verbreiten. Um in der Bevölkerung die Infizierung mit dem Virus einzudämmen, führten die Regierungen in vielen Ländern Kontaktbeschränkungen ein und verhängten mehrwöchige Ausgangssperren. Auch die Unternehmen der Automobilindustrie sahen sich während der ersten »Lockdowns« im März 2020 gezwungen, ihre Werke vorübergehend zu schließen (Eckl-Dorna 2020). Angesichts dieser Entwicklungen schlugen die Indizes zur Ermittlung makroökonomischer Risiken aus

und Analystenhäuser, Zentralbanken und Politik antizipierten in ihren Prognosen eine schwere wirtschaftliche Rezession (De Santis/Van der Veken 2020; BMWK 2020). Als die Produktion im April 2020 wieder hochgefahren werden konnte, passten die OEM daher in Erwartung einer schwierigen Wirtschaftslage und sinkender Absatzzahlen ihre Produktionsplanungen präventiv an, um einer Überproduktion von Fahrzeugen vorzukommen. Die neuen Planungsdaten wurden an die Zulieferer weitergegeben, welche auf dieser Grundlage wiederum ihre Produktions-

planungen nachjustierten und zur Kontrolle ihrer Lagerhaltungskosten neben anderen Bauteilen auch viele Bestellungen für Mikrocontroller und Halbleiter bei ihren Lieferanten stornierten.

Zur selben Zeit explodierte mit den Maßnahmen zu Kontaktbeschränkungen in der Pandemie und der großflächigen Anschaffung von Ausrüstung für Remote Work die Nachfrage nach PCs, Laptops, Smartphones und anderen Heimgeräten wie Spielekonsolen oder Fitness-Geräten, in denen eine Vielzahl von Halbleitern verbaut sind. Angesichts dessen rüsteten Chip-Hersteller wie TSMC, Samsung, GlobalFoundries und Texas Instruments die durch die Stornierung der Bestellungen aus der Automobilindustrie frei gewordenen Kapazitäten in ihren Fertigungsstätten zügig um. Als die Nachfrage nach Fahrzeugen nach

Aufhebung der ersten Lockdowns und angeregt durch wirtschaftspolitische Stimuli in vielen Industrieländern (Lechowski et al. 2023) unerwartet schnell wieder angezogen war, standen in der Halbleiterindustrie keine Kapazitäten mehr zur Verfügung, um die Nachfrage der Automobilindustrie nach Halbleitern zu erfüllen. Zusammen mit dem steigenden Halbleiterbedarf durch die Elektrifizierung und die Softwareisierung schaukelten sich diese Entwicklungen wechselseitig auf und erzeugten eine Situation, welche im Supply Chain Management als »supply chain disruption« (Tomlin/Wang 2011) bezeichnet wird. Die kumulative Wirkung dieser Faktoren als Auslöser für die krisenhaften Entwicklungen in der Automobilindustrie wird auch von unseren Gesprächspartnern unterstrichen:

»Die Kapazitäten (...) waren gerade am Anschlag (...) und haben allgemein in Halbleiterbereichen zu einer Verknappung geführt. (...) und dann diese Trends – Covid, Elektrofahrzeuge und Autonomes Fahren –, dann hat man vier Themen, (...) die sich alle kumuliert haben, dann hat man quasi das Szenario (...) von dem perfekten Sturm.« Experte Halbleiterindustrie

Wenngleich die Automobilindustrie besonders hart von diesem »perfekten Sturm« getroffen wurde, waren auch viele andere Branchen nicht davor gefeit. Analysten von Goldman Sachs bezifferten die Zahl der durch Halbleitermangel betroffenen Branchen auf 169 (Howley 2021).

Für die Automobilindustrie wurde die Situation durch eine Reihe von Ereignissen verschärft, welche die Kapazitäten der globalen Chip-Industrie für diesen Zielmarkt zusätzlich beeinträchtigten. So mussten einzelne Fertigungsstandorte der japanischen Hersteller AKM im Oktober 2020 und Renesas im März 2021 aufgrund von Feuerausbrüchen vorübergehend schließen und konnten ihre Produktion danach nur langsam wieder hochfahren.⁴⁰ In Texas führte ein Eissturm zu großflächigen Stromausfällen und schränkte die Produktion in den dort ansässigen Fertigungsstätten von Chip-Herstellern wie Infineon, Samsung und NXP ein (Frieske/Stieler 2022, 3). In Taiwan, einem der Hauptexportländer von Chips weltweit, machte darüber hinaus die anhaltende Dürre im Jahr 2021 nicht nur Ressourcenintensität und Externalitäten der Halbleiterproduktion sichtbar (Zhong /Chang Chien 2021), sondern zwang aufgrund des grassierenden Wassermangels die Hersteller zu einer Reduktion der Produktion. Damit wurden nicht zuletzt auch die Hoffnungen vieler Unternehmen der Automobil-

industrie enttäuscht, die darauf spekuliert hatten, dass die taiwanesische Halbleiterindustrie angesichts der schwierigen Versorgungslage zeitnah ihre Produktion ausweiten und einen Großteil ihres Chip-Bedarfs erbringen könnte (Ruwitch 2021). Auch die erneuten Lockdowns im Juni 2021 in Malaysia, einem wichtigen Standort für das Testen der Chips und die Montage der Gehäuse, wirkten sich negativ auf das weltweite Halbleiteraufkommen aus (Lee 2021). Überlagert wurden diese Entwicklungen von anhaltenden geopolitischen Auseinandersetzungen insbesondere zwischen den USA und China, im Zuge derer die USA ab dem Jahr 2019 dazu übergingen, Sanktionen gegen chinesische Tech-Konzerne und Chip-Hersteller wie Huawei, ZTE und SMIC zu verhängen und diese von Chip-Lieferungen, Fertigungskapazitäten und Produktionsequipment abzuschneiden (Bloomberg 2022; Miller 2022, 311ff).

Viele chinesische Unternehmen begannen daher, die Märkte leerzukaufen und Chips zu horten, da sie befürchteten, künftig ebenfalls von solchen Maßnahmen betroffen zu sein. Und auch der Krieg in der Ukraine, der im Februar 2022 ausbrach, erzeugte weitere Störungen in den Wertschöpfungsketten der Automobilindustrie.

Die Stunde der Taskforces: Maßnahmen gegen die Chip-Krise in der Automobilindustrie

Die Chip-Krise traf sämtliche Automobilhersteller und Zulieferer von Elektronikkomponenten. Unter den OEM variierten dabei das Ausmaß und die Zeitpunkte der Betroffenheit durch den Halbleitermangel. Presseberichten zufolge blieb etwa Toyota anfangs weitgehend vom Halbleitermangel verschont, da es als Lehre aus der Fukushima-Katastrophe aus dem Jahr 2011 die Just-in-Time Strategie bei der Gestaltung seiner Lieferketten für den Halbleitereinsatz um eine »Just-in-Case-Strategie« erweitert und viermonatige Sicherheitsbestände für bestimmte Chips angelegt hatte (Nathan et al. 2021). Als diese Vorräte aufgebraucht waren, traf die Krise allerdings auch Toyota – durch die gewonnene Zeit allerdings etwas weniger stark als manch anderen Hersteller (Davis 2022). Mit Blick auf die Hersteller mit den größten Absatzzahlen berichtete die Fachpresse unter Berufung auf Zahlen des Analystenhauses LMC Automotive, dass z.B. Ford im Jahr 2021 schätzungsweise 1,25 Mio. weniger Fahrzeuge verkaufen konnte, als aufgrund der Nachfrage möglich gewesen wäre. Volkswagen sei mit seiner Produktion um 1,15 Mio. Fahrzeuge hinter den Planungszahlen zurückgeblieben. GM und Toyota wiederum hätten ihre Planungszahlen um jeweils 1,1 Mio. verpasst und Stellantis um 1 Mio. Einheiten (Knauer 2022). Bei den Systemzulieferern wurden die Auswirkungen nach außen weniger in einem Rückgang der Absatzzahlen sichtbar. Stattdessen gaben sie Gewinnwarnungen heraus, kürzten Dividenden und korrigierten Umsetzziele nach unten.

Die Schockwellen, die in den Wertschöpfungsketten ausgelöst wurden, erfassten allerdings auch diejenigen Automobilzulieferer, deren Erzeugnisse keine Halbleiter enthalten. So meldeten in Deutschland beispielsweise Mittelständler wie der Kunststoffspezialist Heinze aus Herford (Gelowicz 2021), die Bolta-Werke aus Diepersdorf (Schindhelm 2021) oder die PWK-Gruppe (Ringel 2021), ein Spezialteilefertiger aus Krefeld, Insolvenz an. Laut Angaben der Unternehmen hatten die Produktionsunterbrechungen bei OEM und Systemzulieferern infolge des Halbleitermangels bei diesen Tier-2-Lieferanten einen abrupten Auftragsrückgang verursacht, den sie nicht mehr ausgleichen konnten. Um ausreichend Erträge zu erzielen, sind insbesondere Tier-2-Lieferanten, die sog. Commodity-Teile herstellen, auf hohe Stückzahlen angewiesen, um in der Produktion die erforderlichen Skaleneffekte erzielen zu können.

Die Varianz in Ausmaß und Zeitpunkt der Betroffenheit resultiert ferner daraus, dass die Unternehmen der Automobilindustrie über unterschiedliche Möglichkeiten verfü-

gen, um kurzfristig auf die Folgen der Chip-Krise zu reagieren. Einer der wichtigsten Parameter liegt dabei nur eingeschränkt in ihrer Hand: Je nachdem, auf welcher Stufe der Wertschöpfungspyramide sich die Unternehmen befinden, verfügen sie über verschiedene Handlungsspielräume. Während OEM auf das breiteste Maßnahmenspektrum zurückgreifen können, ist die Handlungsautonomie bei Systemzulieferern bereits stärker eingeschränkt, da sie ihre laufenden Verträge erfüllen und bei ihren Maßnahmen immer zuerst die Abhängigkeiten gegenüber den OEM berücksichtigen müssen (siehe dazu grundlegend die Beiträge in: Deiß/Döhl 1992). Tier-X-Zulieferer wiederum verfügen über die geringsten Handlungsspielräume und stehen unter einem besonderen Druck, da sie bei ihren Margen nur über eine sehr geringe Manövriermasse verfügen und keine kapitalintensiven Flexibilitätsspielräume auf Verdacht vorhalten können, sondern für ihr Geschäft immer zeitnah auf relevante Informationen angewiesen sind. Entsprechend fallen die Maßnahmen zur Bewältigung der Chip-Krise bei OEM, Systemzulieferern und Tier-2 teilweise deutlich unterschiedlich aus.

Bei den OEM zentrierte sich das Spektrum der getroffenen Maßnahmen um zwei Pole. Einerseits konzentrierten sich die Maßnahmen darauf, kurzfristig zusätzliche Chips zu beschaffen, unter der Maßgabe »Autos bauen, koste es, was es wolle«, wie einer unserer Gesprächspartner formulierte. Andererseits wurden auf unterschiedliche Art und Weise Anpassungen in der Produktion vorgenommen mit dem Ziel, auf Grundlage der vorhandenen Chips die größtmöglichen Erträge mit den noch zu produzierenden Fahrzeugen zu realisieren.

Das erste Maßnahmenspektrum wurde umgehend aktiviert, als sich in der zweiten Hälfte des Jahres 2020 die mangelnde Versorgung mit Halbleitern bemerkbar machte. In den Beschaffungsabteilungen der OEM wurden Taskforces zur Bewältigung der Chip-Krise gebildet. Einer unserer Gesprächspartner umreißt dies folgendermaßen:

»Im Herbst 2020 haben wir die Task Force gegründet und komplett in die Organisation gebracht, auch beim Vorstand und so weiter. Das war die erste Maßnahme. Transparenz erarbeiten, mit den Lieferanten die Matching-Teams aufzusetzen und bestmöglich die durchzumanagen.« Führungskraft OEM

In der Regel wurden diese Taskforces cross-funktional zusammengesetzt. Neben Vertreter/-innen aus dem Einkauf wurden auch Expert/-innen aus Produktion und Entwicklung nominiert. Zum einen erhielten die Taskforces den Auftrag, konzernweit Transparenz über die Verfügbarkeit und den exakten Bedarf an Halbleitern (Typen, Mengen) herzustellen. Viele OEM befanden sich in der Situation, dass sie aufgrund der in Abschnitt 2.2 skizzierten Arbeitsteilung bei der Chip-Beschaffung über keinen exakten Überblick darüber verfügten, welche Halbleiter in den Steuergeräten ihrer Fahrzeuge verbaut waren und woher diese stammten. Die Taskforces der OEM standen daher in

vielen Fällen vor der Herausforderung, ein entsprechendes Informationssystem erst zu erarbeiten. Dabei ging es zunächst vor allem darum, entlang der Lieferkette einerseits sämtliche in die Produktion der verwendeten Halbleiter involvierten Akteure zu identifizieren sowie deren Kapazitäten zu ermitteln und andererseits innerhalb der eigenen Unternehmen den Umfang und die Spezifikation der benötigten Chips für die einzelnen Baureihen und Modellvarianten der Fahrzeuge zu erfassen. Diese Informationssysteme bildeten die Grundlage für die Suche nach zusätzlichen Chips, die in Zusammenarbeit mit den Zulieferern vorangetrieben wurde:

»Vom OEM gibt es jetzt eigene Abteilungen, die sich rein mit den Halbleitern beschäftigen (...). Dort versucht eben der OEM bis auf Vorstandsebene Two Party Calls, Three Party Calls, je nachdem, wen man alles mit ins Boot holen will, dort es auf Arbeitsebene zu lösen und Lösungen zu finden, wöchentliche, monatliche Abstimmungen und für den Tier-2 diese Paten, die dann eben auch eine direktere Verbindung haben.« Branchenexperte

Die Organisation umfasst zeitlich enge Abstimmungen der OEM mit Zulieferern unterschiedlicher Wertschöpfungsstufen sowie eine Intensivierung der Zusammenarbeit. Zum Teil wurden, wie ein Gesprächspartner schildert, die

OEM allerdings auch direkt bei den Herstellern von Halbleitern vorstellig, um freiwerdende Fertigungskapazitäten zu reservieren:

»Der Tier-1 liefert nicht mehr, dann wird das Thema natürlich eskaliert bis in die Vorstandsebenen und irgendwann sagt der Vorstand, das kann doch nicht sein, kann ich mir nicht vorstellen, wir werden mit dem Tier-1 reden. Der Tier-1 sagt, naja, Halbleiterhersteller X kann nicht liefern, und da sagt der Vorstand, lasse ich mir nicht gefallen, ich rufe dort an, frage, warum könnt ihr nicht liefern? Dann sagt Halbleiterhersteller X, naja, keine Ahnung, Halbleiterhersteller Y kann eine Komponente nicht zuliefern. Dann sagt er, okay, nimmt das Telefon in die Hand, ruft da an.« Führungskraft OEM

Das zweite Maßnahmenspektrum in den OEM konzentrierte sich auf die Anpassung der Produktion. Der Aufbau der Informationssysteme schuf, wie ein Gesprächspartner her-

vorhebt, dabei zugleich die Voraussetzungen dafür, eine Re-Allokation der Chips für die Produktion besser umsetzen zu können:

»Und da bildet diese Datenbank die Grundlage für diese Kapazitäten, Liefermengen und Bedarfe. D.h. wie sind die Bedarfe, nach den jeweiligen momentanen Läufen, wie viel Autos man bauen will, gegenübergestellt zu den Kapazitäten der Lieferanten, was sie uns in Aussicht stellen. Das ist die Grundlage: Wir haben hier und hier so und so viel Unterdeckung, somit werden dann auch die Prioritäten festgelegt, (...) bevorzugen wir teure Autos, Elektroautos, bestimmte Plattformen, und dann wird sowohl die Zuteilung gemacht als auch geschaut, wo muss man tiefer reinsteigen, wo muss man auch nach technischen Alternativen schauen, wie kommt man da voran.«

Projektmanager OEM

Zu den Maßnahmen bei der Anpassung der Produktion zählen erstens die Produktion auf Vorrat (»auf Halde produzieren«) und die Verzögerung der Auslieferung von Fahrzeugen. Im Bestreben, die Produktion möglichst lange weiter am Laufen zu halten, gingen einige OEM dazu über, Fahrzeuge trotz einzelner fehlender Komponenten herzustellen. Die Fahrzeuge wurden dann zunächst auf Parkplätzen zwischengelagert mit dem Ziel, sie nachzurüsten, sobald die fehlenden Chips verfügbar waren. Kunden wurden z.T. mit Gegenleistungen wie Preisnachlässen gebeten, sich auf längere Wartezeiten einzustellen. Laut Presseberichten spielte diese Maßnahme zum Beispiel in den Bewältigungsstrategien von Nutzfahrzeugherstellern wie der VW-Tochter Traton oder bei Daimler Trucks eine wichtige Rolle (dpa 2021).

Zweitens wurden Fahrzeuge ohne bestimmte nicht-sicherheitskritische Ausstattungsvarianten ausgeliefert. Über Mercedes etwa wurde berichtet, dass dort die Entscheidung getroffen wurde, bei der S-Klasse einzelne Sonderausstattungsoptionen zu streichen. Eine Zeitlang wurden Fahrzeuge ohne die neueste Navigationssoftware ausgeliefert, welche Informationen zu Routen auf die Frontscheibe projiziert, da die entsprechenden Chips nicht verfügbar waren (Köster 2021). Beim Porsche S.U.V. Macan wurde in den USA ein Sitzsystem mit 18 verstellbaren Einstellmöglichkeiten als Ausstattungsoption gestrichen

(Blanco 2021). BMW lieferte Fahrzeuge mit Infotainment-systemen ohne Touchscreen-Funktionalität aus (ebd.). General Motors verzichtete bei einigen Modellreihen im Truck- und SUV-Segment darauf, die Motoren mit einer automatischen Start/Stopp-Funktion auszurüsten (Hall 2021). Manche Hersteller gaben statt mehrerer Fahrzeugschlüssel nur mehr einen Schlüssel an Kunden aus oder ersetzten wie Toyota elektronische wieder durch mechanische Schlüssel (Kim 2022). Auch bei Peugeot wurde wieder auf analoge Technik zurückgegriffen und digitale Geschwindigkeitsanzeigen bei den 308er Modellen wurden zeitweise wieder durch eine analoge Variante ersetzt (Ewing/Boudette 2021).

