

BEITRÄGE AUS DER FORSCHUNG

Band 214

Hartmut Hirsch-Kreinsen

Künstliche Intelligenz und Wandel des Innovationssystems



Impressum

Beiträge aus der Forschung, Band 214

ISSN: 0937-7379

Dortmund 2023

Sozialforschungsstelle Dortmund (sfs)

Fakultät Sozialwissenschaften | Technische Universität Dortmund

Evinger Platz 17

D-44339 Dortmund

Tel.: +49 (0)2 31 – 755-1

Fax: +49 (0)2 31 – 755-90205

Email: information.sfs@tu-dortmund.de

www.sfs.sowi.tu-dortmund.de

Hartmut Hirsch-Kreinsen

Künstliche Intelligenz und Wandel des Innovationssystems

Hartmut Hirsch-Kreinsen

Künstliche Intelligenz und Wandel des Innovationssystems

Zusammenfassung

Der Fokus des Beitrages richtet sich auf die Wechselwirkung zwischen den spezifischen Innovationserfordernissen der Künstlichen Intelligenz und den institutionellen Bedingungen des Innovationssystems. Die These ist, dass sich mit dem Technologiefeld der KI ein spezifischer neuer Innovationsmodus konstituiert. Dieser ist mit den Praktiken und strukturellen Bedingungen des etablierten, ausgeprägt industriell orientierten Nationalen Innovationssystems in Deutschland nur bedingt kompatibel, ja er drängt auf seine Veränderungen und strukturellen Wandel. Die These wird in folgenden Argumentationsschritten entfaltet: Erstens wird der spezifischen Innovationsmodus mit seinen verschiedenen Dimensionen beschrieben. Zweitens werden die strukturellen Konsequenzen dieses Modus für das Nationalen Innovationssystem diskutiert. Drittens wird die Perspektive einer verstärkten Segmentation des Nationalen Innovationssystems ausgeführt und viertens werden konzeptionelle wie auch innovationspolitische Implikationen der Befunde herausgearbeitet.

Abstract

The focus of the article is on the interaction between the specific innovation requirements of artificial intelligence and the institutional conditions of the given innovation system. The thesis is that with the technology field of AI a specific new mode of innovation is being constituted. This is only partially compatible with the practices and structural conditions of the established, distinctly industrially oriented National Innovation System in Germany, in fact it is pushing for changes and structural change. This thesis is elaborated in the following steps: First, the specific innovation mode with its different dimensions is described. Second, the structural consequences of this mode for the National Innovation System are discussed. Third, the perspective of an increased segmentation of the National Innovation System is outlined and fourth, conceptual and innovation-political implications of the findings are discussed.

Inhalt

1. Zur Dynamik der Künstlichen Intelligenz	6
2. KI-Innovationsmodus	8
3. Konsequenzen des KI-Modus	15
3.1 Besonderheiten des deutschen Innovationssystems	15
3.2 Innovationssystem unter Druck	16
3.2 Hohe Steuerungsanforderungen an die Politik	21
4. Perspektiven: Vertiefte Segmentation im NIS	23
5. Implikationen	25
Literatur	28

1. Zur Dynamik der Künstlichen Intelligenz

Gegenstand dieses Beitrages ist die Wechselwirkung technologischer Innovationen mit ihren gesellschaftlichen Bedingungen. Einerseits ist es seit sehr langer Zeit unstrittig, dass technologische Entwicklungen Ergebnis sozial bestimmter Konstruktions- und Aushandlungsprozesse sind (Pinch/Bijker 1984). Andererseits wird zugleich auch davon ausgegangen, dass gesellschaftliche Bedingungen ihrerseits von Technologieentwicklung geformt werden, da Technologie selbst strukturbildend wirkt. Sie setzt Rahmen und Normen für soziales Handeln und ist insofern als soziale Institution zu verstehen (Bender 2005). Thematisiert wird damit eine genuin soziologische Frage. Denn fragt man nach gesellschaftlichen Entwicklungsperspektiven, so ist der Blick auf technologische Innovationen als zentrale Triebkräfte dieser Entwicklung und auf ihre sozialen Konsequenzen unverzichtbar. Insofern ist die Frage nach ihren gesellschaftlichen Genesebedingungen, Verlaufsmustern und Rückwirkungen auf ihre Ausgangsbedingungen seit langem Gegenstand sozialwissenschaftlicher Analyse (Rammer/Schulz-Schäffer 2020).