Drittens allokierten OEM die noch vorhandenen Chip-Kapazitäten auf die Produktion höherpreisiger Premiummodelle, um durch deren Fertigstellung und Absatz höhere Margen zu erzielen. So wurde beispielsweise berichtet, dass im VW-Konzern die Fertigstellung von Modellen der Marken Porsche und Audi priorisiert wurde (Buchenau 2022). Bei Mercedes wurde im Sindelfinger Werk die Produktion der E-Klasse vorübergehend ausgesetzt, um die verfügbaren Chips für die Produktion der Baureihen S-Klasse, EQS und Maybach einsetzen zu können (Baumann 2021). Wie unsere Gesprächspartner schildern, wurden von OEM dabei teilweise auch verfügbare Chips innerhalb der Zuliefererstruktur re-allokiert:

»Für die Steuerung brauche ich fünf Chips, vier habe ich, das eine kommt nicht, aber ich weiß, bei dem anderen Steuergerät brauche ich auch die Chips, dann nehme ich doch die Chips von dem Lieferanten und fahre sie zu dem anderen, damit wenigstens der weiter bauen kann.« Projektmanager OEM

Diese Maßnahmen hatten zur Folge, dass insbesondere Premiumhersteller ihre Gewinnmargen im Jahr 2021 auf Rekordniveau steigern konnten, obwohl sich insgesamt die Absatzzahlen verringerten und viele Beschäftigte in Kurzarbeit gehen mussten (Bay 2021). Zu diesem Ergebnis trug zudem bei, dass aufgrund der hohen Nachfrage nach Fahrzeugen im Handel und des knapperen Angebots im Vertrieb vielfach auf die Gewährung von Rabatten verzichtet werden konnte.

Als letztes Mittel der Wahl wurde viertens die Produktion gedrosselt. Die Maßnahmen reichten von der Streichung einzelner Schichten über die vorübergehende Stilllegung der Linien für einzelne Baureihen bis hin zur Schließung von ganzen Werken. In Deutschland stoppte laut Presseangaben etwa Audi bei seinen Werken in Ingolstadt und Neckarsulm vorübergehend die Produktion der A4- und A5-Modelle, während Ford das Werk in Saarlouis und

Opel das Werk in Eisenach für mehrere Monate komplett schlossen (siehe dazu auch den Überblick bei Frieske et al. (2022, 80)).

In vielen OEM überlagerten sich diese Maßnahmen. Die Taskforces konferieren z.T. noch heute regelmäßig, um die Versorgungssituation zu analysieren und die Produktion entsprechend den verfügbaren Chips kurzfristig zu planen.

Über Produktionsanpassungen hinaus erschlossen sich einige OEM mit der Zeit zudem erweiterte Handlungsmöglichkeiten, indem es ihnen gelang, für nicht vorhandene Chips verfügbare Alternativen zu verwenden und die Software entsprechend anzupassen. Ein Gesprächspartner beschreibt diese Maßnahme und die damit einhergehenden Herausforderungen folgendermaßen:

»Halbleiterhersteller X hat den Chip nicht, dann gehen wir zu Halbleiterhersteller Y, gucken mal, ob die einen ähnlichen Chip haben. Sind sie im ähnlichen Temperaturbereich, sind sie im ähnlichen Leistungsbereich, sind sie in ähnlicher PIN-Kompatibilität, sind sie Automobil-zugelassen oder brauche ich da eine neue Homologisierung [Zulassungserteilung durch eine Prüfinstanz, d.Verf.], das sind genau die Fragen, die dann kommen. Und umso näher der Chip ist zu dem, den ich eigentlich benutzt habe, umso leichter wird dann auch eine Anpassung. Geht aber auch so weit, dass ich sage, okay, ich nehme eine Industrieware, die ist relativ ähnlich, muss sie aber noch Automobil-zulassen, gehe dann auch mit Risikofreigaben rein, sage, ich baue die Dinger erst mal, baue sie auch schon ins Auto ein, stelle die Autos mehr oder weniger auch schon auf den Zug drauf und dann kommt erst die Freigabe, okay, es funktioniert, oder sie kommt eben nicht, das Risiko wird dann eben getroffen und dann wird gesagt, lieber baue ich und lasse die Bänder nicht still stehen und mache die Freigabe (ohne Risiko) später, im schlimmsten Fall muss ich eventuell den Chip wieder rausreißen und einen neuen reinbauen.« Projektmanager OEM

Gegenüber seinen Aktionären erläuterte zum Beispiel Tesla, dass es die Auswirkungen der Chip-Krise abmildern konnte, weil es bei einer Reihe von Mikrocontrollern, die nicht geliefert werden konnten, auf alternative verfügbare Mikrocontroller umgestiegen war (Tesla 2021). Innerhalb weniger Wochen soll die Entwicklungsorganisation bei Tesla die entsprechende Software für 19 neue Chip-Varianten angepasst und validiert haben. Neben der Tatsache, dass Tesla durch seine zonale Software- und Elektronikarchitektur insgesamt auf eine kleinere Stückzahl an Halbleitern mit geringerer Variantenvielfalt angewiesen ist, trugen diese erweiterten Handlungsspielräume aufgrund der hohen Wertschöpfungstiefe in der Softwareentwicklung dazu bei, dass das Unternehmen die Produktion seiner Fahrzeuge im Jahr 2021 trotz der Chip-Krise verdoppeln konnte (Ewing 2022). Aber auch BMW gelang es laut Presseberichten, bei der Entwicklung von Maßnahmen zur Bewältigung der Chip-Krise von seiner Softwarekompetenz zu profitieren. So konnte BMW auf einen neuen verfügbaren Terminal-Chip für die Verknüpfung mit W-LAN und die Schnittstelle zwischen Android-Auto- und CarPlay-Funktionalität wechseln. Anfangs war die Software für den Chip des neuen Lieferanten allerdings noch nicht zertifiziert.

Das Unternehmen ging das Risiko ein und verbaute den Chip zunächst ohne die Software, während die Entwicklungsorganisation die Anpassung und Zertifizierung der Software betrieb. Sobald die Zertifizierung der Software erfolgt war, konnte sie durch ein Over-the-Air-Update aufgespielt und die Funktionalität auch nach bereits erfolgter Auslieferung der Fahrzeuge freigeschaltet werden (La Rocco 2022).

Die Handlungs- und Flexibilitätsspielräume der Systemzulieferer blieben im Vergleich zu den OEM limitiert. Dies liegt insbesondere daran, dass sie einseitig keine Anpassungen in der Produktion vornehmen können. Kommt es bei ihnen zu Lieferausfällen, können die Tier-1 vielmehr unmittelbar für den Stillstand der Produktion bei den OEM verantwortlich gemacht werden. Da die Tier-1 gegenüber den OEM eine kontinuierliche Lieferfähigkeit vertraglich zusichern müssen, können direkte Strafzahlungen fällig werden, wenn sie die versprochenen Komponenten nicht liefern. Die Aufrechterhaltung der Lieferungen avancierte folglich zur obersten Handlungsmaxime bei den Systemzulieferern, wie ein Gesprächspartner bemerkte:

»Wenn wir keine Halbleiter kriegen, (...), wenn wir den OEM stilllegen, (...) das ist Panik hoch zehn, weil wir richtig viel Geld bezahlen und wir haben im letzten Jahr mehr als eine Kerze angezündet, dass bitte, bitte die anderen den OEM stilllegen, weil es geht ja dann schlicht um richtig viel Geld.« Betriebsrat Systemzulieferer

Die OEM wiederum müssen häufig vertraglich dafür auftreten, wenn sie vereinbarte Mengen nicht abnehmen können. Auch bei den Systemzulieferern wurden daher umgehend Taskforces eingerichtet und beim Vorstand verankert. Die Taskforces nahmen sich der Aufgabe an, Lieferungen von Elektronikkomponenten soweit möglich

aufrechtzuerhalten. Dafür begannen sie, die verwendeten Halbleiter minutiös zu tracken und holten, wie ein Gesprächspartner berichtet, mehrmals wöchentlich Lieferantenupdates für mehrere hundert Teile ein:

»Wir hatten zu Hochphasen der Krise ein breites Potpourri an Teilen, die eng waren. Da war im Prinzip alles eng, von dem druckspezifischen Mikrocontroller bis zu einem Standard-Widerstand. Auch die waren teilweise eng und wir mussten dann dementsprechende Task-Force-Aktivitäten drauf verwenden. Und aktuell ist die Situation so, dass es auf einige wenige Teilefamilien sich mehr und mehr einschränkt, die chronisch knapp sind und auch chronisch knapp bleiben werden.« Führungskraft Systemzulieferer

Ziel war es, über dieses »Micro-Management« der Lieferanten möglichst frühzeitig knappe Teile zu identifizieren. Sobald sich abzeichnete, dass ein Teil knapp werden würde, wurde dieses »in Allokation gegeben« und die noch verfügbaren Teile nach einem auditierten Verteilungsschlüssel auf die Produkte für die unterschiedlichen Kunden aufgeteilt. Parallel dazu versuchten auch die Systemzulieferer, alternative Halbleiterquellen zu erschließen und die Engpässe zu beseitigen.

Einen Sonderfall unter den Systemzulieferern bildete die Robert Bosch GmbH, die in der Vergangenheit bereits eine eigene Sparte zur Halbleiterherstellung aufgebaut hatte. Während Bosch als einer der weltweit führenden Systemzulieferer von Automobilelektronik einerseits stark vom Halbleitermangel getroffen und für damit einhergehende Lieferverzögerungen neben Renesas bekanntermaßen von Elon Musk auf Twitter gescholten wurde (Lambert 2021), kündigte die Chip-Sparte des Konzerns nun andererseits hohe Investitionen in den Ausbau ihrer Entwicklungs-, Fertigungs- und Testkapazitäten an. Im Juni 2021 wurde

in Dresden eine neue Fertigungsstätte für 300-Millimeter-Wafer eröffnet, für deren Bau der in Stiftungsbesitz befindliche Konzern mit € 1 Mrd. die größte Einzelinvestition seiner Geschichte getätigt hatte. Bis zum Jahr 2026 will Bosch laut Unternehmensangaben weitere € 3 Mrd. in die Entwicklung seines Geschäfts mit Halbleitern investieren, welches neben der Automobilindustrie auch andere Zielmärkte adressiert (Robert Bosch GmbH 2022).

In kurzfristiger Perspektive avancierten somit das Krisenmanagement der Lieferketten für Halbleiter und die Re-Allokation der Produktion zu Schlüsselkompetenzen bei der Bewältigung der Chip-Krise und der Minimierung ihrer Schäden. In vielen Unternehmen bildete die Krise allerdings komplementär den Ausgangspunkt dafür, die Weichen ihrer Halbleiterstrategien mittel- und langfristig grundlegend neu zu stellen sowie bereits zuvor angestößene Veränderungen nun mit Hochdruck weiter voranzutreiben. Die zentralen Gestaltungsfelder auf diesem Weg werden im folgenden Abschnitt dargestellt.

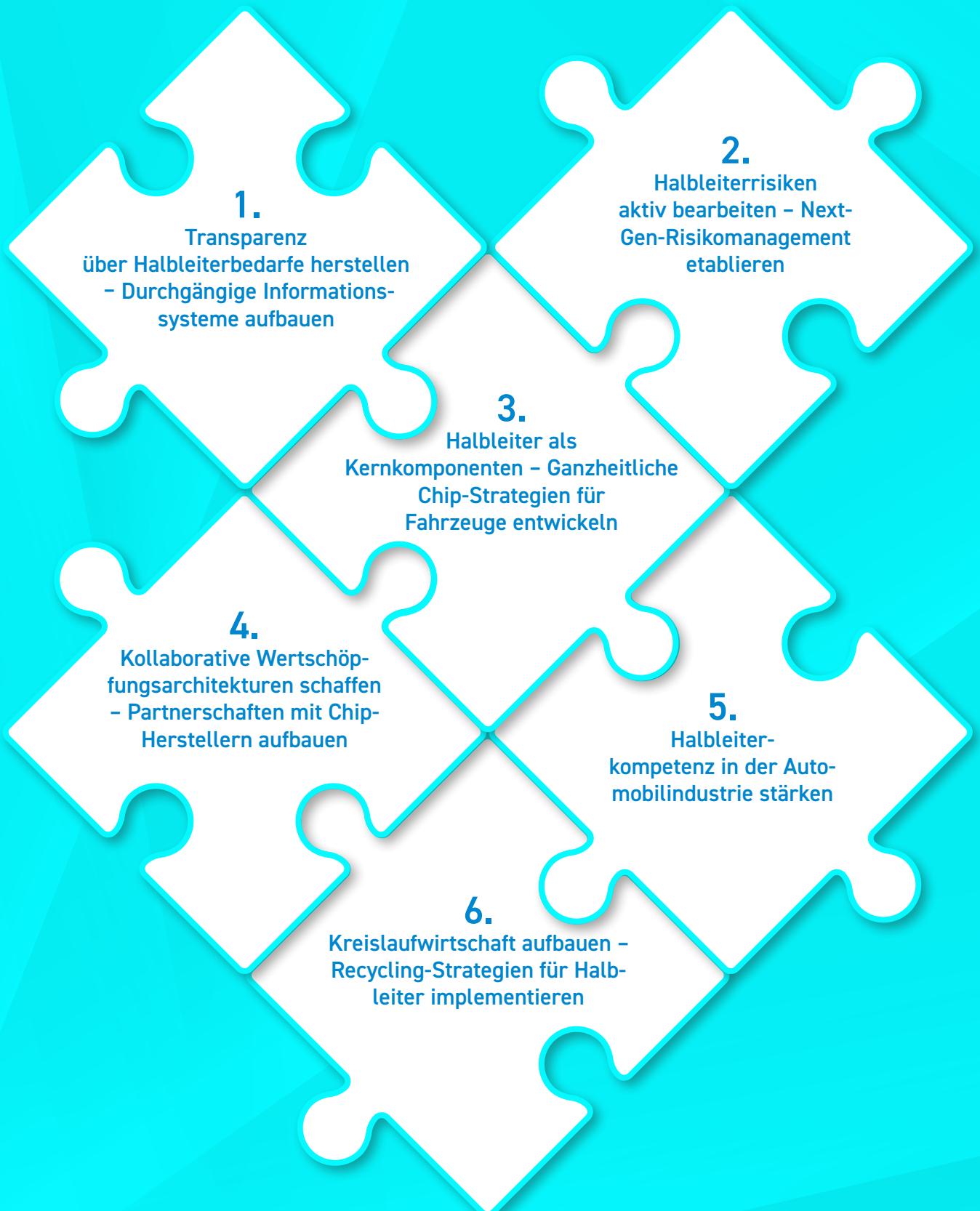


5.

Lessons Learned: Sechs Gestaltungsfelder für die Unternehmen der Automobilindustrie

Die bisherige Analyse hat gezeigt, dass die Chip-Krise zwar durch sich aufschaukelnde Dissonanzen in der Wertschöpfungskette ausgelöst wurde. In ihrer Bedeutung darf sie aber nicht darauf reduziert werden. Entsprechend greifen Maßnahmen zu kurz, welche allein darauf orientieren, die Schäden zu minimieren und die gegenwärtigen Schwankungen wieder auszugleichen. Mittel- und langfristig ist darüber hinaus vielmehr eine ganzheitliche Neufassung der Strategien für den Umgang mit Halbleitern in den Unternehmen der Automobilindustrie erforderlich, die sowohl eine umfassende Weiterentwicklung des Supply Chain Management für Halbleiter und der Zusammenarbeit mit der Halbleiterindustrie als auch eine Neukonzeption des Halbleitereinsatzes und seine Integration in die Elektrifizierungs- und Softwarestrategien der Unternehmen vorsieht. Dafür, wie eine solche Neufassung der Halbleiterstrategien und deren Umsetzung gelingen kann, existieren keine Patentrezepte oder Blaupausen, die lediglich ausgerollt werden müssten. Vielmehr gilt es für die Unternehmen der Automobilindustrie, sich ausgehend von ihren je besonderen Ausgangsbedingungen und Handlungskontexten einen passenden Weg im Einklang mit der Gestaltung ihrer Geschäftsmodelle und Arbeitsprozesse zu erarbeiten. Auf Basis unserer explorativen Analyse konnten wir sechs Gestaltungsfelder identifizieren, welche in den Unternehmen der Automobilindustrie vorrangig zu bearbeiten sind.

Übersicht über die Gestaltungsfelder für die Unternehmen der Automobilindustrie



Gestaltungsfeld 1:

TRANSPARENZ ÜBER HALBLEITERBEDARFE HERSTELLEN – DURCHGÄNGIGE INFORMATIONSSYSTEME AUFBAUEN

»Eine große Lessons Learned, ich glaube der gesamten Industrie, (...) viele von uns haben gedacht, man bestellt einen Mikrocontroller und dann bekommt man ihn auch (...). Aber sich bewusst damit auseinandersetzen mit der Wertschöpfungskette, die wir haben, über die Wafer-Produktion, die Front Ends bis zu den Back Ends und ich sage mal nachgelagertem Shipment, wo die Teile teilweise mehrfach um den Globus reisen, um dann Finished Goods zu sein, dass wir Lead Times haben, die im Normalfall schon von 20 Wochen und aktuell von 50 Wochen bis sogar fast zwei Jahren sprechen, das sind Veränderungen, die so keiner auf dem Schirm hatte, und die werden auch nicht per se weggehen, weil wir einfach den Elektronik-Content vom Fahrzeug deutlich erhöhen.« Führungskraft Systemzulieferer

In vielen Unternehmen der Automobilindustrie bestand bisher keine vollständige Transparenz darüber, welche Halbleiter in den Fahrzeugen verbaut werden, welche Unternehmen sie herstellen und wie sie ins Endprodukt gelangen.

Ein zentrales Gestaltungsfeld besteht daher darin, die in vielen Taskforces begonnenen Arbeiten zum Aufbau durchgängiger, einfach zu bedienender Informationssysteme über den gesamten Wertschöpfungsprozess fortzuführen und in den Organisationen auf Dauer zu stellen.

Wichtige zu erfassende Parameter bilden die benötigten Mengen und die technischen Spezifikationen der Halbleiter. Wenngleich die Taskforces in diesem Gestaltungsfeld während der Krise viele Fortschritte erzielen konnten, bleiben weiterhin große Herausforderungen bestehen.

In vielen Unternehmen sind zum Beispiel die IT-Landschaften noch nicht durchgängig gestaltet, sodass unter anderem immer wieder manueller Aufwand bei der Übertragung von Halbleiterdaten zwischen verschiedenen Tools oder den Informationssystemen der verschiedenen Geschäftsbereiche entsteht. Im unternehmensübergreifenden Kontext stellen sich darüber hinaus zum einen datenschutzrechtliche Fragen:

»Weil das natürlich hoch sensible Daten sind. Du hast auch da immer das Problem mit Datenschutz. Das heißt, die Daten, die du da verarbeitest, kriegst du vom Tier-1, das sind natürlich Daten über den Tier-2, die Daten gehören dir nicht, die gehören immer noch dem Tier-1, du hast sie aber in deiner Datenbank. Das ist eben auch ein sehr großes Datenschutzproblem, welche Daten, wie darf ich sie verarbeiten, wer darf Zugriff darauf haben, wie darf ich sie rausspielen. Das sind große Datenschutzfragen, wo der Tier-1 auch zustimmen muss, ja, ihr dürft das speichern, aber ihr dürft es nur so und so verwenden.« Führungskraft OEM

Zum anderen ist aber auch noch nicht gelöst, wie dauerhaft die Kosten für die Bereitstellung,

Pflege und Aktualisierung dieser Informationssysteme aufgebracht werden können:

»Die Befüllung der Datenbank ist natürlich auch ein Problem. Wir sind momentan bei 60 Prozent, was gefüllt ist; wird sich natürlich mancher auch weigern. (...) Viele wollen einfach nicht ihre Daten da einpflegen (...) Daten einpflegen ist Aufwand. Wer zahlt mir das?« Führungskraft OEM

Angesichts des hohen Ressourcenaufwands zur Erstellung und Pflege dieser Informationssysteme erscheinen Silo-Lösungen einzelner Unternehmen wenig zielführend. Von einem übergeordneten Standpunkt aus betrachtet, erscheint es deutlich vielversprechender, einen Rahmen für den Aufbau eines gemeinsamen Informationssystems zu schaffen, in dem der unternehmensübergreifende Austausch von Halbleiterinformationen erleichtert und die Zusammenarbeit zwischen den Unternehmen der Automobilindustrie entlang der Wertschöpfungskette intensiviert werden kann.

Wichtige Anknüpfungspunkte dafür böten die im HyValue-Projekt gewonnenen Erkenntnisse rund um den Aufbau einer unternehmensübergreifenden Kollaborationsplattform (Heidling/Ziegler 2022), die Entwicklung gemeinschaftlicher Betreibermodelle für Plattformen (Porschen-Hueck/Rachlitz 2022) und das Automotive-Netzwerk Catena-X, in dem die Digitalisierung der Lieferketten vorangetrieben wird und Technologien für den souveränen Datenaustausch entwickelt werden.

Gestaltungsfeld 2:

HALBLEITERRISEN AKTIV BEARBEITEN – NEXTGEN-RISIKOMANAGEMENT FÜR DISRUPTIONEN IN LIEFERKETTEN ETABLIEREN

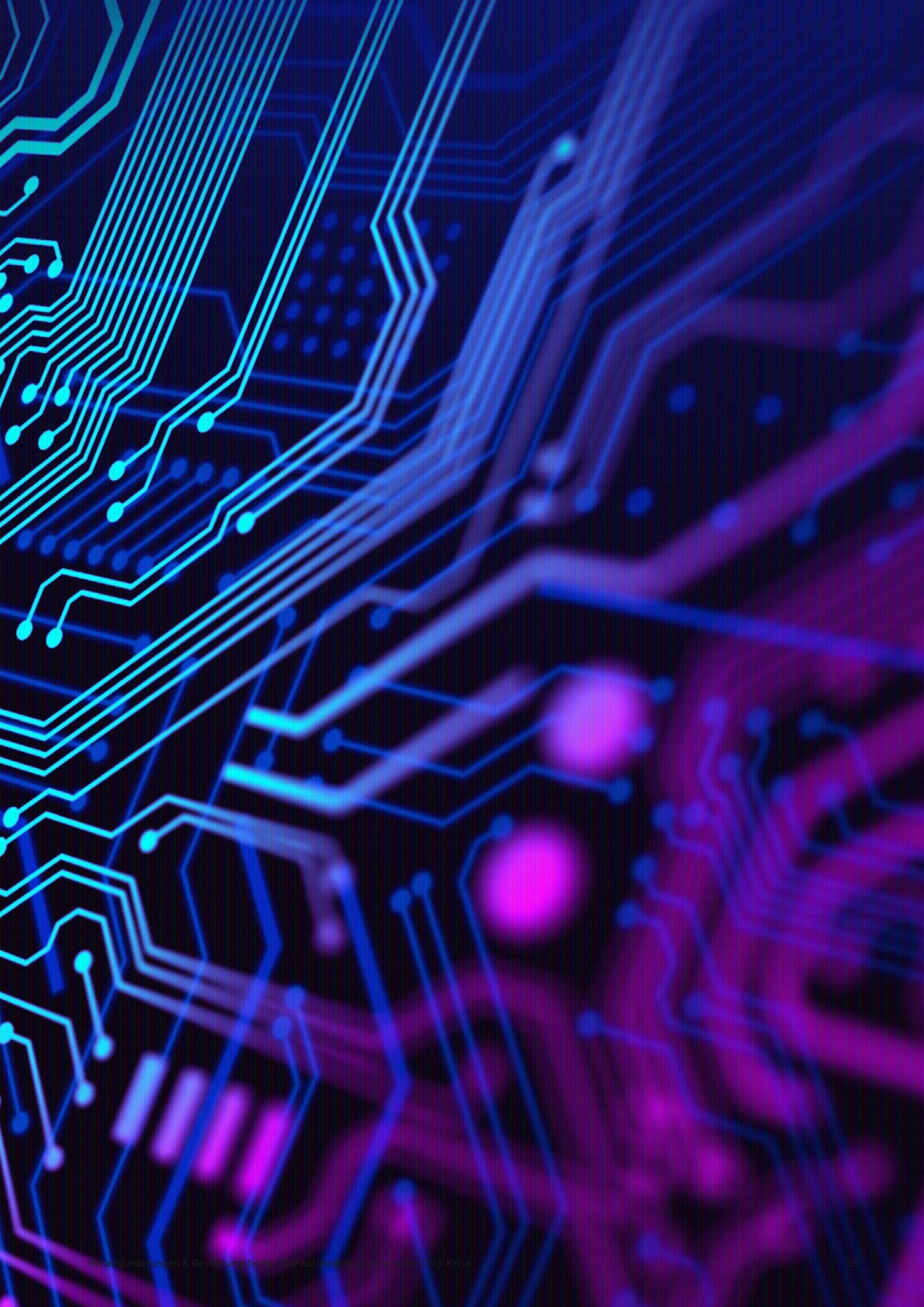
Mit zunehmenden geopolitischen Spannungen, Extremwetterlagen und der anhaltenden Ausdifferenzierung und Dynamisierung des Wettbewerbs steigt die Wahrscheinlichkeit disruptiver Ereignisse wie der Chip-Krise in den globalisierten Wertschöpfungsprozessen der Automobilindustrie (Kiebler et al. 2020, 5). Aufbauend auf die Etablierung durchgängiger Informationssysteme für den Halbleitereinsatz gilt es daher, ein umfassendes Risikomanagement der nächsten Generation zu entwickeln – ein datengetriebenes Risikomanagement (Porsche Consulting 2022, 12). Dabei geht es einerseits darum, reaktiv disruptive Ereignisse und deren potenzielle Auswirkungen unmittelbar zu erkennen, indem z.B. Durchlaufzeiten bei den Halbleiterherstellern kontinuierlich beobachtet werden, sodass etwaige Störungen zielgerichtet kommuniziert werden können. Dies schafft eine wichtige Grundlage dafür, mög-

lichst zeitnah Gegenmaßnahmen einzuleiten und Schäden minimieren zu können. Andererseits geht es darum, Maßnahmen zu entwickeln, um Risiken präventiv zu minimieren. Das Spektrum solcher Präventionsmaßnahmen kann vom Aufbau dauerhafter Kommunikationskanäle entlang der Lieferkette über die Erschließung alternativer Lieferanten, die Identifikation und Vorratshaltung einzelner strategischer Halbleiterkomponenten und die Reduktion der Varianz der verwendeten Halbleiter bis hin zur Bildung cross-funktionaler Teams reichen, um die Flexibilitätsspielräume im Management von Lieferketten und ihre Anpassungsfähigkeit zu erhöhen. Einer unserer Gesprächspartner schildert etwa, dass in seinem Unternehmen für den Bereich der Elektronik die Funktionen Einkauf, Logistik und Qualität zusammengefasst wurden, um die Grundlage für ein ganzheitliches und proaktives Lieferantenmanagement zu legen:

»Die Elektronik [wird] auch nachhaltig eine Sonderrolle behalten. Deswegen haben wir ja auch bei uns z.B. Logistik und Qualität mit in den Einkauf reingezogen, weil wir gesagt haben, das muss aus einer Hand aus unternehmerischer Sicht bearbeitet werden. Das ist bei uns nicht der Standard (...) diese Integration einer eigenen Supply-Chain-Abteilung in eine Commodity haben wir nur in der Elektronik und auch das Integrieren einer Lieferantenqualitätsabteilung in die Elektronik haben wir nur hier.« Führungskraft Systemzulieferer

Darüber hinaus gilt es, auch Kommunikationskanäle zu Tier-2-Lieferanten zu etablieren, welche in ihren Erzeugnissen selbst keine Halbleiter einsetzen. Bei Störungen in den Lieferketten von Chips können diese KMU frühzeitiger in

die Kommunikation einbezogen werden und ihrerseits entsprechende Maßnahmen für ihre Unternehmen treffen, sodass die Resilienz im Wertschöpfungssystem Automotive insgesamt verbessert werden kann.



Gestaltungsfeld 3:

HALBLEITER ALS KERNKOMPONENTEN – GANZHEITLICHE CHIP-STRATEGIEN FÜR FAHRZEUGE ENTWICKELN

»Kaum einer der OEM hat das Auto von der Elektronik her durchdacht. Das heißt, wir haben immer noch wahnsinnig unterschiedliche Module, Plattformen, also einfach das Elektroniklayout ist nicht standardisiert. (...) da hat erst mal keiner was falsch gemacht, sondern so hat halt die Automobilindustrie getickt (...) da hat es Tesla leichter gehabt, weil er halt von der Elektronik das Fahrzeug durchdacht hat, insofern war seine Komplexität zu managen besser.« Branchenexperte

Halbleiter sind zu Kernelementen Software-definierter Elektrofahrzeuge aufgestiegen. Sie übernehmen Schlüsselrollen bei der Steuerung der elektrischen Energie, der Zentralisierung der Software- und Elektronikarchitekturen sowie der Realisation datenintensiver Anwendungen wie Infotainment, Fahrassistenz und autonomer Fahrfunktionen im Fahrzeug. Dadurch werden sie am Markt zunehmend zu einem Differenzierungsfaktor.

Angesichts dieses qualitativen Bedeutungszuwachses von Halbleitern greifen die bisherigen Strategien für den Halbleitereinsatz in den Unternehmen der Automobilindustrie zu kurz. Statt diese Aufgabe in die Silo-Perspektive einzelner Abteilungen und Bauteilverantwortlicher zu delegieren und primär an Kostenoptimierungskalkülen auszurichten, besteht ein zentrales Gestaltungsfeld für die Unternehmen

der Automobilindustrie darin, im Einklang mit der Elektrifizierung des Antriebsstrangs und der Neugestaltung der Softwarestrategie komplementär auch eine ganzheitliche Strategie für den Halbleitereinsatz in Fahrzeugen zu entwickeln und umzusetzen.

Zentrale Elemente reichen von der Neuausrichtung des Halbleitereinsatzes um leistungsfähige SoC und der Reduktion der Zahl der verwendeten ECU in zentralisierten Software- und Elektronikarchitekturen über Standardisierungen und Vereinheitlichungen bei den verwendeten Chips⁴¹ etwa durch stärkeren Einbezug der Materialwirtschaft in die Entwicklungsprozesse sowie die Aktualisierung bestehender Fahrzeug- und Modelltypen mit neuen Chip-Generationen bis hin zum Aufbau eigener Kompetenzen für das Design von Chips.

Im Zusammenhang mit der Chip-Krise wurde bekannt, dass eine Reihe von OEM und Systemzulieferern ähnlich wie zuvor Tech-Konzerne wie z.B. Apple, AWS, Google oder Microsoft langfristig den Anspruch verfolgen, ihren Ein-

fluss auf das Design der von ihnen verwendeten Chips deutlich auszuweiten und ihre Kompetenzen und Investments in diesen Bereichen zu stärken. Ein Gesprächspartner schildert dies folgendermaßen:

»Es ist schon so, dass wir immer mehr, also die OEM und die Tier-1, in die Entwicklung der Mikroprozessoren mit einsteigen, weil die Software einen immer größeren Aspekt spielt, das heißt von der Lieferantenentwicklungsseite her und von der Schnelllebigkeit der Modellzyklen müssen wir uns jetzt auch ganz anders einbringen, als wenn man früher seine Widerstände bestellt hat und die Standard-Mikrocontroller nach dem Sinn >one fits all<. Das haben wir halt heutzutage nicht mehr.« Projektmanager Systemzulieferer

Gestaltungsfeld 4:

KOLLABORATIVE WERTSCHÖPFUNGS- ARCHITEKTUREN SCHAFFEN – PARTNERSCHAFTEN MIT CHIP-HERSTELLERN AUFBAUEN

»Wir haben gelernt, dass dieses Modell, man hat eine Budgetplanung im Herbst, dann geht man raus, macht seine Jahrespreisverhandlung für das nächste Jahr, dass das nicht mehr greift. Wir müssen jetzt deutlich langfristiger mit den Halbleiterherstellern planen, wir müssen auch von unseren Kunden, das ist ja auch ein Umerziehungseffekt, der beim OEM anfängt, von unseren Kunden länger verbindlich wissen: Was für Produkte, welche Fahrzeugklassen wollt ihr bauen, damit wir für die nächsten zwei, drei Jahre schon mit den Halbleiterherstellern unsere Kapazitäten absichern, weil wir ja diese langen Lead Times haben. Und dieser Denkprozess, den erarbeiten wir.« Führungskraft Systemzulieferer

Die Beziehungen zwischen den Unternehmen der Automobil- und der Halbleiterindustrie waren bisher wesentlich von einem transaktionalen Charakter geprägt (Schuh et al. 2022). In der Regel gaben die Unternehmen der Automobilindustrie ihre Bestellungen kurzfristig auf, um möglichst geringe finanzielle Risiken eingehen zu müssen. Dies war verbunden mit der Erwartung, dass die Halbleiterhersteller die geforderten Mengen zum passenden Zeitpunkt zu Festpreisen liefern.

Die Chip-Krise hat den Blick dafür geschärft, dass eine solche Form der Zusammenarbeit nicht mehr zielführend ist, schwerwiegende Folgen zeitigen kann und auch von den Halbleiterherstellern nicht mehr ohne Weiteres akzeptiert werden wird.

Ein zentrales Gestaltungsfeld besteht daher darin, langfristig orientierte, partnerschaftliche Beziehungen zu den Unternehmen der Halbleiterindustrie aufzubauen und eine verbesserte Langfristplanung über die gesamte Wertschöpfungskette zu etablieren.