Diese wechselseitige Beziehung zwischen Technologie und sozialen Bedingungen soll im Folgenden mit Blick auf die Entwicklung der *Künstlichen Intelligenz (KI)* aufgegriffen werden. Der Fokus richtet sich dabei auf den wechselseitigen Zusammenhang zwischen der KI als vor allem in den letzten Jahren boomenden neuen Technologie und den institutionellen Bedingungen des tradierten *Nationalen Innovationssystems (NIS)* in Deutschland. Mit dieser Kategorie wird bekanntlich in der evolutionären und sozialwissenschaftlichen Innovationsforschung jenes gesellschaftliche Teilsystem bezeichnet, dessen Strukturen, Akteurs-konstellationen sowie Routinen und Praktiken stets in enger Wechselwirkung mit Technologieentwicklung und Innovationen stehen (Nelson 1993; Edquist 1997; Lundvall 2007; Blättel-Mink/Ebener 2020). Die Genese neuer Technologien wird danach einerseits als von den institutionellen Bedingungen des Innovationsystems geprägt beschrieben, andererseits ist im Gefolge erfolgreicher technologischer Neuerungen von Rückwirkungen auf seine Institutionen auszugehen (Werle 2005; Markard/Truffer 2008). Obgleich vielfach wegen seiner begrifflichen Unschärfe und schweren Abgrenzbarkeit kritisiert, wird das Konzept des NIS bis als brauchbare Heuristik für die Analyse des Zusammenhangs zwischen der Technologieentwicklung einerseits und gesellschaftlichen Strukturbedingungen andererseits angesehen (z. B. Werle 2005; Fagerberg/Srholec 2008; Godin 2017; Weber/Truffer 2018; Botthof et al. 2020).

Die These des vorliegenden Beitrages ist, dass sich mit dem seit Jahren boomenden Technologiefeld der KI ein spezifischer neuer Innovationsmodus konstituiert. Dieser ist mit den Praktiken und strukturellen Bedingungen des in Deutschland etablierten und institutionalisierten NIS nur bedingt kompatibel, ja er drängt auf seine Veränderungen und strukturellen Wandel. Mit dieser These wird allerdings empirisch keineswegs ein völlig neues Phänomen bezeichnet. Die hier in Frage stehenden Trends zeichnen sich vielmehr seit längerem ab und sind schon in der Vergangenheit im Zusammenhang mit neu aufkommenden Innovationsprozessen der IT- und Softwareentwicklung, generell dem Aufkommen datenbasierter ökonomischer Prozesse beschrieben worden (Winter 2017; Boes et al 2019; ten Hompel et al 2019; Majchrzak/Griffith 2020; Nambisan et al. 2020; Otto 2021; Boes/Langer 2023). Allerdings spitzen sich diese Trends in den letzten Jahren im Kontext der dynamischen KI-Entwicklung zu. Spätestens erkennbar wird dies mit dem Entwicklungsschub des Maschinellen Lernens und

von Methoden des Big Data – dem „Big Bang“ der KI zu Beginn der 2010er Jahre (Görtz et al. 2021: 9). Dabei gerät die KI als global unverzichtbare Schlüsseltechnologie zunehmend ins Zentrum von privaten und staatlichen Innovationsanstrengungen (Bitkom/DFKI 2017; Bundesregierung 2018).

Dass die KI mit den gegebenen Strukturen des NIS nur bedingt kompatibel ist und auf Strukturwandel drängt, resultiert vor allem aus zwei Umständen: Zum einen wurde und wird die KI-Entwicklung hochgradig auf internationaler Ebene vorangetrieben, ihre Innovationsprozesse sind durch vielfältige transnationale Vernetzungen gekennzeichnet und sie ist als globale Technologie mit den gegebenen Praktiken und Strukturen des deutschen Nationalen Innovationssystems (NIS) nur locker gekoppelt. Zum anderen aber verläuft ihre Entwicklung unvermeidbar im nationalspezifischen Rahmen und sie ist in die gegebenen nationalen Strukturbedingungen mit ihren lokalen Ressourcen und institutionellen Regelungen eingebettet, mit denen sich spezifische Handlungsspielräume und Restriktionen verbinden und damit bestimmte konkrete Entwicklungsschwerpunkte gefördert und andere gehindert werden. Insbesondere steht die KI in Deutschland in Wechselwirkung mit einem NIS, das bekanntermaßen bis heute ausgeprägt industriell geprägt ist. Die Folgen sind daher Widersprüche und Inkompatibilitäten im Innovationssystem, ein Druck auf strukturelle Veränderungen und neue Anforderungen an Innovationspolitik. Diesem Zusammenhang soll im Folgenden genauer nachgegangen werden.

Mit dem Begriff KI wird im Prinzip eine breites und bis heute nur schwer überschaubares Wissens- und Technologiefeld angesprochen. Es umfasst, sehr verkürzt, Methoden der symbolbasierten KI und der heuristischen Suche (1970er-Jahre), Expertensysteme (1980er-Jahre), klassisches Maschinelles Lernen und beginnende Robotik (1990er-Jahre), künstliche Neuronale Netze und das sog. Deep Learning (seit den 2010er-Jahren) (Görz et al. 2021). Der Fokus der folgenden Argumentation richtet sich dabei besonders auf die aktuell relevanten und wiederum sehr unterschiedlichen Methoden des Maschinellen Lernens. Methodisch hat die folgende Argumentation eine breite qualitative empirische Basis: Zum einen basiert sie auf den Ergebnissen der Analyse der laufenden wissenschaftlichen, politischen und öffentlichen Diskurse über KI. Zum zweiten beruht die Argumentation auf den Ergebnissen von 19 ausführlichen Expertengesprächen mit KI-Expertinnen und Experten. Zum dritten bedient sich die Analyse einer Reinterpretation vorliegender eigener Forschungsergebnisse über den gesellschaftlichen Digitalisierungsprozess der letzten Jahre.¹

Die These des Beitrags wird in folgenden Argumentationsschritten entfaltet: Erstens wird der spezifischen Innovationsmodus mit seinen verschiedenen Dimensionen beschrieben. Zweitens werden die strukturellen Konsequenzen dieses Modus für das etablierte NIS diskutiert. Drittens wird die Perspektive einer vertieften Segmentation des NIS diskutiert und viertens werden konzeptionelle wie auch innovationspolitische Implikationen der Befunde herausgearbeitet.