Eine wichtige Maßnahme in diesem Gestaltungsfeld bildet die Etablierung eines engen Austauschs über Technologie- und Produkt-Roadmaps auf Augenhöhe und die Verständigung auf längerfristige Vereinbarungen über Abnahmemengen, wie ein Gesprächspartner hervorhebt:

»Es wäre notwendig, dass die Halbleiter- den Automotive-Leuten sagen würden, ihr müsst mit euren Funktions-Roadmaps wirklich schneller werden, (...) also wie viel von diesen Funktionen werden dann irgendwann gewünscht, in welcher Form, das muss festgelegt werden. Und die Zusammenarbeit in der Kette dann runter von Tier-1 bis hin zu den Halbleiterherstellern muss natürlich dann zügig geschehen, damit dann die Halbleiterhersteller daraus ihre Ableitung treffen können. Und genau diese Ketten müssen natürlich verbessert werden. Also dass die Planung von top-down dann besser funktioniert. Und natürlich, sie muss bottom-up auch beeinflusst werden können, weil wenn der OEM sich was wünscht, was nicht realisiert werden kann, ist das natürlich auch so ein Thema.« Branchenexperte Halbleiterindustrie

Diese Maßnahmen schaffen die Basis, um Vertrauen als Modus in der unternehmensübergreifenden Zusammenarbeit zu stärken und Potenziale einer kollaborativen Zusammenarbeit wie die flexible Entwicklung gemeinsamer Lösungen bei unvorhergesehenen Ereignissen, interorganisationales Lernen, aber auch

Co-Innovation und die Entwicklung gemeinsamer Produkte zu fördern (Heidling/Ziegler 2022). Unsere Gesprächspartner sehen, dass Systemzulieferer als Bindeglied zwischen OEM und Halbleiterherstellern eine entscheidende Rolle beim Aufbau dieser partnerschaftlichen Wertschöpfungsbeziehungen spielen können:

»Wir haben zunehmend Differenzierungsfaktoren, die mit den Halbleitern gestartet werden. Deswegen ist es (...) wichtig, dass wir als Tier 1 und auch unsere Marktbegleiter sich noch stärker um Technologiekooperationen, um Eco-Systeme bemühen, wie wir uns den Zugang zu den Technologien sichern und dort auch uns selbst in die Gestaltung und Weiterentwicklung mit integrieren, Stichwort Verbindung und fließender Übergang zwischen Hardware, wenn es Mikrocontroller sind, und der Software, die beide dann mehr zusammenkommen zum Endprodukt.« Führungskraft Systemzulieferer

Auf dieser Grundlage werden weitere Maßnahmen wie das Teilen von Risiken bei Investitionen in den Aufbau neuer Fertigungsstätten für Halbleiter bis hin zur Entwicklung partner-

schaftlicher Geschäftsmodelle denkbar, in denen aus der Zusammenarbeit erzielte Erträge geteilt werden.

Gestaltungsfeld 5:

HALBLEITERKOMPETENZ IN DER AUTOMOBILINDUSTRIE STÄRKEN – FÜHRUNGSKRÄFTE, BESCHÄFTIGTE, STUDIERENDE UND AUSZUBILDENDE QUALIFIZIEREN

»In den OEM gibt es welche, die echt Ahnung haben (...) aber man hat eher das Gefühl, die wurden jetzt in einem Projekt zusammen gesammelt, um jetzt als Taskforce rumzulaufen und zu helfen. Das war nie eine eigene Abteilung, wo man gesagt hat, ihr seid unsere Halbleiter-Experten (...) die kannst du an ein, zwei Händen abzählen.« Branchenexperte

Die Chip-Krise hat offenbart, dass in vielen Unternehmen der Automobilindustrie ein Bedarf für den Aufbau von Kompetenz über die Halbleiterindustrie und ihre Erzeugnisse besteht. Dies betrifft neben spezialisiertem technologischem Know-how zum Design, der Herstellung und dem Einsatz von Halbleitern auch Kenntnisse über wesentliche Charakteristika der Branche, die Organisation ihrer Wertschöpfungsprozesse und das Erfahrungswissen, welches die Unternehmen in der Zusammenarbeit mit der Halbleiterindustrie aufgebaut haben.

Bei den unmittelbaren Maßnahmen zur Bewältigung der Krise stärkten nicht zuletzt solche »Ressourcen der Beschäftigten« (Pfeiffer/Autor*innenkollektiv 2023, 6) die Handlungsfähigkeit der Unternehmen.

Ein zentrales Gestaltungsfeld besteht daher darin, künftig neben Software- auch Halbleiterkompetenzen auf eine breitere Basis zu stellen und stärker bei Führungskräften, Beschäftigten, aber auch Studierenden und Auszubildenden zu verankern.

Auf der einen Seite gilt es, die Ausbildung von Spezialist*innen in den Bereichen Chip-Design oder Prozess- und Prüftechnik zu fördern und für diese Beschäftigtengruppen attraktive Karrierepfade in den Unternehmen der Automobilindustrie zu schaffen.

Auf der anderen Seite geht es aber auch darum, über breiter angelegte Qualifizierungs- und Weiterbildungsmaßnahmen die Grundkenntnisse über die Halbleiterindustrie bei allen Beschäftigten zu stärken, die mit ihr in Berührung kommen.

Dies betrifft auch die Universitäten, Hochschulen und Institutionen der beruflichen Bildung. Wie eine Gesprächspartnerin schildert, spielt der Aufbau von Halbleiterkompetenzen zum Beispiel gegenwärtig nur eine sehr untergeordnete Rolle in vielen Studiengängen der Ingenieurwissenschaften:

»Also im Maschinenbau, Fahrzeugtechnik ist die Halbleitertechnik: Ich habe einen Chip und wende ihn an. Aber wo er herkommt, was ich damit mache, ich kann es ja von meiner eigenen Erfahrung sagen, ein Zehn-Semester-Studium war, ich glaube ein Semester Nebenfach mehr oder weniger Elektrotechnik, da hatten wir Halbleiter besprochen.« Projektmanagerin Systemzulieferer

Das Feld der Kompetenzentwicklung wird von unseren Gesprächspartnern daher auch als ein wichtiger Baustein einer entsprechenden

industriepolitischen Strategie zur Förderung der Entwicklung der Halbleiterindustrie hierzu-
lande gesehen:

»Industriepolitisch kann man aber sicherlich noch was tun, wenn man nicht nur die Werke hinstellt, sondern auch bei den Fachkräften hilft. Also den Fachkräften in der Halbleiterei und dazwischen, in der ganzen Software, auch Design von Halbleitern, muss ja nicht nur Halbleiterfertigung sein, es reicht ja auch die Zwischenebenen Tier Ones, die dann definieren müssen, wie sollen denn die Halbleiter aussehen, die Funktionen und Ähnliches.« Branchenexperte Halbleiterindustrie

Gestaltungsfeld 6:

KREISLAUFWIRTSCHAFT AUFBAUEN – RECYCLING-STRATEGIEN FÜR HALBLEITER IMPLEMENTIEREN

»Wenn wir die Digitalisierung wollen, (brauchen wir) eine Rohstoffstrategie, in der Recycling einen ganz großen Stellenwert hat. Im Sinne von Kreislaufwirtschaft. Die Frage muss lauten, wie kommen wir konstruktiv dahin, dass ich auf der Leiterplatte entweder ohne die Rohstoffe, die Edelmetalle auskomme oder dass ich wenigstens die einzelnen Bausteine wie beim FairPhone austauschen kann. Das heißt, die Reparaturfähigkeit unserer Produkte herstellen.« Betriebsrat Systemzulieferer

Der Mangel an Halbleitern verweist zugleich auf die Endlichkeit der Ressourcen auf diesem Planeten. Die Herstellung von Chips ist sehr ressourcenaufwendig und viele der in Chips, Platinen und ihren Gehäusen neben Silizium verbauten Rohstoffe wie Kupfer, Zinn, Aluminium, Silber oder Gold sind selten und teuer zu beschaffen. Beim Abbau dieser Rohstoffe werden darüber hinaus große Mengen an Treibhausgasen emittiert und Umweltschäden verursacht, welche nicht zuletzt die Saat für künftige disruptive Ereignisse in den Wertschöpfungsketten legen können. Eine Strategie, die allein darauf orientiert, den Halbleitermangel durch Ausweitung der Produktion zu bewältigen, greift daher zu kurz.

Aus ökologischen, sozialen, aber auch ökonomischen Gründen besteht ein zentrales Gestaltungsfeld für die Unternehmen der Automobilindustrie und ihre Partner vielmehr darin, genauso wie bei den Batterien Wiederverwertung sicherzustellen und Recycling-Strategien

für die Rückgewinnung der in Steuergeräten und Sensoren verwendeten Rohstoffe zu implementieren, um sie im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft für die Produktion neuer Chips zur Verfügung stellen zu können.

Wichtige Elemente einer nachhaltigen Gestaltung der Wertstoffströme können, neben einer Verlängerung der Produktlebenszyklen der Fahrzeuge und ihrer Halbleiter, die Verbesserung der Aufbereitungsverfahren zur Steigerung der Rückgewinnungsquoten und die Entwicklung effizienterer Demontageprozesse bilden, welche bereits in der Konstruktionsphase die Recycling-Fähigkeit der Steuergeräte systematisch berücksichtigen und Ausbauzeiten reduzieren. Flankierend geht es auch in diesem Gestaltungsfeld darum, den Aufbau des entsprechenden Know-how bei den Führungskräften und Beschäftigten zu fördern.

Die Krise als Chance für Veränderung

Die einzelnen Gestaltungsfelder greifen ineinander. Ein Risikomanagement der nächsten Generation kann entscheidend durch den Aufbau partnerschaftlicher Beziehungen zu den Unternehmen der Halbleiterindustrie gestärkt werden. Der Einstieg ins Design eigener Chips kann ohne einen umfassenden Aufbau von Halbleiterkompetenz genauso wenig erfolgen wie die Entwicklung effektiver Recycling-Strategien.

Bei der Neufassung der Strategien für den Halbleitereinsatz kommt es daher darauf an, die Arbeiten in den Gestaltungsfeldern zu parallelisieren, zu verknüpfen sowie in die weiteren Innovationsaktivitäten zur Etablierung Software-definierter Elektrofahrzeuge in den Unternehmen einzubetten.

Wie unsere Gesprächspartner berichten, wurde bereits vor der Chip-Krise in einigen Unternehmen der Automobilindustrie vereinzelt an diesen Gestaltungsfeldern gearbeitet. Nach anfänglichen Erfolgen stießen viele Bemühungen jedoch häufig auf die Beharrungskräfte sedimentierter Strukturen in den Unternehmen und sind dadurch ins Stocken geraten.

Demgegenüber habe die Chip-Krise in den Unternehmen der Automobilindustrie den Handlungsdruck für eine Neufassung der Strategien des Halbleitereinsatzes unmissverständlich deutlich gemacht und damit auch neue Optionsräume für die Bearbeitung der Gestaltungsfelder geschaffen:

»Ja, das ist ein Eingriff in die Hoheitsgebiete. (...) Das Gute ist, dass also der Sense of Urgency, der wäre vor zwei Jahren tatsächlich nicht da gewesen. Wenn ich jetzt vor zwei, zweieinhalb Jahren das gebracht hätte, dann wären die Widerstände größer gewesen. Jetzt sind wir alle durch das Tal der Tränen durchgegangen, deswegen war es mir so wichtig, dass wir, ja, Mitte letzten Jahres schon damit losgelegt sind, dass man sieht, wenn der Sense of Urgency noch da ist, dass man dann auch das Go hat und die Schnittstellenfunktionen, dass das jetzt sinnvoll ist. Wenn die Karawane jetzt weiterzieht zu anderen Problemen, dann wird die Mitwirkung an der Stelle notfalls leiden, und Lessons Learned verschwinden in der Schublade, und zwar als gut befunden, aber nicht umgesetzt. Und das wollen wir, bemühen wir uns zumindest, den Beweis antreten, dass es nicht so passiert.« Führungskraft Systemzulieferer

Dieses Zeitfenster und die Möglichkeitsräume für eine Neufassung der Halbleiterstrategien gilt es zu nutzen.

6.

Die Chip-Krise als Wendepunkt für den Halbleitereinsatz in der Automobilindustrie

Die schärfsten Ausschläge der Chip-Krise in den Unternehmen der Automobilindustrie konnten mittlerweile abgedämpft werden. Aus vielen Unternehmen wird jedoch noch immer von anhaltenden Beeinträchtigungen berichtet (Irwin 2023b). Die meisten unserer Gesprächspartner erwarten, dass mit einem Abflauen der Weltkonjunktur u.a. durch die Maßnahmen zur Inflationsbekämpfung sowie dem Auslaufen von Kaufprämien in den Ländern der Hauptmärkte die Nachfrage nach Fahrzeugen sukzessiv zurückgehen werde und so auch in der Automobilindustrie Angebot und Nachfrage nach Halbleitern langsam wieder ins Gleichgewicht finden werden. Ähnliche Prognosen treffen auch die Analysten- und Beratungshäuser.

Die Analyse der Chip-Krise, ihrer Hintergründe sowie der Bewältigungsstrategien und Gestaltungsfelder in den Unternehmen verdeutlicht indes, dass ein »Weiter so wie bisher« für die Unternehmen der Automobilindustrie kein gangbarer Weg mehr ist. Ausgehend von ihrem ersten Einsatz in den Autoradios der 1950er Jahre haben Halbleiter im Zuge der Elektronifizierung sukzessive an Bedeutung gewonnen. Als Informationsmaschinen kamen sie nicht nur in wachsendem Umfang für die Steuerung der Produktionsanlagen und Geschäftsprozesse der Unternehmen zum Einsatz, sondern auch in den Kernerzeugnissen der Automobilindustrie selbst: Von der Motorsteuerung über die Fahrassistenz bis hin zum Infotainment wurden sie in immer weiteren Bereichen der Fahrzeuge verwendet. In Software-definierten Elektrofahrzeugen erreicht diese Entwicklung gegenwärtig eine neue Qualität. Halbleiter avancieren zu strategischen Bausteinen – sowohl als Leistungselektronik bei der Elektrifizierung des Antriebsstrangs als auch als Hochleistungs-SoC, Datentransmitter und Sensorik bei der Neuausrichtung der Software- und Elektronikarchitekturen und der Realisation marktdifferenzierender Softwarefunktionen. Bei der Konzeption der Fahrzeuge können sie daher nicht länger lediglich als weitere Vorleistungsgüter auf der Stückliste und die produzierenden Unternehmen nicht mehr als bloße Lieferanten von Commodities behandelt werden. In den Unternehmen der Automobilindustrie steht vielmehr eine ganzheitliche Neufassung der Strategien für den Halbleitereinsatz und der Zusammenarbeit mit den

Unternehmen der Halbleiterindustrie auf der Tagesordnung. Die Chip-Krise markiert diesen Wendepunkt für den Halbleitereinsatz in der Automobilindustrie.

Die Chip-Krise schärfe zugleich der Politik die strategische Bedeutung von Halbleitern für die Weltwirtschaft ein (Miller 2022). In den großen Industrienationen waren zwar bereits zuvor eine Reihe industrielicher Initiativen wie das IPCEI-Förderprogramm der EU zur Ansiedelung neuer Chip-Fabriken und Förderung der Halbleiterindustrie aufgelegt worden. Diese Programme wurden nun, überlagert von neuen geopolitischen Spannungen, deutlich ausgebaut. Im US-Kongress etwa wurde der CHIPS for America Act verabschiedet, durch den die Errichtung neuer Halbleiterfabriken in den USA mit Subventionen in Höhe von \$ 52 Mrd. gefördert werden soll.⁴² Die EU-Kommission entwickelte den European Chips Act, über den € 40 Mrd. für Investitionen in Halbleiterwerke in Europa zur Verfügung gestellt werden sollen. China priorisierte im 14. Fünf-Jahres-Plan (2021–2025) wissenschaftliche und technologische Autarkie und Verbesserung als strategische Säule für die nationale Entwicklung. In diesem Zusammenhang erhöhte es seine Investitionen in sieben Schlüsseltechnologien, zu denen insbesondere Halbleiter und integrierte Schaltkreise zählen. In Japan investiert die Regierung € 2,4 Mrd. in den Aufbau einer nationalen Chip-Allianz, deren Kern die Gründung des Gemeinschaftsunternehmens Rapidus ist, an dem sich acht Konzerne, darunter Toyota Motor, Sony, NEC, Kioxia, NTT und Softbank, beteiligen (Welter 2022). Und auch an führenden Halbleiterstandorten wie Taiwan und Süd-Korea werden vergleichbare Initiativen aufgelegt (Welter 2023).

Vor diesem Hintergrund wurden inmitten der Krise in vielen Unternehmen der Automobilindustrie neben den kurzfristigen Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Produktion und Lieferverpflichtungen längerfristige Initiativen zur Neufassung der Halbleiterstrategien lanciert. In der Fachpresse wurde regelmäßig darüber berichtet, dass Automobilunternehmen – anders als bisher üblich – exklusive Verträge mit Halbleiterproduzenten schlossen, welche Abnahmemengen garantierten, um sich Fertigungskapazitäten langfristig zu sichern (Boudette 2023). Manche in-

vestierten gemeinsam mit Halbleiterproduzenten in den Aufbau neuer Fertigungsstätten und Entwicklungsstandorte (Hammerschmidt 2023)⁴³, erwarben Beteiligungen an Halbleiterherstellern (Schäfer 2021) oder trafen Vereinbarungen, in enger Zusammenarbeit mit Halbleiterunternehmen neue Produkte zu entwickeln und sogar potenziell damit zu erzielende Erträge zu teilen. Darüber hinaus deutet sich an, dass einige OEM in der Automobilindustrie daran arbeiten, auf den Spuren von Tesla einen Einstieg in das Design eigener Chips vorzubereiten (Flaherty 2021).

Es kommt nun darauf an, diese Initiativen in den Unternehmen in konsistente Gesamtstrategien für den Halbleitereinsatz in Fahrzeugen und die Zusammenarbeit mit der Halbleiterindustrie zu überführen und in den Organisationen dauerhaft zu verankern.

Die in dieser Expertise identifizierten sechs Gestaltungsfelder können hierfür einen orientierenden Rahmen schaffen. Ihre Bearbeitung in den Unternehmen generiert zugleich erweiterten Forschungsbedarf. Wichtige Fragen lauten: Welche Lösungsansätze werden in den Unternehmen entwickelt? Wie können Führungskräfte und Beschäftigte in diesem Prozess unterstützt werden? Wie sehen geeignete Metriken und Reifegradmodelle aus, um Fort-/Rückschritte in den Gestaltungsfeldern feststellen zu können? Wie kann Erfahrungsaustausch zwischen den Unternehmen organisiert und die Ecosystem-Perspektive insgesamt gestärkt werden?