¹¹ Vgl. dazu im Einzelnen Hirsch-Kreinsen (2023). Mit dem vorliegenden Beitrag werden Teilergebnisse einer Ende 2022 abgeschlossenen Expertise zusammengefasst. Diese entstand im Rahmen eines vom BMBF geförderten Projektes „KI – Mensch – Gesellschaft“ (KI.Me.Ge), das am Institut für Sozialwissenschaftliche Forschung e.V. (ISF München) durchgeführt wurde (<https://www.kimege.de/>).

2. KI-Innovationsmodus

Im Kontext des deutschen NIS hat die Entwicklung der KI den Charakter einer „Emerging Technology“ (Weber/Truffer 2017). Sie etabliert sich in ihren ersten Entwicklungsphasen in den 1970ern in einer wissenschaftlichen und forschungspolitischen Nische, in der neue Akteure, durch gemeinsame Orientierungen und Versprechungen mehr oder weniger koordiniert, eine neue Forschungsagenda definieren und Schritt für Schritt den daraus folgenden Entwicklungsnotwendigkeiten folgen. Im weiteren Verlauf wird diese Nische, spätestens ab dem Big Bang zu Beginn der 2010er Jahre deutlich erweitert und es konstituiert sich ein stabiles soziotechnisches Feld, das eine Systemebene mit spezifisch neuer Logik im deutschen NIS konstituiert. Das zentrale Merkmal ist ein KI-spezifischer Innovationsmodus. In Anschluss an eine schon ältere wissenschafts- und innovationssoziologische Debatte kann davon gesprochen werden, dass sein zentrales Merkmal ein spezifischer Modus der Wissensgenese ist, der bisherige Innovationsmuster transzendiert (Gibbons et al. 1994; Nowotny et al. 2001).

Transdisziplinarität

Hervorstechendes Merkmal des KI-Innovationsmodus ist seine Transdisziplinarität und die Öffnung und Verschränkung der Entwicklerseite mit unterschiedlichsten entwicklerexternen Wissensquellen und Anwendungsfeldern. Ein entscheidender Faktor ist hierbei die Erkenntnis, dass relevantes Innovationswissen oft nur jenseits der Grenzen von Entwicklungseinrichtungen wie Unternehmen und Instituten verfügbar ist und durch eine Ausweitung der Innovationsaktivitäten nutzbar gemacht werden muss (De Groote/Backmann 2019). Zentral ist hierfür die Beteiligung einer wachsenden Zahl heterogener Akteure aus unterschiedlichsten Wissensdomänen (Warnke et. al. 2016; Weber/Tuffer 2017).

Da es sich bei KI prinzipiell um eine *General Purpose Technology* (Brynjolfsson/McAfee 2014) handelt, bedarf ihr Design stets einer funktionalen Abstimmung mit den Bedingungen des konkreten Anwendungsfeldes, für das sie entwickelt wird. Nach Ansicht vieler KI-Wissenschaftler gilt dies nicht nur für ausgesprochen anwendungsorientierte Entwicklungen, sondern auch für Grundlagenforschung, die mit „problembezogener Forschung“, d. h. Anwendungsorientierung verschmolzen werden müsse. Denn, so die Begründung, erst dann könnten die Potenziale der KI wirklich erkannt und ausgeschöpft werden.² Dabei wird eine disziplinenübergreifende Kooperation etwa mit ingenieurwissenschaftlichen Fächern wie Regelungstechnik oder Maschinenbau als eine der zentralen Voraussetzungen für eine Weiterentwicklung von KI-Systemen in Richtung ihrer erleichterten und schnellen Anwendung angesehen (Kersting/Tresp 2019: 11). Darüber hinaus wird auch eine kontinuierliche Zusammenarbeit zwischen KI-Wissenschaft und Unternehmen als unabdingbar angesehen; einerseits soll damit die hohe Entwicklungsdynamik der KI-Technologie den Unternehmen vermittelt werden, andererseits geht es auch dabei um die Integration der verschiedenen Wissensdomänen in die KI hinein (Ecker et al. 2021: 16). Schließlich sind auch breit gestreute Anwendererfahrungen und Expertise in Hinblick auf soziale, ethische oder auch ökologische Implikationen der Innovation gefragt. Auch in dieser Hinsicht kann Transdisziplinarität als unverzichtbar

² So führende Wissenschaftler der KI in einem Interview über den Stand der Förderung und Forschung in Deutschland (Science Media Center 2021).

angesehen werden, da insbesondere forschungspolitisch mit dieser Technologie auch auf die Bewältigung komplexer gesellschaftlicher und ökologischer Probleme gezielt wird (z. B. Bundesregierung 2018).

Fluide Interaktion und Koordination

Der neue Modus der KI-Innovation ist von fluiden und beschleunigten Mustern der Interaktion und Koordination zwischen den beteiligten Akteuren geprägt. Diese stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Transdisziplinarität und Öffnung der Innovationsprozesse. In diesem Sinn ist die Rede von einer „neuen Natürlichkeit“ in der Zusammenarbeit zwischen KI-Forschung und vielen Anwendungsbereichen, insbesondere Unternehmen (Ecker et al. 2021: 4). Dabei geht es nicht nur um eine Öffnung und Erweiterung von Kooperationen, sondern auch um die Beschleunigung der Innovationsprozesse selbst. Zwei eng miteinander verschränkte Faktoren spielen hierbei eine besondere Rolle:

- Zum einen Innovationsstrategien von Unternehmen, die Prinzipien der sog. Open Innovation folgen. Der Begriff bezeichnet bekanntlich die Öffnung von vormalig organisationsinternen Innovationsprozessen nach außen und den Einbezug einer wachsenden Zahl von unternehmensexternen Akteuren. Das Ziel ist eine unternehmensstrategische Nutzung verschiedenster Wissensquellen zur Vergrößerung des Innovationspotenzials und zur Stimulierung neuer und vor allem auch radikaler Innovationen und ihrer erfolgreichen Vermarktung (West et al. 2014).
- Zum anderen die wachsende Bedeutung von sog. Open Source-Entwicklungen im Softwarebereich; sie zielen auf die Öffnung eingespielter und damit oft pfadabhängiger Innovationsbeziehungen im Software- und IT-Bereich und wirken somit innovationshemmenden Monopolisierungstendenzen durch große Tech-Konzerne bei der Softwareentwicklung entgegen. Damit wird das Ziel verfolgt, neue Innovationspotenziale und Anwendungsmöglichkeiten zu erschließen und die Prozesse einmal mehr zu beschleunigen (z. B. Laguna de la Vera/Ramge 2021; Forschungsbeirat/acatech 2022).

Auf diese Weise etablieren sich digitale und wenig strukturierte Koordinationsmodi mit einer größeren Zahl von Partnern. Besonders relevant dürfte hier die Implementation von internet- bzw. plattformgestützten Interaktionsprozessen zwischen den Beteiligten sein. Dieser Wandel wird in der einschlägigen Forschung und Politik mit dem Begriff des *Innovation Ecosystem* diskutiert.³ Damit wird ein offenes, relativ unstrukturiertes Innovationsmuster bezeichnet. Eine Voraussetzung sind die digital gestützten Kommunikations- und Interaktionsprozesse, die eine deutliche Erweiterung der Anzahl der an Innovationen beteiligten Partner aus unterschiedlichsten Disziplinen, Sektoren und Milieus erlauben. In der Perspektive digitaler Innovationen bezeichnen Ann Majchrzak und Terri L. Griffith diesen Wandel als „‘sociotechnical self-orchestration’, defined as encouraging actors to engage in temporarily integrated acts of temporarily involved actors to suggest and execute on solutions to problems that surface unpredictably when striving to meet higher-order wicked problems“ (Majchrzak/Griffith

³ Dieser Begriff wird unterschiedlich und häufig unscharf verwendet. Beispielsweise wird darunter verstanden: „The evolving set of actors, activities, and artifacts, and the institutions and relations, including complementary and substitute relations, that are important for the innovative performance of an actor or a population of actors“ (Granstrand/Hogersson 2020).

2020: 18). Zunehmend spielen dabei verschiedenste Organisationen eine unverzichtbare koordinierende Funktion, die Rede ist verschiedentlich auch von „Neuen Intermediären“. Es handelt es sich dabei – „well beyond the range of usual suspects“ – um nicht nur mehr Entwickler und Anwender der verschiedensten Provenienz, sondern auch um staatliche Transfer- und Regulationsinstanzen und Beratungsfirmen bis hin zu Akteuren aus der Zivilgesellschaft (Weber/Truffer 2017: 109).

Verschiedentlich ist damit eine Tendenz zur digitalen Enträumlichung des Wissensaustauschs verbunden: Zum einen wird ein Ecosystem als quer liegend zu den bisherigen regionalen, sektoralen oder nationalen Systemgrenzen angesehen. Es umfasst die unterschiedlichsten Kooperations- und Interaktionsmuster. Häufig bildet sich in Ecosystemen auch eine spezifische interdisziplinäre und offene Innovationskultur heraus. Dieser Zusammenhang wird als eine der zentralen Voraussetzungen für flexible und schnelle Innovationen, wie sie durch KI notwendig werden, angesehen. Zum anderen sind in dieser Perspektive Innovationen eng mit gewandelten Agglomerationseffekten verknüpft und verstärken räumliche Konzentrationseffekte. Städte dienen dabei als "Integratoren" der vielfältigen Einflüsse auf Innovation. Gesprochen werden kann, vor allem im Kontext von KI, von einer Urbanisierung von Innovationsprozessen: Die ist etwa Resultat der wachsenden Bedeutung von Startups für KI-basierte Innovationen, die sich vorzugsweise in urbanen Agglomerationen ansiedeln. Städte können in diesem Sinne zunehmend als Räume multipler lokaler Systemtransformation und der Genese zentraler Merkmale des Innovationsmodus begriffen werden (Gornig et al. 2018).