Appendix

Endnoten

- 1** Im Jahr 2019 wurden in China insgesamt 25,7 Mio. PKW verkauft gegenüber 17 Mio. in den USA und 15,75 Mio. in der EU. Gerade die deutschen Hersteller konnten ihre Verkaufszahlen in China in diesem Zeitraum kontinuierlich ausweiten. Der Anteil des chinesischen Markts an den Absatzzahlen des VW-Konzerns belief sich im Jahr 2019 auf 38,4%, bei Mercedes waren es 29,6% und bei BMW 28,7% (Zahlen nach: JATO Dynamics, CMBI).
- 2** Siehe dazu aus industriesoziologischer Perspektive die Pionierarbeiten von Halfmann 1984; Welsch 1990; Bieber/Möll 1993; Buss/Wittke 2000; Lüthje 2001.
- 3** Der in Deutschland als Lichtmaschine bekannt gewordene Drehstromgenerator wurde anfangs vom Verbrennungsmotor mit einem Riemen angetrieben und lieferte den elektrischen Strom im Niederspannungsnetz für die Starterbatterie und unterschiedliche Verbraucher.
- 4** Im Jahr 1956 führte Bendix das elektronische Einspritzsystem Electrojector ein, das z.B. von AMC und Chrysler als Sonderausstattung in Fahrzeugen eingesetzt werden sollte (Walton 1957). Es erwies sich aber noch als unzuverlässig und wurde wieder durch konventionelle Vergaser ersetzt. Die Patente von Bendix wurden im Jahr 1958 von der Robert Bosch GmbH erworben. Dort gelang es im Jahr 1967, mit der Einspritzpumpe »D-Jetronic« eine der ersten elektronischen Anwendungen serienmäßig für den VW 1600 herzustellen (Bingmann 1993, 762).
- 5** Mit Motronic wurde die erste frei programmierbare digitale Motorsteuerung auf Basis eines Mikrocontrollers von Bosch für den Ottomotor entwickelt. Das erste Fahrzeug, in dem die Motronic serienmäßig verbaut wurde, war der BMW 732i, der 1979 präsentiert wurde (Bähr/Erker 2013, 459).
- 6** Im Jahr 1998 wurden die Anforderungen an sicherheitskritische Systeme in der Normserie IEC 61508 Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme festgeschrieben und Methoden zur Fehlerbeherrschung festgelegt. In der im Jahr 2011 verabschiedeten ISO 26262 (Road vehicles – Functional Safety) wurde IEC 61508 als Vorgehensmodell für die Automobilindustrie angepasst. Je nach von der Norm vorgegebener Risikoklassifikation (ASIL – Automotive Safety Integrity Level), bei der die Faktoren »Severity«, »Exposure« und »Controllability« des zu entwickelnden Systems betrachtet werden, macht die Norm Empfehlungen für die Gestaltung des Entwicklungsprozesses.
- 7** Der Fokus der Entwicklungsanstrengungen lag vor allem darauf, Kosten bei diesen Bauteilen einzusparen, indem z.B. durch kleine Veränderungen im Quelltext der Ressourcenverbrauch der ECU reduziert wurde (Broy et al. 2007).
- 8** Neben der Firmware, welche auf dem Festwertspeicher (ROM) (später Flashspeicher) installiert ist, wurde dadurch ein Kontrollprogramm (Betriebssystem) für die ECU erforderlich, das die verschiedenen Anwendungsprogramme verwaltet, die auf die Hardware zugreifen.
- 9** Die Mikrocontroller der ECU selbst bestehen wiederum aus mehreren verschiedenen Halbleitern (z.B. Memory, CPU und Peripheriefunktionen). Einem Teardown von Porsche Consulting (2022) zufolge bewegt sich die Zahl der Halbleiter bei Fahrzeugen mit 50 bis 90 ECU zwischen 5.000 und 7.000.
- 10** Bei all diesen Arbeiten greifen viele OEM allerdings immer wieder auch auf die Zuarbeiten von Entwicklungsdienstleistern u.a. zurück (Boes/Ziegler 2021, 161ff).

- 11** Bei der Entwicklung des ABS etwa wurde die »konstruktive Arbeit bei Bosch geleistet, während die praktische Versuchsarbeit am Fahrzeug von Daimler-Benz durchgeführt wurde« (Bingmann 1993, 741).
- 12** In der Struktur der Software- und Elektronikarchitektur spiegelt sich folglich die Organisation ihrer Herstellung wider. In der Softwareentwicklung wurde dieses Phänomen bereits in den 1960er Jahren beobachtet und seither als Conway's Law bekannt (Zerfowski/Crepin 2019).
- 13** Mit Automotive SPICE® wurde im Jahr 2005 ein auf der Norm ISO/IEC 330xx Serie basierender Standard für softwarebasierte Systementwicklung in der Automobilindustrie von der Automotive Special Interest Group, einem Zusammenschluss führender OEM, veröffentlicht. Dieser beinhaltet ein Prozess-Referenz-Modell zur Gestaltung softwarebasierter Systementwicklung sowie ein Prozess-Assessment-Modell mit sechs Reifegraddimensionen zu ihrer Analyse und Bewertung – etwa im Hinblick auf Zuverlässigkeit.
- 14** AUTOSAR ist zur führenden Referenzarchitektur für die Gestaltung der ECU für sicherheitsrelevante eingebettete Systeme (z.B. Antriebsstrang, Fahrwerk etc.) aufgestiegen. Für die Software von ECU mit größeren und komplexeren Quellcodes (z.B. Infotainment oder autonome Fahrfunktionen) ist sie jedoch nicht geeignet. Im Jahr 2016 wurde daher mit der Entwicklung von Spezifikationen für eine Adaptive AUTOSAR Plattform begonnen, welche zudem die Updatefähigkeit der Fahrzeugsoftware verbessern soll.
- 15** Gute aktuelle Überblicksdarstellungen zu den wesentlichen Charakteristika der Halbleiterindustrie finden sich bei SIA/Nathan Associates (2016), Frieske et al. (2022, 81ff) und Miller (2022).
- 16** Die Kosten für Halbleiter betragen in einem durchschnittlichen Fahrzeug McKinsey zufolge im Jahr 2012 \$ 350 (im Luxussegment \$ 1.000) (Parker/Thomas 2013, 35).
- 17** Dabei ist ein stetiger Anstieg zu verzeichnen. Mitte der 1980er Jahre wurden in Europa erst 4,6% der produzierten Halbleiter in der Automobilindustrie eingesetzt (zit. n. Bieber/Möll 1993, 160).
- 18** In der Regel beliefern diese Unternehmen mit ihren Erzeugnissen jedoch auch weitere Branchen. Die Automobilindustrie bildet dann einen Absatzmarkt unter vielen. Bei Infineon und NXP ist die Automobilindustrie das Segment mit den höchsten Umsätzen.
- 19** Je weniger Nanometer die Strompfade breit sind, desto schneller und effizienter können die Chips rechnen. Ende letzten Jahres ist in der Fab 18 in Hsinchu am Hauptsitz von TSMC die erste 3-Nanometer Fabrik in Betrieb gegangen (Labs 2022).
- 20** Verschärfende Regeln für den Ausstoß von Emissionen wurden zunächst in den USA durch das California Resources Board (CARB) im Jahr 1990 angestoßen und sowohl in Europa als auch China (Meng Fang/Zhou 2022) aufgegriffen.
- 21** Der Inverter steuert das Drehmoment des Elektromotors durch Anpassung der Spannungshöhe, die Drehzahl durch die Frequenz der Wechselspannung und ermöglicht Rückwärtsfahren durch die Umkehrung der Polung und Änderung der Drehrichtung des Motors.

22 Während Tesla Bordnetze mit 400 Volt einsetzt, sind Bordnetze mit 800 Volt z.B. im Porsche Taycan oder im Ioniq 5 von Hyundai verbaut. Die Technik dafür wurde vom kroatischen Startup Rimac entwickelt (Wittich/Lang 2022).

23 SiC-Halbleiter haben eine höhere Leitfähigkeit und ermöglichen höhere Schaltfrequenzen im Vergleich zu Silizium-Halbleitern. Zudem fällt der Energieverlust in Form von Wärme um 50% niedriger aus. Dadurch, dass weniger Wärme abgegeben wird und die SiC-Komponenten auch bei höheren Temperaturen betrieben werden können, kann das Kühlssystem der Leistungselektronik kleiner ausfallen. Dies führt zu Energieeinsparungen und aufgrund der kompakteren Kühlssysteme auch zu Gewichts- und Kostensenkungen. Die weltweit erste Fertigung mit 200-Millimeter-Wafers für Leistungshalbleiter aus SiC wurde im April 2022 von Wolfspeed (ehemals Cree) im Mohawk Valley in den USA eröffnet (Birch 2022).

24 Einer Kundenbefragung von McKinsey in China zufolge wächst zum Beispiel auf dem chinesischen Markt bei Kaufentscheidungen die Relevanz der »digital experience« eines Fahrzeugs und diese zählt mittlerweile zu den wichtigsten Faktoren (Guan et al. 2021, 16).

25 Presseberichten zufolge waren etwa bei Volkswagen Probleme bei der Integration der Fahrzeugsoftware dafür verantwortlich, dass der Produktionsanlauf des ID.3 und des Golf beeinträchtigt wurden (Slavik 2020).

26 Zerfowski/Crepin (2019, 38f) erwarten zum Beispiel, dass der Umfang der Software auf diesen Recheneinheiten um den Faktor 10.000 von bisher etwa 8 MB auf bis zu 80 GB ansteigen werde.

27 Virtualisierungstechnologien wie der Hypervisor DriveOS oder PikeOS ermöglichen es, mehrere Betriebssysteme für heterogene Anforderungen (z.B. Betriebssysteme mit und ohne Echtzeitanforderungen) gleichzeitig und sicher voneinander getrennt auf demselben SoC auszuführen (Sinha/West 2021).

28 Zu Beginn wurde bei der Softwareentwicklung in vielen Bereichen mit Partnern zusammengearbeitet – zum Beispiel bei der Entwicklung des Fahrassistenzsystems Autopilot noch mit Mobileye, ehe die Zusammenarbeit im Jahr 2016 aufgehoben wurde (Auchard 2016). Nach dem Ausscheiden von Mobileye schloss Tesla eine Partnerschaft mit Nvidia, die im Jahr 2018 ebenfalls beendet wurde. Speziell für den Bereich Autopilot stieg Tesla später auch ins Chip-Design ein (Boes/Ziegler 2021, 32) und hat mittlerweile neben der Vehicle Software Organization eine Silicon Development Group aufgebaut, in der weitere Chips designt werden.

29 Im Model Y beispielsweise sind einem Teardown von Munro Associates (2021) zufolge insgesamt noch 26 ECU verbaut.

30 Sobald ein Client über die ODB-2-Diagnosebuchse ans Fahrzeug angeschlossen wird, kann er über das UDS-Protokoll Steuergeräte kontaktieren, Fehlerspeicher auslesen und neue Firmware aufspielen.

31 Als die NHTSA im Jahr 2014 einen Rückruf beim Model S wegen eines Sicherheitsrisikos bei den Ladeanschlüssen anordnete, konnte Tesla dieses Risiko durch ein OTA-Softwareupdate beheben und schuf damit einen neuen Präzedenzfall für den Umgang mit Rückrufen bei Softwareproblemen (Brisbourne 2014).

32 Dadurch wird es zugleich möglich, Praktiken von Tech-Unternehmen wie A/B-Testverfahren zu adaptieren. Bei A/B-Testverfahren werden neue Funktionalitäten zunächst mit einem bestimmten Kreis an (echten) Nutzern getestet, um dieses Feedback für ihre Weiterentwicklung zu nutzen, ehe sie allen Nutzern verfügbar gemacht werden (Ziegler 2021, 16).

33 Innerhalb von OEMs und Systemzulieferern wurden bis dato eine Vielzahl unterschiedlicher Tools zur Versionsverwaltung eingesetzt. Häufig verfügte jede Abteilung, die für eine ECU zuständig war, über ihr eigenes System. In einem verteilten Versionskontrollsystem für die gesamte Fahrzeugsoftware hingegen sollten alle Entwickler/-innen Zugriff haben, die insgesamt in den Entwicklungsprozess involviert sind.

34 Bei Tesla erfolgen durchschnittlich alle vier Wochen Upgrades der Fahrzeugsoftware (Daum 2022, 17). Die Entwickler/-innen haben dafür eine automatisierte Tool Chain aufgebaut, die es in weniger als einem Tag möglich machen soll, an neuen Fahrzeugsoftware-Builds Regressionstests durchzuführen, die Software zu validieren und zu releases. In diese Toolchain wurde auch ein HiL-System integriert (Rohde 2020).

35 Der Umstieg von Intel Atom Chips für das Infotainment auf die leistungsstärkeren, aber höhere Energie beanspruchenden AMD Ryzen Chips hat beispielsweise die Reichweite des Model 3 von Tesla anfänglich um 22 km verringert (Günsch 2022).

36 Nach diesem Vorbild wurde das Open-Source-Framework Uptane für sichere OTA-Software-Updates in der Automobilindustrie entwickelt, das im Jahr 2018 zu einem IEEE-Standard wurde. Das Framework stellt sicher, dass nur OEM-signierte/-autorisierte Images auf ECU installiert werden.

37 Eine Studie von McKinsey und der Stanford Universität hatte im Jahr 2016 prognostiziert, dass das Gesamtvolumen der mit wiederkehrenden Umsätzen (recurring revenue) in der Automobilindustrie erzielten Erlöse bis zum Jahr 2030 auf \$ 1,5 Bio. anwachsen werde (Mohr et al. 2016). Andere Beratungshäuser liefern ähnliche Prognosen. Im Februar 2023 gab Mercedes-Finanzvorstand Harald Wilhelm gegenüber Journalisten bekannt, dass Mercedes im abgelaufenen Jahr über 1 Mrd. € Umsatz mit Softwarediensten erzielt hatte (Hohensee 2023).

38 Im Jahr 2022 wurde Mobileye von Intel abermals an der Börse gelistet. Intel hält jedoch weiterhin 94,2% der Anteile.

39 Als Bullwhip-Effekt wird im Supply Chain Management ein Phänomen bezeichnet, bei dem sich Nachfrageschwankungen entlang mehrstufiger Lieferketten aufschaukeln und eine Situation entsteht, bei der die Bestellmenge die eigentliche Nachfrage deutlich übersteigt oder vice versa – wie im Fall der Chip-Krise. Häufig ausgelöst durch Verzerrungen bei der Weitergabe von Informationen und mangelnde Abstimmung zwischen den einzelnen Stufen, kann dieser Effekt umso stärker werden, je verzweigter die Sublieferantenstruktur ist (Lee et al. 1997).

40 Renesas beliefert insbesondere die japanischen Hersteller Toyota, Nissan und Honda.

41 Auch die Entwicklung unternehmensübergreifender Chip-Standarddesigns für bestimmte ECU, um dadurch insgesamt die Stückzahlen der Halbleiterhersteller erhöhen zu können, ist denkbar.

42 Steven Rattner (2023) kommentiert dieses Programm in der NYT als »largest foray into the private sector since World War II« durch die US-Regierung.

43 Im Februar 2023 wurde etwa bekannt, dass ZF Friedrichshafen gemeinsam mit dem US-amerikanischen Hersteller Wolfspeed in den Bau einer Fabrik für Leistungshalbleiter aus Siliziumkarbid im Saarland investiert (Thomiczek 2023).

Glossar

5G = Mobilfunkstandard der fünften Generation

A/B-Testverfahren = Praktik der Softwareentwicklung, bei der zwei Varianten einer Anwendung mit Nutzergruppen getestet werden, um feststellen zu können, welche die bessere Leistung erzielt.

Antiblockiersystem (ABS) = Technisches System, das beim Bremsen eines Kraftfahrzeugs einem möglichen Blockieren der Räder durch Reduzierung des Bremsdrucks entgegenwirkt und dadurch beim Bremsvorgang Lenkbarkeit, Spurtreue sowie bei nasser Straße einen reduzierten Bremsweg ermöglicht.

Antriebsschlupfregelung (ASR) = Technisches System, das verhindert, dass die Räder beim Anfahren eines Kraftfahrzeugs durch Verringerung des Antriebsmoments durchdrehen.

Anwendungsspezifische integrierte Schaltung (ASIC) = Als integrierter Schaltkreis realisierte elektronische Schaltung, die auf den Einsatz für einen bestimmten Anwendungsfall angepasst und deren Funktion nicht veränderbar ist.

Applikation = Prozessschritt in der Fahrzeugentwicklung, bei der das Fahrzeugverhalten durch Einstellung der Steuergeräteparameter festgelegt wird.

Automotive SPICE = Industriestandard zur Bewertung der Leistungsfähigkeit der Entwicklungsprozesse von Steuergeräteleferanten in der Automobilindustrie.

AUTOSAR (AUTomotive Open System Architecture) = Von einem Konsortium aus führenden OEM und Systemzulieferern lancierte Initiative zur Etablierung einer hardwareunabhängigen, standardisierten Referenzarchitektur zur Gestaltung der Software (Middleware) von elektronischen Steuergeräten.

ASIL (Automotive Safety Integrity Level) = Von ISO 26262 spezifizierte Sicherheitsanforderungsstufe für sicherheitsrelevante Systeme in Kraftfahrzeugen.

Bootloader = Softwareprogramm, welches das Starten eines Rechners oder Steuergeräts ermöglicht.

Build = Prozessschritt in der Softwareentwicklung, bei dem Dateien mit neuem Quellcode in Softwareartefakte konvertiert werden, welche auf einem Computer ausgeführt und getestet werden können (in der Regel vor dem Release der Software).