Wandel der Akteurskonstellation

Wie schon angedeutet, ist diese Situation wesentlich von einer breiten und wechselnden Konstellation heterogener Akteure geprägt, die an KI-Innovationen beteiligt sind. Dabei handelt es sich zunächst einmal um eine als KI-Community zu bezeichnende Gruppe, die seit Beginn der 2000er Jahre die Entwicklungsdynamik der KI vorantreibt. Der Kern dieser Community wird von der Wissenschaftsdisziplin der KI gebildet. Sie umfasst darüber hinaus IT- und Softwareunternehmen sowie an KI interessierte große Industrieunternehmen etwa aus der elektrotechnischen Branche. Dabei erfährt die Community ihre fortlaufende Ausweitung durch eine wachsende Zahl interessierter Akteure aus den verschiedensten gesellschaftlichen Bereichen. Zu nennen sind hier zunächst einmal Politikvertreter*innen unterschiedlichster Provenienz sowie etablierte Unternehmen etwa aus der elektrotechnischen oder IT-Branche. Hinzu kommen KI-affine Startups sowie vermehrt auch Berater*innen und Intermediäre etwa aus Verbänden und regionalen bzw. kommunalen Einrichtungen sowie Vertreter*innen der Zivilgesellschaft. Beschleunigt wird zudem die Ausweitung der Akteurskonstellation durch die Open Source-Entwicklungsstrategien, mit der Softwaresysteme gerade auch im Bereich KI als eine gemeinsam von vielen Akteuren zu nutzende und zu entwickelnde verteilte Infrastruktur angesehen werden (Laguna de la Vera/Ramge 2021: 178ff.).

Insgesamt zeichnet sich daher eine widersprüchliche Tendenz ab: einerseits sind sowohl der Innovationsdiskurs als auch die Zielsetzungen und Entwicklungsperspektiven des Innovationssystems zunehmend informatikgetrieben. Andererseits aber weitet sich der Kreis von relevanten Akteuren im NIS deutlich über den Kern der Informatik und KI hinaus aus. Denn die Zahl der sozialen Orte, an denen Wissen produziert wird und die im Verlauf von Innovationen miteinander abgestimmt und koordiniert werden müssen, nimmt deutlich zu. Dies lässt sich

seit längerem beobachten, steht aber wohl erst am Anfang einer noch breiteren Entfaltung. Denn fraglos erfährt die Digitalisierung der Gesellschaft krisenbedingt gegenwärtig einen deutlichen Schub, der auf einer Vielzahl neuer technologischer Lösungen basiert (Wessels 2020).

Agile Unternehmensstrategien

Treibendes Moment des KI-Innovationsmodus sind offene und – mit einem häufig gebrauchten Label – als „agil“ bezeichnete Innovationsstrategien von Unternehmen (ten Hompel et al. 2019). Agilität wird verstanden als die Fähigkeit zu vorausschauenden und flexiblen Strategien angesichts der schnellen technologischen Entwicklung und generell kaum zu antizipierenden gesellschaftlichen und ökologischen Bedingungen (Weber et al. 2021). Solche Innovationsstrategien zielen vor allem auf die dynamische Nutzung von Daten. Denn für aussichtsreiche Innovationen, nicht nur im Feld der KI, sondern generell im Feld digitalisierter Produkte und Services, ist die Fähigkeit entscheidend, Daten zu nutzen und zu beherrschen. Basis hierfür sind einerseits verfügbare Daten, andererseits aber werden zugleich mit ihren Anwendungen neue Daten generiert. Anders formuliert, die „Welt der Daten“ eröffnet vielfältige, komplexe und ex ante nur schwer fassbare Innovationspotenziale und es werden völlig neue Daten mit neuen Nutzungsmöglichkeiten geschaffen (Boes/Lange 2023).

Dies impliziert nicht nur die Abkehr von kalkulierbaren Entwicklungspfaden und inkrementellen Innovationen, sondern Produkte und ihre Funktionalitäten wandeln sich dadurch kontinuierlich. Besonderes Merkmal dieser neuen Strategien ist, dass Innovationen nicht, wie traditionell in sequentieller Weise, bis ins letzte Detail durchdacht und finalisiert werden, sondern im Kontext eines flexiblen Feedbacks zwischen Entwicklung und Anwendung und weiterer Innovation kontinuierlich vorangetrieben werden (Otto 2021). Diese Öffnung von Innovationen in den Unternehmen geht einher mit der Tendenz, dass diese nicht mehr in geschlossenen Entwicklungsabteilungen erbracht werden, sondern Interaktionszusammenhänge relevant werden, die oben als Ecosystem beschrieben worden sind (Boes/Lange 2023). Organisatorisches Pendant ist, dass Innovationen in permanenten Lernschleifen mithilfe neuer Designmethoden (SCRUM etc.) durchgeführt werden, um digitalisierte Produkte kontinuierlich und beschleunigt zu innovieren und insbesondere auch über neue Geschäftsmodelle etablierte Märkte umzuwälzen (ten Hompel et al. 2019; Boes/Kämpf 2021).

Ein viel diskutiertes Stichwort zur Charakterisierung dieses Wandels sind die erwähnten Strategien von Open Innovation (West et al. 2014). Eine ähnliche Zielsetzung verfolgen Konzepte des Crowdsourcing bei der Entwicklung von Prototypen. Damit soll über das Internet an eine Gruppe von interessierten, aber im Prinzip unbekannten und verteilten Akteuren die Softwareentwicklung übertragen werden (ten Hompel et al. 2019). Damit findet eine Verlagerung der Erzeugung von Wissen und Innovationen aus disziplinär und sektoral bestimmten Kontexten in breiter definierte ökonomische und soziale Zusammenhänge statt.

Diese neuen Strategien finden sich ausgeprägt im Feld der Startups, denn sie sind konstitutiv für diesen Innovationswandel. Sie finden sich aber auch zunehmend bei Forschungseinrichtungen und technologieintensiven, schon etablierten Unternehmen, die sich als Hersteller und Anwender systematisch mit den neuen Potenzialen von KI und Digitalisierung ausei-

nersetzen. Insgesamt gewinnen daher die Organisation und die Gestaltung von Innovationsprozessen sowohl für Unternehmen als auch für Forschungsinstitute einen immer komplexeren Charakter (ebd.).

Erweiterte Kompetenzprofile

Konsequenz der Transdisziplinarität der Innovationsprozesse und des Wandels von Innovationsstrategien der Unternehmen sind deutlich erweiterte Anforderungen an die Kompetenzprofile des damit befassten Personals. Die hierzu vorliegenden Forschungsergebnisse resümierend, lässt sich als Generaltrend festhalten: in nahezu allen Beschäftigtensegmenten und auf den unterschiedlichsten Handlungsebenen ist eine wachsende Bedeutung IT- und KI-orientierter Schlüsselkompetenzen in verschiedenen Dimensionen beobachtbar (Gesellschaft für Informatik 2019; André und Bauer 2021: 16ff.):

- Zum einen geht es um Kompetenzen, die sich im weitesten Sinn auf den „Umgang mit KI-Systemen“ richten. Dabei handelt es sich um Kompetenzen in Hinblick auf die Gestaltung und die Nutzung von Mensch-Maschine-Interaktionen sowie um sog. interdisziplinäre Metakompetenzen, die für die Entwicklung von KI-Systemen notwendig werden. Diese bauen auf Kenntnissen über Maschinelles Lernen, wissensbasierte Systeme oder mathematische Logik auf, wobei generell ein kompetenter Umgang mit Daten zentral erachtet wird.
- Zum zweiten handelt es sich um die „Gestaltung des Kontextes der KI-Systeme“, um KI als technologisches Element in der Anwendung zu verstehen und darauf basierende Arbeits- und Change-Prozesse weiterzuentwickeln und zu steuern.
- Zum dritten ist ein als „Fach- und Grundwissen“ zu bezeichnender Komplex von Kompetenzen bedeutsam. Dies umfasst einerseits jene Kompetenzbereiche, die für die inhaltlich-fachliche Bewältigung von Aufgaben notwendig sind. Andererseits werden Fähigkeiten hervorgehoben, die fachlichen Aufgaben mit den neuen digitalen Anforderungen der KI zu verknüpfen und die spezifischen Anwendungsmöglichkeiten der KI auszuloten.

Damit gewinnt das Fach- und Grundlagenwissen einen tendenziell interdisziplinären Charakter, insofern es die Voraussetzung ist, unterschiedliche, aber für KI-Entwicklung und Nutzung relevante Wissensdomänen in der angesprochenen transdisziplinären Perspektive zu verknüpfen. Angesichts des schnellen technologischen Wandels sind die geänderten Kompetenzanforderungen zudem begleitet von einem hohen Bedarf an kontinuierlicher aber auch flexibler Weiterbildung in allen Erwerbssegmenten (EFI 2021: 54 ff.).

In Hinblick auf die institutionelle Verfassung des etablierten Systems von beruflicher Bildung und Weiterbildung hat dieser Trend erhebliche Konsequenzen. Denn es muss gewährleistet werden, dass die erforderlichen neuen Kompetenzen über die primäre bis zur quartären Bildung angesichts der schnellen technologischen Entwicklung und damit einhergehender neuer Herausforderungen weiterentwickelt und bereitgestellt werden (acatech et al. 2016; EFI 2021). Insofern sind das Bildungssystem und insbesondere auch das System der beruflichen Weiterbildung gefordert, für die Innovationsfähigkeit von Unternehmen und die Leistungsfähigkeit der Wissenschaft flexibel neue Kompetenzprofile vorausschauend zu erkennen und zeitgerecht verfügbar zu machen (Wilbers/Esser 2022).