Bullwhip-Effekt = Begriff aus dem Supply Chain Management für ein Phänomen, bei dem sich Nachfrageschwankungen entlang mehrstufiger Lieferketten aufschaukeln.

C = imperative Programmiersprache, die in 1970er Jahren an den Bell Laboratories entwickelt wurde und zu den am weitesten verbreiteten Programmiersprachen weltweit zählt.

CAN (Controller Area Network) = serielles Bussystem zur Datenübertragung im Fahrzeug, das mehrere gleichberechtigte Steuergeräte miteinander verbindet.

CAN-FD (Controller Area Network Flexible Data-Rate) = Weiterentwicklung von CAN, welches höhere Datenübertragungsraten und die Übertragung größerer Nutzdaten ermöglicht.

CD (Continous Deployment) = Praktik in der Softwareentwicklung, bei der getestete neue Software kontinuierlich und automatisiert in Betrieb genommen wird.

CI (Continous Integration) = Praktik der Softwareentwicklung, bei der Änderungen am Quellcode einer Software kontinuierlich in einer zentralen Versionsverwaltung zusammengeführt und automatisiert getestet werden.

Code Refactoring = Praktik in der Softwareentwicklung, bei der bestehende Software z.B. zur Verbesserung der Lesbarkeit und Wartbarkeit vereinfacht wird, ohne dass sich ihr externes Programmverhalten ändert.

Commodity = Stark standardisiertes und entsprechend austauschbares Produkt. Der Begriff der Commoditisierung beschreibt einen Prozess, in dem Produkte ihre differenzierenden Merkmale verlieren und zu austauschbaren Commodities werden.

Conway's Law = nach dem US-amerikanischen Informatiker Melvin Edward Conway benannte Beobachtung, wonach Organisationen, die Systeme entwerfen, zwangsläufig Systementwürfe erstellen, welche die Kommunikationsstrukturen dieser Organisationen widerspiegeln.

Deployment = Prozessschritt in der Softwareentwicklung, bei dem neue Softwareartefakte in Betrieb genommen werden.

DevOps = Zusammengesetzter Begriff aus Dev (Development) und Ops (Operations), der ein Set an Prozessen, Methoden und Werkzeugen zur Verbesserung der Zusammenarbeit aller an der Entwicklung und dem Betrieb von Software beteiligten Akteure bezeichnet.

Digitaler Signalprozessor (DSP) = Chip, welcher auf die kontinuierliche Verarbeitung bestimmter digitaler Signale wie Video oder Audio spezialisiert ist.

Elektrisch/Elektronische Architektur (E/E-Architektur) = Bezeichnung für den Aufbau der Fahrzeugelektrik und -elektronik.

E-Fuels = Kraftstoffe, die durch Synthese aus Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff unter Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden (z.B. E-Kerosin, E-Methan oder E-Methanol).

Electronic Control Unit (ECU) (dt. Steuergerät) = Elektronisches Modul zur Steuerung, Regelung und Überwachung z.B. von Prozessen in Kraftfahrzeugen.

Elektromagnetische Verträglichkeit = Fähigkeit eines technischen Systems, nicht durch elektrische oder elektromagnetische Effekte von anderen Systemen gestört zu werden sowie umgekehrt andere Systeme nicht durch solche Effekte zu stören.

Elektronenröhre = Gerät, durch das elektrische Spannung zwischen zwei Elektroden in einer evakuierten oder mit Gas gefüllten Röhre gesteuert werden kann.

Elektronische Stabilitätskontrolle (ESC) = elektronisches Fahrassistenzsystem, das durch gezieltes Abbremmen einzelner Räder einem Ausbrechen des Fahrzeugs entgegenwirkt.

Ethernet = Familie an Netzwerktechnologien zum kabelgebundenen Austausch digitaler Daten zwischen den in (lokalen) Netzwerken angeschlossen Geräten.

Fab = Fabrik für die Herstellung von Halbleitern (engl. Kurzform von semiconductor fabrication plant).

Festwertspeicher = Datenspeicher (engl. ROM, read-only memory), auf den im normalen Betrieb nur lesend zugegriffen werden kann und dessen Daten auch im stromlosen Zustand abgerufen werden können. Er wird häufig bei eingebetteten Systemen eingesetzt, deren Software nicht verändert werden soll.

Firmware = Software, die zwischen der Hardware und Anwendungssoftware von elektronischen Geräten grundlegende Funktionen übernimmt (z.B. das Laden des Betriebssystemkernels).

Flashspeicher = Datenspeicher, der seine Daten in stromlosem Zustand vorhält. Anders als ein Festwertspeicher kann ein Flashspeicher umprogrammiert werden.

FlexRay = ein serielles Bussystem zur Datenübertragung im Fahrzeug, das gegenüber CAN höhere Datenraten fehlertolerant übertragen kann und häufig für Fahrassistenzsysteme verwendet wird.

Fotolithografie = Verfahren der Halbleitertechnik, bei dem Licht oder UV-Strahlung durch Fotomasken geleitet wird; die Strahlung reagiert dann mit Fotolack und erzeugt Muster auf den Silizium-Wafern.

Foundry = Fertigungsbetrieb in der Mikroelektronik, der in seinen Werken Chips für andere Halbleiterunternehmen herstellt.

Funktionale Sicherheit = ein in IEC 61508 definiertes Set an Praktiken für die Entwicklung eines sicherheitsrelevanten elektrischen und elektronischen Systems, das sicherstellen soll, dass das System korrekt funktioniert und sich beim Auftreten eines Fehlers auf eine sichere und vorhersehbare Weise verhält.

Galliumnitrid (GaN) = aus Gallium und Stickstoff bestehendes Halbleitermaterial mit breitem Bandabstand, das insbesondere für die Leistungselektronik in Elektro-Fahrzeugen verwendet werden soll.

GPU (Graphics Processing Unit) = Chip, der parallele Berechnungen durchführen kann und insbesondere bei Grafik- und KI-Anwendungen zum Einsatz kommt.

Hardware in the Loop (HiL) = Verfahren, bei dem die Ein- und Ausgänge eines eingebetteten Systems an einen Prüfstand angeschlossen und getestet werden, welcher die reale Umgebung des Systems simuliert (z.B. zur Validierung eines Steuergeräts).

Halbleiter = Festkörper, deren elektrische Leitfähigkeit zwischen der von elektrischen Leitern und Nichtleitern liegt.

Hypervisor = Software, die den simultanen Betrieb mehrerer Gastsysteme auf einer Hardware ermöglicht und die Ressourcenverteilung verwaltet.

Integrierter Schaltkreis = Auf einem einzelnen Halbleitersubstrat aufgebrachtes Set an elektronischen Komponenten, dessen Elemente vollständig integriert sind.

Inverter = Elektronisches Gerät, das Gleichspannung in Wechselspannung umwandeln kann und vice versa. Im Fahrzeug steuert es u.a. den Elektromotor.

ISO 26262 = Von der Internationalen Organisation für Normung definierter Standard zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit von Kraftfahrzeugen.

Just-in-Time Produktion = Produktionsstrategie, bei der das Material in der Stückzahl und zu dem Zeitpunkt geliefert und produziert wird, wie es zur Bearbeitung der Kundenaufträge benötigt wird.

Just-in-Sequence Produktion = Weiterentwicklung der Just-in-Time Produktion in der Automobilindustrie, bei der das Material fahrzeugbezogen und in Montagesequenz angeliefert wird.

Lastenheft = Dokument, in dem die Gesamtheit der Anforderungen des Auftraggebers an die Lieferungen und Leistungen eines Auftragnehmers beschrieben sind.

Lines of Code = Metrik in der Softwareentwicklung, zur Erfassung der Größe eines Computerprogramms anhand der Anzahl der Zeilen seines Quelltextes.

LIN (Local Interconnect Network) = serielles Bussystem zur Datenübertragung im Fahrzeug, das gegenüber CAN geringere Übertragungsraten ermöglicht, aber kostengünstiger ist.

Logik-Chip = Ein Chip, der Daten verarbeitet.

MATLAB/Simulink = proprietäre Software des Unternehmens Mathworks zur Modellierung von technischen, physikalischen, finanzmathematischen und anderen Systemen.

Memory-Chip = Ein Chip, der Daten speichert.

Mikroprozessor = Chip, bei dem alle Komponenten der datenverarbeitenden Logikeinheit auf einem Substrat realisiert werden.

Mikrokontroller = Chip, bei dem neben dem Prozessor weitere Peripheriefunktionen wie Speicher, Ein-/Ausgabe und serielle Schnittstellen auf einer Platine realisiert werden.

MOST (Media Oriented Systems Transport) = Serielles Bussystem, das vor allem für die Datenübertragung bei Multimediaanwendungen im Fahrzeug zum Einsatz kommt.

National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) = Zivile US-Bundesbehörde für Straßen- und Fahrzeugsicherheit.

Regressionstests = Praktik der Softwareentwicklung, bei der Testfälle wiederholt werden, um sicherzustellen, dass Modifikationen in bereits getesteten Teilen der Software keine neuen Fehler (»Regressionen«) verursachen.

Versionskontrollsystem = Softwareprogramm zur verteilten Versionsverwaltung von Dateien, welches die Zusammenarbeit von Softwareentwickler/-innen an einem Produkt verbessern soll.

RTOS (Real-Time Operating System) = Betriebssystem, das zeitkritische Anfragen eines Anwendungsprogramms oder Signale von Hardware-Schnittstellen innerhalb einer bestimmten Frist gesichert verarbeitet.

OBD-2-Diagnosebuchse (On-Board-Diagnostics) = Standardisierte Hardwareschnittstelle im Fahrzeug, über die die Fehlerspeicher des Fahrzeugdiagnosesystems ausgelesen werden können.

Operational Design Domain (ODD) = Spezifikation der Bedingungen (z.B. Wetter, Fahrsituation), für die ein autonomes Fahrsystem ausgelegt ist, sodass es sicher funktioniert.

Over-The-Air (OTA)-Update = Softwareaktualisierung, die über eine Funkschnittstelle wie WLAN oder Mobilfunknetz durchgeführt wird.

Pflichtenheft = Vom Auftragnehmer erstellter Projektplan, der darstellt, wie er die im Lastenheft spezifizierten Anforderungen des Auftraggebers erfüllen will.

Planartechnik = Verfahren zur Herstellung von Transistoren und integrierten Schaltkreisen, das es erstmals ermöglichte mehrere Halbleiterbauelemente auf einem Substrat zu platzieren.

Silizium = Chemisches Element, das als Halbmetall sowohl Eigenschaften von Metallen als auch Nicht-Metallen aufweist und als Grundmaterial für die meisten Produkte der Halbleiterindustrie dient.

Siliziumkarbid = Chemische Verbindung aus Silizium und Kohlenstoff, die als Material insbesondere für Komponenten in der Leistungselektronik verwendet wird.

Superfracking = Set an Fördermethoden für die Gewinnung fossiler Brennstoffe, bei denen ein Gemisch aus Wasser, Sand und Chemikalien mit hohem Druck in die Tiefe gepresst wird.

System-on-a-Chip (SoC) = Chip, bei dem tendenziell alle Komponenten eines programmierbaren elektronischen Systems auf einem Halbleiterbauelement als monolithischer integrierter Schaltkreis realisiert werden.

Teardown = Ingenieurpraktik, bei der ein Fahrzeug oder eine Komponente eines Fahrzeugs zerlegt werden (z.B. zur Erfassung der verwendeten Bauteile).

Technische Schulden (engl. Technical Debt) = Eine in der Softwareentwicklung verwendete Metapher zur Bezeichnung der Folgelasten, die sich im Entwicklungsprozess durch schlechte technische Umsetzung akkumulieren und sowohl bewusst (z.B. wegen Zeitbeschränkungen) als auch unbewusst erzeugt werden können.

Toolchain = Durchgängiges Set von Softwarewerkzeugen, die bei der Entwicklung von Software zum Einsatz kommen.

Transistor = Eine winzige elektronische Schaltung, die entweder angeschaltet (erzeugt eine 1) oder ausgeschaltet (erzeugt eine 0) wird und dabei die Einsen und Nullen generiert, welche allen Digitalisierungsprozessen zugrunde liegen.

UDS (Unified Diagnostic Services) = In ISO 14229 spezifiziertes Diagnose-Kommunikationsprotokoll zur Kontakierung und Wartung aller Steuergeräte im Fahrzeug.

Uptane-Framework = Quelloffenes Framework, das einen Prozess für sichere OTA-Updates der Software von Steuergeräten im Fahrzeug festlegt.

V-Modell = Lineares Vorgehensmodell, das ursprünglich für das Management von Softwareentwicklungsprojekten konzipiert wurde. Es gliedert Projekte in aufeinander folgende Phasen und definiert ergänzend zum Wasserfallmodell auch Testphasen zur Qualitätssicherung. Durch Gegenüberstellung der einzelnen Entwicklungs- und Testphasen entsteht bildlich das namensgebende „V“.

Validierung = Auf die Verifizierung folgender Prozessschritt in der Entwicklung von Fahrzeugkomponenten, bei dem im Feldversuch geprüft wird, ob spezifische Nutzungsziele des Auftraggebers erreicht werden.

Verifizierung = Prozessschritt in der Entwicklung von Fahrzeugkomponenten, bei dem geprüft wird, ob ein Produkt den spezifizierten Anforderungen im Pflichtenheft entspricht.

Virtualisierung = Technologie, mit der die physikalischen Ressourcen eines Computers für verschiedene virtuelle Umgebungen aufgeteilt werden können. Dadurch können z.B. mehrere Betriebssysteme auf einem Computer ausgeführt werden.

Wafer = Ein zumeist aus monokristallinem Silizium bestehendes, rundes Stück, aus dem Chips hergestellt werden und das einen Durchmesser von bis zu 300mm aufweisen kann.

Zonale Architektur = Variante einer E/E-Architektur, bei der wenige Hochleistungsrechner alle wesentlichen Rechenaufgaben für bestimmte Fahrzeughbereiche übernehmen und um diese herum mehrere kleinere Rechner gruppiert werden, die an der Peripherie untergeordnete Aufgaben ausführen.

Verzeichnis der Quellen

Antinyan, V. (2020): Revealing the Complexity of Automotive Software, DOI: <https://doi.org/10.1145/3368089.3417038>, Zugriff 01.10.2022

Auchard, E. (2016): Mobileye says it warned Tesla against enabling 'hands-free' driving, <https://www.reuters.com/article/us-mobileye-tesla-idUSKCN11M2G0>, Zugriff 24.01.2023

Bähr, J., P. Erker (2013): Bosch. Geschichte eines Weltunternehmens, München: C. H. Beck

Bauer, W., O. Riedel, F. Herrmann (Hg.) (2020): Beschäftigung 2030. Auswirkungen von Elektromobilität und Digitalisierung auf die Qualität und Quantität der Beschäftigung bei Volkswagen, Stuttgart

Baumann, J. (2021): Daimler stoppt Produktion von meistverkaufter Modellreihe, <https://www.bw24.de/stuttgart/daimler-ag-stuttgart-krise-halbleiter-sindelfingen-e-klasse-produktionsstopp-kurzarbeit-s-klasse-eqs-90530046.html>, Zugriff 24.01.2023

Bay, L. (2021): So profitabel wie nie – Autohersteller erwirtschaften Rekordgewinne, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autoindustrie-so-profitabel-wie-nie-autohersteller-erwirtschaften-rekordgewinne/27562360.html>, Zugriff 07.02.2023

Bereisa, J. (1983): Applications of Microcomputers in Automotive Electronics, in: IEEE Transactions on Industrial Electronics, 30(2), 87-96

Bieber, D., G. Möll (1993): Technikentwicklung und Unternehmensorganisation. Zur Rationalisierung von Innovationsprozessen in der Elektroindustrie, Frankfurt/New York: Campus

Bielawski, R., R. Gaynier, D. Ma, S. Lauzon, A. Weimerskirch (2020): Cybersecurity of Firmware Updates (Report No. DOT HS 812 807). National Highway Traffic Safety Administration, Washington D.C.