Internationalisierung und Ausdifferenzierung von Innovationsebenen

Transdisziplinarität und eine wachsende Zahl an KI direkt oder indirekt beteiligter Akteure implizieren die Ausdifferenzierung von Handlungs- und Politikebenen der KI-Innovation. Der Innovationsmodus beschränkt sich nicht lediglich auf den etablierten institutionellen Rahmen eines NIS. Vielmehr verlaufen KI-Innovationen auf räumlich und institutionell sehr unterschiedlichen Ebenen und es bildet sich ein Mehrebenensystem der KI-Innovation heraus.

Obgleich einflussreiche KI-Community und die innovationspolitische KI-Förderung zunächst einmal im nationalen Rahmen zu verorten sind, lässt sich die KI-Dynamik nur sehr bedingt national begrenzen. Denn die deutsche KI ist von Anbeginn ihrer Entwicklung an hochgradig international vernetzt und entscheidende Innovationsanstöße kommen immer wieder aus den USA (z. B. Bibel/Furbach 2018; Hirsch-Kreinsen 2023). Insofern verlaufen KI-Innovationen ausgeprägt auf einer global übergreifenden transnationalen Ebene mit einer eigenen Handlungs- und Innovationslogik. Vor allem werden sie dabei von den großen international agierenden „Hyperscalern“ beeinflusst. Diese Situation betrifft zum einen seit langem die wissenschaftliche Ebene, wo es um den Austausch von Themen und Forschungsperspektiven, aber auch um Konkurrenz um wissenschaftliches Personal – von Nachwuchs bis hin zu Spitzenforschenden – geht. Dies betrifft zum zweiten die Ebene der an der KI-Entwicklung beteiligten Unternehmen, vor allem auch viele Startups, die ausgeprägt international agieren. Das heißt, es bilden sich gerade auch im internationalen Maßstab KI-spezifische Innovationsbeziehungen heraus. So wird beispielsweise im Kontext der KI-Entwicklung die Schaffung eines hierauf ausgerichteten, europäischen Ecosystems diskutiert und angestrebt (EU 2020).

Diese gleichsam oberhalb der nationalen Ebene angesiedelten transnationalen Beziehungen sind zugleich aber auch von einer Clusterbildung „unterhalb“ der jeweiligen nationalen Ebene begleitet. Dabei handelt es sich um regionale und lokale Agglomerationen, in denen KI-Innovationen von einer großen Zahl eng vernetzter unterschiedlichster Akteure vorangetrieben werden. Nicht nur in den USA, sondern gerade auch in Deutschland finden sich eindrucksvolle Beispiele für die Bedeutung lokaler Cluster für die KI-Entwicklung. Ein viel zitiertes Beispiel hierfür ist das sog. Cyber Valley im Raum Tübingen, das seit 2016 maßgeblich im von der dortigen Landesregierung gefördert wird. Es gilt als Europas größtes regionales Forschungskonsortium im Bereich der künstlichen Intelligenz mit Partnern aus Wissenschaft und Industrie (Uni Tübingen 2022). Auf ähnliche Clustereffekte zielen die von verschiedenen staatlichen Ebenen geförderten sog. KI-Kompetenzzentren.⁴

Missionsorientierung der Politik

Weiteres Moment des spezifischen KI-Innovationsmodus ist ein Wandel der öffentlichen Forschungs- und Innovationspolitik auf ihren verschiedensten Ebenen. Sie fokussiert sich zu-

⁴ Vgl. <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/kurzmeldungen/de/2022/06/50-millionen-foerderung-fuer-ki-kompetenzzentren.html> (abgerufen am: 11.01.2023)

nehmend auf ausgewählte Technologiebereiche, die als sog. Schlüsseltechnologien als essentiell für die zukünftige ökonomische und gesellschaftliche Entwicklung angesehen werden (Kroll et al. 2022). Dabei richtet sich spätestens seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrzehnts ein besonderer Fokus auf die KI (EFI 2022: 40 ff.).

Dieser Politikwandel, der von einer ausgeprägten Fokussierung auf bestimmte Technologien und damit verbunden auf gesellschaftliche Herausforderungen charakterisiert ist, wird in der einschlägigen Debatte als Missionsorientierung der Innovationspolitik gefasst (Mazzucato 2018; Cuhls et al. 2019; Haddad et al. 2022). Zum einen ist hierfür die Bereitschaft zum proaktiven, strategischen und normativen staatlichen Handeln gefragt (Botthof et al. 2020). Zum zweiten wird Prognosefähigkeit von Politik unabdingbar (ebd.). Denn Vorausschau wird zentral für die Verständigung über Problemlagen, über den Status quo und über Direktionalität von anzustoßenden Innovationen, eben insbesondere der weiteren Entwicklung von KI. Zum dritten bedarf Innovationspolitik mehr und mehr der Legitimation und der Akzeptanz im öffentlichen Diskurs. Eine wesentliche Herausforderung ist hierbei, die Förderung neuer Technologien mit weiteren gesellschaftlichen Herausforderungen zu verknüpfen und auf diese Weise allgemein als wünschenswert angesehene soziale Zielsetzungen zu verfolgen. Die mit der KI-Förderung eng gekoppelte Ethikdebatte ist hierfür ein Beispiel (z. B. Krokowski/Hirsch-Kreinsen 2022). Zum vierten muss Innovationspolitik zunehmend versuchen, überzeugend medien- und öffentlichkeitswirksam zu agieren. In diesem Sinn kann mit KI der interessierten Öffentlichkeit ein überaus bedeutsames „Leuchttumprojekt“ präsentiert werden. Dabei versucht Innovationspolitik über allgemein akzeptierte Symbolik und Labels in der Öffentlichkeit Zustimmung zu gewinnen, vor allem soll gesellschaftlicher Aufbruch und Modernisierung signalisiert werden (Weber/Truffer 2017: 109).