Bingmann, H. (1993): Case C. Antiblockiersystem und Benzineinspritzung, in: Albach, H. (Hg.): Culture and Technical Innovation. A Cross-Cultural Analysis and Policy Recommendations, Berlin/New York: Walter de Gruyter, 736-821

Birch, K. (2022): World's First Silicon Carbide Chip Facility from Wolfspeed, <https://businesschief.eu/technology/worlds-first-silicon-carbide-chip-factory-opens-in-ny>, Zugriff 19.01.2023

Blanco, S. (2021): Here Are Features Some New Cars Won't Get Because of the Chip Shortage, <https://www.caranddriver.com/news/g38179550/new-cars-tech-features-missing-chip-shortage/>, Zugriff 19.01.2023

Bloomberg (2022): U.S. Sanctions Have Helped China Supercharge Its Chipmaking Industry, <https://time.com/6189341/us-sanctions-china-chips-semiconductors/>, Zugriff 03.02.2023

BMW (2022a): Kostenlose Over-the-air Upgrades für 3,8 Mio. Fahrzeuge: Zehn Highlights, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0403765DE/kostenlose-over-the-air-upgrades-fuer-3-8-mio-fahrzeuge-zehn-highlights?language=de>, Zugriff 25.01.2023

BMW (2022b): BMW Group, Qualcomm und Arriver vereinbaren langfristige strategische Zusammenarbeit zur gemeinsamen Entwicklung von Softwarelösungen für das automatisierte Fahren, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0373015DE/bmw-group-qualcomm-und-arriver-vereinbaren-langfristige-strategische-zusammenarbeit-zur-gemeinsamen-entwicklung-von-softwareloesungen-fuer-das-automatisierte-fahren?language=de>, Zugriff 30.01.2023

BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2020): Schwere Rezession durch die Corona-Pandemie. Bundesminister Peter Altmaier stellt die aktuelle Frühjahrsprojektion der Bundesregierung vor, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2020-05-schwere-rezession-durch-die-corona-pandemie.pdf?__blob=publicationFile&v=10, Zugriff 08.02.2023

Boes, A. (2005): Informatisierung, in: SOFI, IAB, ISF München, INIFES (Hg.), Berichterstattung zur sozioökonomischen Entwicklung in Deutschland – Arbeits- und Lebensweisen, Erster Bericht, Wiesbaden: VS, 211-44

Boes, A., A. Ziegler (2021): Umbruch in der Automobilindustrie. Analyse der Strategien von Schlüsselunternehmen an der Schwelle zur Informationsökonomie (Forschungsreport). München: ISF München

Böhle, F., E. Heidling, Y. Schoper (2016): A New Orientation to Deal with Uncertainty in Projects, in: International Journal of Project Management, 34 (7), 1384-1392

Boudette, N. (2021): The Car Market Is Insane. Cars Are Sold Even Before They Hit the Lot, <https://www.nytimes.com/2021/07/15/business/car-sales-chip-shortage.html>, Zugriff 18.01.2023

Boudette, N. (2023): General Motors Reaches Deal to Ensure Its Chip Supply, <https://www.nytimes.com/2023/02/09/business/energy-environment/general-motors-globalfoundries-chips.html>, Zugriff 10.02.2023

Brisbourne, A. (2014): Tesla's Over-the-Air Fix: Best Example Yet of the Internet of Things? https://www.wired.com/insights/2014/02/teslas-air-fix-best-example-yet-internet-things/?utm_source=pocket_reader, Zugriff 24.01.2023

Broy, M., I. H. Krüger, A. Pretschner, C. Salzmann (2007): Engineering Automotive Software, in: Proceedings of the IEEE, 95(2), 356-373

Broy, M., G. Reichart, L. Rothhardt (2011): Architekturen softwarebasierter Funktionen im Fahrzeug: von den Anforderungen zur Umsetzung, in: Informatik-Spektrum, 34, 42-59

Buchenau, M.-W., J. Hofer, R. Tyborski (2021): Hersteller warnen: Chip-Mangel könnte bis ins dritte Quartal andauern, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autoindustrie-hersteller-warnten-chipmangel-koennte-bis-ins-dritte-quartal-andauern/26884324.html>, Zugriff 10.01.2023

Buchenau, M.-W. (2022): Taycan wird zum Bestseller – Porsche verkauft erstmals mehr als 300.000 Autos, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autoindustrie-taycan-wird-zum-bestseller-porsche-verkauft-erstmals-mehr-als-300-000-autos/27966268.html>, Zugriff 10.01.2023

Bundeskartellamt (2022): Chips und Erkennungssoftware bei Fahrassistenzsystemen. Qualcomm darf das Arriver-Geschäft von Veoneer übernehmen, https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Meldung/DE/Pressemitteilungen/2022/21_03_2022_Qualcomm_Arriver_Veoneer.html, Zugriff 26.01.2023

Burkacky, O., J. Deichmann, G. Doll, C. Knochenhauer (2018): Rethinking Car Software and Electronics Architecture, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/rethinking-car-software-and-electronics-architecture>, Zugriff 10.01.2023

Burkacky, O., J. Deichmann, J. P. Stein (2019): Automotive Software and Electronics 2030. Mapping the Sector's Future Landscape, München: McKinsey

Buss, K.-P., V. Wittke (2000): Mikro-Chips für Massenmärkte - Innovationsstrategien der europäischen und amerikanischen Halbleiterhersteller in den 90er Jahren, in: SÖFI-Mitteilungen 28, 7-38

Canzler, W., A. Knie (2018): Taumelnde Giganten. Gelingt der Autoindustrie die Neuerfindung? Bonn: BPB

Charette, R. E. (2021): How Software is Eating the Car, <https://spectrum.ieee.org/software-eating-car#toggle-gdpr>, Zugriff 01.10.2022

Coppola, R., M. Morisio (2017): Connected Car. Technologies, Issues, Future Trends, ACM Computing Surveys, 49(3), 1-36

Daum, T. (2022): Agile Methods on the Shop Floor. Towards a »Tesla Production System«?, in: Weizenbaum Series 31, DOI: <https://doi.org/10.34669/WI.WS/31>

Davis, R. (2022): Chip Shortages Still Plague Toyota, Some Other Auto Makers, <https://www.wsj.com/articles/chip-shortages-still-plague-toyota-other-auto-makers-11667280514>, Zugriff 02.02.2023

De Santis, R. A. & Van der Veken, W. (2020): Forecasting Macroeconomic Risk in Real Time: Great and Covid-19 Recessions, <https://www.ecb.europa.eu/pub/pdf/scpwps/ecb.wp2436~df6319728a.en.pdf>, Zugriff 17.11.2022

Deiß, M., V. Döhl (Hg.) (1991): Vernetzte Produktion. Automobilzulieferer zwischen Kontrolle und Autonomie, Frankfurt/New York: Campus

Ding, X., J. Cheng, F. Chen (2017): Impact of Silicon Carbide Devices on the Powertrain Systems in Electric Vehicles, in: Energies 10(4), 1-17

dpa (2021): Chipkrise: Autobauer produzieren »auf Halde«, <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/auto-chip-krise-autobauer-produzieren-auf-halde-dpa.urn-newsml-dpa-com-20090101-210928-99-389987>, Zugriff 02.02.2023

Dumitrescu, R./Albers, A./Riedel, O./Stark, R./Gausemeier, J. (Hrsg.) (2021): Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering, Paderborn.

Eberhard, M. (2006): A Bit About Batteries, <https://www.tesla.com/blog/bit-about-batteries>, Zugriff 17.11.2022

Eckl-Dorna, W. (2020): Coronavirus-bedingte Werksstillungen der Autobranche. So planen die Autobauer für den Lockdown und danach, <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/coronavirus-welche-werke-autobauer-stillgelegt-haben-wo-sie-wieder-anlaufen-a-1305675.html>, Zugriff 17.11.2022

Emadi, A. (Hg.) (2017): Handbook of Automotive Power Electronics and Motor Drives, Boca Raton [FL]: Taylor & Francis

Ewing, J. (2022): Why Tesla Soared as Other Automakers Struggled to Make Cars, <https://www.nytimes.com/2022/01/08/business/teslas-computer-chips-supply-chain.html>, Zugriff 02.02.2023

Ewing, J. (2023): Electric Vehicles Could Match Gasoline Cars on Price This Year, <https://www.nytimes.com/2023/02/10/business/electric-vehicles-price-cost.html?searchResultPosition=4>, Zugriff 13.02.2023

Ewing, J., N. E. Boudette (2021): A Tiny Part's Big Ripple: Global Chip Shortage Hobbles the Auto Industry <https://www.nytimes.com/2021/04/23/business/auto-semiconductors-general-motors-mercedes.html>, Zugriff 02.02.2023

Fasse, M. (2021): Audi steigt 2026 aus dem Verbrenner aus, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/autobauer-audi-steigt-2026-aus-dem-verbrenner-aus/27298576.html>, Zugriff 17.11.2022

Flaherty, N. (2021): Ford chip deal with GlobalFoundries shakes up Automotive, <https://www.eenewseurope.com/en/ford-chip-deal-with-globalfoundries-shakes-up-automotive-2/>, Zugriff 01.02.2023

Frieske, B., S. Stieler (2022): The ‚Semiconductor Crisis‘ as a Result of the COVID-19 Pandemic and Impacts on the Automotive Industry and Its Supply Chains, *World Electr. Veh. J.*, 13(10), 189

Frieske, B., A. Huber, S. Stieler, L. Mendler (2022): Zukunftsähnige Lieferketten und neue Wertschöpfungsstrukturen in der Automobilindustrie, Stuttgart: e-mobil BW GmbH

Gelowicz, S. (2021): Wegen Chipkrise: Heinze-Gruppe meldet Insolvenz an, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/wegen-chipkrise-heinze-gruppe-meldet-insolvenz-an-a-1060120/?cflt=rel>

Geurkink, J. (2022): Connected Cars. The Next Ubiquitous Computing Platform, <https://pitchbook.com/news/reports/q4-2022-pitchbook-analyst-note-connected-cars>, Zugriff 16.12.2022

Gomoll, W. (2022): Ab wann Sie bei VW nur noch Elektroautos kaufen dürfen, https://www.focus.de/auto/neuheiten/frueher-als-erwartet-ab-wann-sie-bei-vw-nur-noch-elektroautos-kaufen-dueren_id_171496926.html, Zugriff 24.01.2023

Goodman, P./Chokshi, N. (2021): How the World Ran Out of Everything, <https://www.nytimes.com/2021/06/01/business/coronavirus-global-shortages.html>, Zugriff 19.01.2023

Guan, Mingyu et al. (2021): The race to win: How automakers can succeed in a post-pandemic China, McKinsey China Auto Consumer Insights, <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-race-to-win-how-automakers-can-succeed-in-a-post-pandemic-china>, Zugriff 01.10.2021

Günsch, M. (2022): Tesla Model 3: Umstieg von Intel Atom auf AMD Ryzen kostet Reichweite, <https://www.computerbase.de/2022-01/tesla-model-3-umstieg-von-intel-atom-auf-amd-ryzen-kostet-reichweite/>, Zugriff 27.01.2023

Hab, G., R. Wagner (2017): Projektmanagement in der Automobilindustrie. Effizientes Management von Fahrzeugprojekten entlang der Wertschöpfungskette, Wiesbaden: Springer Gabler

Hall, K. (2021): Chip Woes: GM Eliminates Start/stop Feature on some Full-size Trucks, SUVs, <https://eu.detroitnews.com/story/business/autos/general-motors/2021/06/08/chip-woes-gm-eliminates-start-stop-feature-some-trucks-suvs/7605322002/>, Zugriff 16.01.2023

Halfmann, J. (1984): Die Entstehung der Mikroelektronik. Zur Produktion technischen Fortschritts, Frankfurt: Campus

Hammerschmidt, C. (2023): Wolfspeed, ZF Join Forces to Advance SiC Technology, <https://www.eenewseurope.com/en/wolfspeed-zf-join-forces-to-advance-sic-technology/>, Zugriff 01.02.2023

Heidling, E. (2014): Strategische Netzwerke. Kooperation und Interaktion in asymmetrisch strukturierten Unternehmensnetzwerken, in: Weyer, J. (Hg.): Soziale Netzwerke. Konzepte und Methoden der sozialwissenschaftlichen Netzwerkforschung, München: Oldenbourg, 131–160

Heidling, E., A. Ziegler (Hg.) (2022): Von der Pyramide zum Ecosystem – Mit soziotechnischen Innovationen die Zusammenarbeit in der Automobilindustrie stärken. München: ISF München, DOI: https://doi.org/10.36194/HYVALUE_Forschungsreport

- Heimberger, N., T. Holzmann, R. Stuffer (2022): Cross Company Planning im Wertschöpfungsnetzwerk, in: Heidling, E., A. Ziegler (Hg.): Von der Pyramide zum Ecosystem. Mit soziotechnischen Innovationen die Zusammenarbeit in der Automobilindustrie stärken, München: ISF München, 24-38, DOI: https://doi.org/10.36194/HY-VALUE_Forschungsreport
- Hohensee, M. (2023): Tabu-Bruch bei Mercedes, <https://www.wiwo.de/unternehmen/auto/strategie-update-tabu-bruch-bei-mercedes/28997178-all.html>, Zugriff 23.02.2023
- Howley, D. (2021): These 169 industries are being hit by the global chip shortage, <https://finance.yahoo.com/news/these-industries-are-hit-hardest-by-the-global-chip-shortage-122854251.html>, Zugriff 07.02.2023
- Hubik, F., J. Hofer (2022): Machtprobe in der Autoindustrie: Techkonzerne saugen die Gewinne von Mercedes, BMW und VW auf, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/nvidia-google-amazon-machtprobe-in-der-auto-industrie-techkonzerne-saugen-die-gewinne-von-mercedes-bmw-und-vw-auf/28072096.html>, Zugriff 26.01.2023
- Irwin, J. (2023a): Chip giant Qualcomm crafts a new auto industry role, <https://www.autonews.com/ces/how-qualcomm-establishing-its-new-auto-industry-role>, Zugriff 26.01.2023
- Irwin, J. (2023b): The latest numbers on the microchip shortage: another chip thumping for N.A., <https://www.autonews.com/manufacturing/latest-numbers-automotive-microchip-shortage-86>, Zugriff 06.03.2023
- Jakobs, C., P. Tröger (2017): Quo vadis, AUTOSAR?, in: M. Eibl, M. Gaedke (Hg.): INFORMATIK, Lecture Notes in Informatics, Gesellschaft für Informatik, Bonn
- Johnson S. et al. (2018): Industrial DevOps. Applying DevOps and Continuous Delivery to Significant Cyber-Physical Systems, Portland: IT Revolution
- Jürgens, U., T. Malsch, K. Dohse (1989): Moderne Zeiten in der Automobilfabrik. Strategien der Produktionsmodernisierung im Länder- und Konzernvergleich, Berlin u.a.: Springer
- Jürgens, U., H.-R. Meißner (2005): Arbeiten am Auto der Zukunft. Produktinnovationen und Perspektiven der Beschäftigten, Berlin: ed. Sigma
- Kalkowski, P., O. Mickler (2015): Kooperative Produktentwicklung. Fallstudien aus der Automobilindustrie, dem Maschinenbau und der IT-Industrie, Baden-Baden: Nomos
- Katasaliaki, K., P. Galetsi, S. Kumar (2022): Supply Chain Disruptions and Resilience: A Major Review and Future Research Agenda, *Annals of Operations Research* 319, 965–1002
- Kessler, S. (2017): The connected car of the future could kill off the local auto repair shop, https://qz.com/1054261/the-connected-car-of-the-future-could-kill-off-the-local-auto-repair-shop?utm_source=pocket_rec, Zugriff 17.01.2023
- Kiebler, L., D. Ebel, P. Klink, S. Sardesai (2020): Risiko-management disruptiver Ereignisse in Supply Chains, Dortmund: Fraunhofer IML
- Kim, C.-R. (2022): Down on Chips, Toyota Goes Back to Basics with Car Keys, <https://www.reuters.com/article/toyota-key-idCAKBN2RM0AY>, Zugriff 02.02.2023
- Kim, G. (2021): Exploring COVID-19 and Just-in-Time Supply Chains, Chaos Engineering, and the Soviet Centrally Planned Economy with Dr. Steve Spear, <https://itrevolution.podbean.com/e/exploring-covid-19-and-just-in-time-supply-chains-chaos-engineering-and-the-soviet-centrally-planned-economy/>, Zugriff 31.01.2023
- Kim, G., J. Humble, P. Debois, J. Willis, N. Forsgren (2022): The DevOps Handbook, Second Edition, Portland: IT Revolution
- Knauer, M. (2022): Chiphersteller im Dauerhoch, in: Automobilwoche 5, 21. Februar, 12
- Knie, A. (1991): Diesel – Karriere einer Technik. Genese und Formierungsprozesse im Motorenbau, Berlin, ed. Sigma
- Kouthon, T. (2022): Automotive Architectures: Domain, Zonal and the Rise of Central, <https://www.eetimes.com/automotive-architectures-domain-zonal-and-the-rise-of-central/>, Zugriff 27.01.2023
- Köster, K. (2021): Daimler darf Ausstattung nicht einseitig kürzen, <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.chipkrise-bei-daimler-daimler-darf-ausstattung-nicht-einseitig-kuerzen.591c0fd8-a17a-466f-b173-db45b139eb19.html?reduced=true>, Zugriff 02.02.2023
- Kuhlmann, M. (2004): Modellwechsel? Die Entwicklung betrieblicher Arbeits- und Sozialstrukturen in der deutschen Automobilindustrie, Berlin: ed. Sigma
- Kurtz, C. F., D. J. Snowden (2003): The New Dynamics of Strategy: Sense-making in a Complex and Complicated World, in: IBM Systems Journal, 42 (3), 462–483

Labs, L. (2022): TSMC startet Chip-Fertigung mit 3 Nanometer Strukturbreite, <https://www.heise.de/news/TSMC-startet-Chip-Fertigung-mit-3-Nanometer-Strukturbreite-7443773.html>, Zugriff 17.01.2023

Lambert, F. (2021): Elon Musk Puts Renesas and Bosch on Blast for Tesla's 'Extreme Supply Chain Limitations', <https://electrek.co/2021/08/12/elon-musk-puts-renesas-bosch-on-blast-for-tesla-extreme-supply-chain-limitations/>, Zugriff 22.02.2023

Lambert, F. (2022): Tesla Reportedly Places Massive Order of Next-Gen Self-Driving Chips with TSMC, <https://electrek.co/2022/11/21/tesla-massive-order-next-gen-self-driving-chips-tsmc/>, Zugriff 02.02.2023

La Rocco, N. (2022): Chip-Knappheit: BMW reicht Android Auto und CarPlay per OTA-Update nach, <https://www.computerbase.de/2022-05/chip-knappheit-bmw-reicht-android-auto-und-carplay-per-ota-update-nach/>, Zugriff 02.02.2023

Lechowski, G., M. Krzywdzinski, T. Pardi (2023): A Government-Driven Sectoral Transformation French and German Policy Responses to the COVID-Crisis in the Automotive Industry, in: International Journal of Automotive Technology and Management, 23(1), im Erscheinen.

Lee, H. L., V. Padmanabhan, S. Whang (1997): The Bullwhip Effect in Supply Chains, in: MIT Sloan Management Review, 38(3), 93-102

Lee, L. (2021): Malaysian chip makers still struggling to meet demand, association says, <https://www.reuters.com/technology/malaysian-chip-makers-still-struggling-meet-demand-association-says-2021-08-26/> Zugriff 02.02.2023

Leen, G., D. Heffernan (2002): Expanding Automotive Electronic Systems, in: Computer 35(1), 88-93

Li, L., F. Cheng-Ting, P. Hollinger, K. Hille (2022): TSMC in talks to build first Europe chip plant in Germany, <https://asia.nikkei.com/Business/Tech/Semiconductors/TSMC-in-talks-to-build-first-Europe-chip-plant-in-Germany>, Zugriff 26.01.2023

Lilly, A. (2020): The Current State of Automotive Software Related Recalls, <https://www.sibros.tech/post/the-current-state-of-automotive-software-related-recalls>, Zugriff 19.01.2023

Lindemann, A. (2019): Leistungselektronik, in: Tschöke, H., P. Gutzmer, T. Pfund (Hg.): Elektrifizierung des Antriebsstrangs. Grundlagen vom Mikro-Hybrid zum vollelektrischen Antriebsstrang, Wiesbaden: Springer, 53-60

Lüthje, B. (2001): Standort Silicon Valley. Ökonomie und Politik der vernetzten Massenproduktion, Frankfurt/M. & New York: Campus

Matthes, S., S. Menzel (2021): VW-Chef: »Das Thema Software ist die große Herausforderung«, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/innovationweek/herbert-diess-im-gespraech-vw-chef-das-thema-software-ist-die-grosse-herausforderung/27171778.html>, Zugriff 26.01.2023

McLain, S. (2021): Auto Makers Retreat From 50 Years of 'Just in Time' Manufacturing, <https://www.wsj.com/articles/auto-makers-retreat-from-50-years-of-just-in-time-manufacturing-11620051251>, Zugriff 19.01.2023

Meissner, F., K. Shirokinskiy, M. Alexander (2020): Computer on Wheels. Disruption in Automotive Electronics and Semiconductors, Roland Berger, <https://www.rolandberger.com/en/Insights/Publications/The-car-will-become-a-computer-on-wheels.html>, Zugriff 17.11.2022

Meng Fang, M., W. Zhou (2022): Greening the road: China's low-carbon energy transition and international trade regulation, in: Leiden Journal of International Law, 35, 357-378.

Miller, C. (2022): Chip War. The Fight for the World's Most Critical Technology, New York: Scribner

Mohr, D., H.-W. Kaas, P. Gao, D. Wee, T. Möller (2016): Automotive Revolution – Perspective towards 2030. How the Convergence of Disruptive Technology-Driven Trends Could Transform the Auto Industry, <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/automotive%20and%20assembly/our%20insights/disruptive%20trends%20that%20will%20transform%20the%20auto%20industry/auto%202030%20report%20jan%202016.pdf>, Zugriff 19.01.2023

Morris, D. Z. (2014): Cars with the Boom. Identity and Territory in American Postwar Automobile Sound, in: Technology and Culture, 55(2), 326-353

Munro Associates (2021): Comparing Tesla, Ford & VW's Electrical Architectures, <https://www.youtube.com/watch?v=zRkm6-bBk4U>, Zugriff 25.01.2023

Nathan, A., T. Hari, K. Yuzawa, R. Hall (2021): Exchanges at Goldman Sachs. The Global Chip Shortage: Impact, Outlook and Recovery, <https://www.goldmansachs.com/insights/podcasts/episodes/06-29-2021-hari-yuzawa-hall-f/transcript.pdf>, Zugriff 07.02.2023

Nie, S., L. Liu, Y. Du, W. Zhang (2017): Over-The-Air: How We Remotely Compromised the Gateway, BCM and Autopilot ECUs of Tesla Cars, <https://i.blackhat.com/us-18/Thu-August-9/us-18-Liu-Over-The-Air-How-We-Remotely-Compromised-The-Gateway-Bcm-And-Autopilot-Ecus-Of-Tesla-Cars-wp.pdf>, Zugriff 25.01.2023

Nuttall, C. (2020): Nvidia to Drive Mercedes Cars, <https://www.ft.com/content/090499f6-113d-4e91-a3cc-7bddf26b88d3>, Zugriff 31.01.2023

Oliver Wyman (2020): <https://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2020/mar/car-demand-in-times-of-covid-19.html>, Zugriff 02.02.2023

Parker, D., C. Thomas (2013): Winning Share in Automotive Semiconductors, in: McKinsey (Hg.): McKinsey on Semiconductors Autumn 2013, https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/dotcom/client_service/semiconductors/issue%203%20autumn%202013/pdfs/5_automotivesemiconductors.ashx, Zugriff 17.11.2022

Perez, C. (2002): Technological Revolutions and Financial Capital: The Dynamics of Bubbles and Golden Ages. London: Elgar

Pfeffer, R. et al. (2019): Automated Driving – Challenges for the Automotive Industry in Product Development with Focus on Process Models and Organizational Structure, in: IEEE International Systems Conference (SysCon) 8.-11. April Orlando [FL], DOI: 10.1109/SYSCON.2019.8836779, Zugriff 12.02.2023

Pfeiffer, S., Autoren*innenkollektiv (2023): Arbeit und Qualifizierung 2030 – Essentials. Eine Momentaufnahme aus dem Maschinenraum der dualen Transformation: Transformationserleben – Transformationsressourcen – Transformationsbereitschaft. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Nürnberg.

Porsche Consulting (2022): Strategic Semiconductor Management. From Shortage to Competitive Advantage, <https://newsroom.porsche.com/en/2022/company/porsche-consulting-strategic-semiconductor-management-29912.html>, Zugriff 02.02.2023

Porschen-Hueck, S., Rachlitz, K. (Hg.) (2022): Plattformbasierte Ökosysteme partizipativ gestalten. Ein Framework. München: ISF München. https://doi.org/10.36194/SMARTGENOLAB_2022, Zugriff 02.02.2023

Puls, T., M. Fritsch (2020): Eine Branche unter Druck. Die Bedeutung der Autoindustrie für Deutschland. IW-Report, Nr. 43. Köln

Rattner, S. (2023): America's Must Win Semiconductor War, <https://www.nytimes.com/2023/01/16/opinion/america-biden-semiconductor-tsmc.html>, Zugriff 16.01.2023

Ringel, A. (2021): Wegen Chipmangel: Autozulieferer PWK meldet Insolvenz an, <https://www.produktion.de/wirtschaft/wegen-chipmangel-autozulieferer-pwk-meldet-insolvenz-an-105.html>, Zugriff 07.02.2023

Robert Bosch GmbH (2022): Mit Chips zu »Technik fürs Leben«: Bosch investiert weitere Milliarden in sein Halbleiter-Geschäft, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/mit-chips-zu-technik-fuers-leben-bosch-investiert-weitere-milliarden-in-sein-halbleiter-geschaeft-243715.html>, Zugriff 30.01.2023

Rohde, F. (2020): Continuous Integration as Mandatory Puzzle Piece for the Success of Autonomous Vehicles, SAE Technical Paper 2020-01-0087, DOI: <https://doi.org/10.4271/2020-01-0087>, Zugriff 19.01.2023

Ruwitch, J. (2021): Taiwan Races To Remedy Car Chip Shortage But No End In Sight, Says Economy Minister, <https://www.npr.org/2021/04/28/991270369/taiwan-races-to-remedy-car-chip-shortage-but-no-end-in-sight-says-economy-minist>, Zugriff 31.01.2023

Sakkers, O. (2020): Is TSLA a tech stock or a fashion product?, <https://medium.com/maniv-mobility/is-tsla-a-tech-stock-or-a-fashion-product-578f66ad9e8f>, Zugriff 23.01.2023

Schäuffele, J., T. Zurawka (2016): Automotive Software Engineering, Wiesbaden: Springer

Schäfer, P. (2022): NXP und Elektrobit arbeiten gemeinsam an BMS-Software, <https://www.springerprofessional.de/automobilelektronik---software/batterie/nxp-und-elektrbit-arbeiten-gemeinsam-an-bms-software/23538250>, Zugriff 02.02.2023

Schäfer, P. (2021): Vitesco setzt auf GaN-Leistungs-halbleitertechnologie, <https://www.springerprofessional.de/halbleiter/unternehmen---institutionen/vitesco-setzt-auf-gan-leistungshalbleitertechnologie/19882334>, Zugriff 02.02.2023

Schindhelm, C. (2021): Autozulieferer Bolta-Werke insolvent – 1000 Jobs betroffen, <https://www.br.de/nachrichten/wirtschaft/halbleiterkrise-autozulieferer-bolta-werke-meldet-insolvenz-an,SkJcM8W>, Zugriff 28.09.2021

Schmidtner, M., H. Timinger (2022): Projektmanagement in der automobilen Supply Chain, in: Heidling, E., A. Ziegler (Hg.): Von der Pyramide zum Ecosystem. Mit soziotechnischen Innovationen die Zusammenarbeit in der Automobilindustrie stärken, München: ISF München, 47-61, DOI: https://doi.org/10.36194/HYVALUE_Forschungsreport

Schuh C., W. Schnellbächer, A. Triplat, D. Weise (2022): The Semiconductor Crisis Should Change Your Long-Term Supply Chain Strategy, <https://hbr.org/2022/05/the-semiconductor-crisis-should-change-your-long-term-supply-chain-strategy>, Zugriff 31.03.2023

Scholz, G. (2022): Autoindustrie verbaut die falschen Chips, <https://www.automobilwoche.de/themenwelten/nachfrageboom-und-mangel-halten-autoindustrie-verbaut-die-falschen-chips>, Zugriff 02.02.2023

Shiao, C., B. Kapoor, D. Gerdemann, G. Hertel (2021): A Fundamental Rethink of the Approach Used by Automotive and Industrial Players toward Semiconductors Can Help Boost Supply Chain Resilience, <https://www.kearney.com/technology/article/-/insights/automotive-semiconductor-supply-looking-beyond-yesterday>, Zugriff 31.01.2023

Shih, W. (2022): Why Are Automotive Chips Still In Short Supply?, <https://www.forbes.com/sites/willyshih/2022/11/20/why-are-automotive-chips-still-in-short-supply/?sh=7cac1f32782a>, Zugriff 26.01.2023

SIA (Semiconductor Industry Association), Nathan Associates (2016): Beyond Borders. The Global Semiconductor Value Chain, <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/06/SIA-Beyond-Borders-Report-FINAL-June-7.pdf>, Zugriff 17.11.2022

SIA (Semiconductor Industry Association) (2019): 2019 Factbook, <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2019/05/2019-SIA-Factbook-FINAL.pdf>, Zugriff 17.11.2022

Sinha, S., R. West (2021): Towards an Integrated Vehicle Management System in DriveOS, in: ACM Transactions on Embedded Computing Systems, 20(5), Art. 82

Slavik, A. (2020): Software-Probleme. VW parkt Autos, was das Zeug hält, <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/vw-golf-software-problem-1.4911260>, Zugriff 18.01.2023

Stroh, I. (2017): Automotive im Visier, <https://www.elektroniknet.de/automotive/automotive-im-visier.146976.html>, Zugriff 01.09.2023

Stroh, C. A. (2021): Der Halbleitermangel hat für einen Dämpfer gesorgt, <https://www.automobil-produktion.de/management/der-halbleitermangel-hat-fuer-einen-daempfer-gesorgt-384.html>, Zugriff 26.01.2023

Taub, E. (2016): Your Car's New Software Is Ready. Update Now? <https://www.nytimes.com/2016/09/09/automobiles/your-cars-new-software-is-ready-update-now.html>, Zugriff 17.11.2022

Tesla (2021): Q2 2021 Update, https://tesla-cdn.thron.com/static/ZBOUYO_TSLA_Q2_2021_Update_DJCVNJ.pdf?xseo=&response-content-disposition=inline%3Bfilename%3D%22q2_2021.pdf%22, Zugriff 02.02.2023

Thomiczek, T. (2023): ZF Friedrichshafen investiert 170 Millionen in Halbleiter-Forschung, <https://www.swr.de/swraktuell/baden-wuerttemberg/friedrichshafen/zf-will-sich-bei-halbleiter-werk-im-saarland-beteiligen-100.html>, Zugriff 20.02.2023

Tomlin, B., Y. Wang (2011): Operational Strategies for Managing Supply Chain Disruption Risk, in: Kouvelis, P., L. Dong, O. Boyabatli, R. Li (Hg.): Handbook of Integrated Risk Management in Global Supply Chains, New York: John Wiley & Sons, 79-101

Vdovic, H., J. Babic, V. Podobnik (2019): Automotive Software in Connected and Autonomous Electric Vehicles: A Review. In: IEEE Access 7, 166356–166379

Walsh, D. (2021): How Auto Companies Are Adapting to the Global Chip Shortage, <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/how-auto-companies-are-adapting-to-global-chip-shortage>, Zugriff 19.01.2023

Walton, H. (1957): How Good Is Fuel Injection?, in: Popular Science 170(3), 88-93

Wayland, M. (2020): Led by US, Global Auto Sales Expected to Plummet 22% in 2020 due to Coronavirus, <https://www.cnbc.com/2020/04/21/global-auto-sales-expected-to-plummet-22percent-in-2020-due-to-coronavirus.html>, Zugriff 27.01.2023

Weiß, N., M. Schreieck, M., L. S. Brandt, M. Wiesche, H. Krcmar (2018): Digitale Plattformen in der Automobilbranche – Herausforderungen und Handlungsempfehlungen, in: HMD 55, 349–365

Welsch, J. (1990): Branchenreport 1989/1990. In: M. Kittner (Hg.): Gewerkschaftsjahrbuch1990, 183-229.

Welter, P. (2022): Japan baut nationale Chip-Allianz auf, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/japan-baut-nationale-chip-allianz-auf-ringen-um-halbleiter-18451850.html>, Zugriff 20.12.2022

Welter, P. (2023): Korea plant weltgrößtes Chip-Cluster, <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/samsung-plant-fuenf-neue-chipfabriken-in-suedkorea-18750594.html>, Zugriff 15.03.2023

Wittich, H., P. Lang (2022): Größerer Akku, größerer Preis, <https://www.auto-motor-und-sport.de/elektro-auto/hyundai-ioniq-5-rimac-technik-gegen-id-4/>, Zugriff 19.01.2023

Wittich, H., G. Hebermehl, P. Lang (2022): Verbrenner-Aus ab 2035 – E-Fuels? Mal sehen!, <https://www.auto-motor-und-sport.de/verkehr/eu-klimziel-plan-fit-for-55-verbrenner-ab-2035-tot/>, Zugriff 24.01.2023

Zerfowski, D., J. Crepin (2019): Vehicle Computer. Automotive-Softwareentwicklung neu gedacht, in: ATZ Elektronik, 14(7-8), 36-41

Zhong, R., A. Chang Chien (2021): Drought in Taiwan Pits Chip Makers Against Farmers, <https://www.nytimes.com/2021/04/08/technology/taiwan-drought-tsmc-semiconductors.html>, Zugriff 01.02.2023

Ziegler, A. (2020): Der Aufstieg des Internet der Dinge. Wie sich Industrieunternehmen zu Tech-Unternehmen entwickeln, Frankfurt/New York: Campus

Ziegler, A. (2021): Das Tech-Unternehmen. Zum Fundament eines neuen Unternehmenstypus. Arbeitssoziologische Forschungsergebnisse 01. München: ISF München. DOI: <https://doi.org/10.36194/ArbSozForschung-2021-001>, Zugriff 26.01.2023

Ziegler, A., T. Kämpf, T. Lühr, A. Boes (2020): Varieties of Empowerment – Agile Arbeitsformen in der Praxis, in: Boes, A., K. Gül, T. Lühr, T. Kämpf (Hg.): Empowerment in der agilen Arbeitswelt. Analysen, Handlungsorientierungen und Erfolgsfaktoren, Freiburg u.a.: Haufe, 33-52

ZVEI – Verband der Elektro- und Digitalindustrie (2019): Entwicklung der Halbleiterindustrie 2019. https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Pressebereich/2019-081_Halbleitermarkt_gibt_weltweit_nach/Pr_2019-081_Halbleitermarkt-gibt-weltweit-nach.pdf, Zugriff 17.11.2022

Impressum

Autoren



Dr. Alexander Ziegler ist Wissenschaftler
am ISF München
Kontakt: alexander.ziegler@isf-muenchen.de



Dr. Eckhard Heidling ist Wissenschaftler
und Vorstandsmitglied am ISF München
Kontakt: eckhard.heidling@isf-muenchen.de

Verbundkoordination

Dr. Eckhard Heidling
Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V.
Jakob-Klar-Str. 9
80796 München
www.hyvalue.de
© 2023 ISF München

Empfohlene Zitierweise

Ziegler, Alexander/Heidling, Eckhard (2023): Die Automobilindustrie in der Chip-Krise.
Herausforderungen – Maßnahmen – Gestaltungsfelder, München: ISF München

DOI: https://doi.org/10.36194/HyValue_Chipkrise_2023

Konzept & Redaktion

Alexander Ziegler, Eckhard Heidling

Lektorat

Frank Seiß

Gestaltung

Torsten Royère

GEFÖRDERT VOM



Zusammen.
Zukunft.
Gestalten.



Über das ISF München

Das ISF München ist eines der führenden Forschungsinstitute auf dem Gebiet der Arbeits- und Industriesoziologie in Deutschland. Das 1965 gegründete, unabhängige und gemeinnützige Institut führt in enger Kooperation mit Unternehmen, Verbänden, Gewerkschaften und Betriebsräten sowie anderen Forschungseinrichtungen Forschungs- und Gestaltungsprojekte zum Wandel von Arbeitswelt und Wirtschaft durch. Mit seiner Forschung will es einen Beitrag zur Humanisierung von Arbeit und zur Gestaltung einer nachhaltigen Wirtschaft leisten.



HyValue