Dies bedeutet, dass Innovationspolitik auch dem Faktor Zeit, insbesondere einem schnellen und effektiven Transfer von Innovationen eine wachsende Bedeutung zumisst; einschlägige Termini sind hier Scaling, Agilität, Diffusion, Transfer und Generalisierung von Innovationen (ten Hompel et al. 2019). Im Kern geht es dabei um eine Abkehr von der Rolle eines Staates als Rahmensetzer und „Enabler“ hin zu einem richtungsgebenden und innovationstreibenden Staat (Weber/Rohracher 2012; Mazzucato 2013). Die Gründung der „Agentur für Sprunginnovation“ im Jahr 2019 ist hierfür ein deutlicher Beleg. Sie soll, so das erklärte Ziel, „revolutionäre“ und „disruptive“ Innovationen anstoßen und „den Durchbruch hochinnovativer Ideen in den Markt unterstützen und beschleunigen“ (Laguna de la Vera/Ramge 2021: 110ff.).

Erweitertes Verständnis von Innovation

Schließlich sind der KI-Innovationsmodus wie insbesondere der Wandel der Innovationspolitik von einem deutlich erweiterten Verständnis von Innovation gekennzeichnet, denn es wird um einen intensiven Diskurs über die gesellschaftlichen Konsequenzen neuer Technologie und ihre Lösungspotenziale für gesellschaftliche Problemlagen erweitert. Insofern gewinnt der Begriff Innovation eine neue Bedeutung; er entwickelt sich von einem im politischen und gesellschaftlichen Diskurs primär auf wissenschaftliche und wirtschaftliche Entwicklung ausgerichteten Konzept zu einem, das Veränderung in der Gesellschaft und das Lösen gesellschaftlich formulierter Probleme umfasst. Zwar werden mit der Auffassung von KI als Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts ungebrochene ökonomische Wachstums- und Fortschrittsperspektiven verbunden. Jedoch werden zugleich, wie die Rhetorik des KI-Diskurses

deutlich macht, mit dieser Innovation vor allem auch Lösungsmöglichkeiten für drängende gesellschaftspolitische Herausforderungen verknüpft (z. B. Bundesregierung 2018). Die Erwartungen beschränken sich nicht allein auf technologische Perspektiven, vielmehr werden explizit positiv konnotierte gesellschaftliche Zukunftsperspektiven formuliert. Zudem werden ausgehend vom laufenden Innovationsdiskurs vermehrt sozialwissenschaftliche und ethische Fragen zu Themen der Forschungsagenda diskutiert. So sprechen KI-Wissenschaftler davon, dass ethische Fragen systematischer als bisher bearbeitet werden sollten und eine „verantwortungsbewusste KI“ angestrebt werde sollte (Science Media Center 2021).

Auf Grund dieses Nexus von technologischen Potentialen und gesellschaftlichem Wandel umfasst das Innovationsverständnis weit mehr als nur technologisch orientiertes Versprechen und Erwartungen. Vielmehr wird mit neuen Technologien eine weit in die Zukunft weisende gesellschaftliche Perspektive verbunden. Eine Konsequenz ist, dass gesellschaftspolitische, ethische wie aber auch rechtliche Herausforderungen der KI zunehmend als integraler Bestandteil der KI-Forschung und Technologieentwicklung verstanden werden (Bundesregierung 2020).

3. Konsequenzen des KI-Modus

3.1 Besonderheiten des deutschen Innovationssystems

Wie eingangs hervorgehoben, etabliert sich der KI-Innovationsmodus im institutionellen Kontext des etablierten deutschen NIS. Er trifft dabei auf ein strukturelles Arrangement, das sich im internationalen Vergleich in der Vergangenheit technologisch als sehr leistungsfähig erwiesen hat (Berger 2013; BMBF 2018a; WEF 2018; Polt et al. 2020; Schmoch/Frietsch 2020). Sein zentrales Merkmal ist, dass Innovationen besonders durch kooperative Prozesse und nicht ausschließlich im Kontext von Konkurrenz und Marktbeziehungen verlaufen.⁵ Vor allem aber ist es von einer Dominanz industrieller Innovationsprozesse der Kernindustrien wie der Automobilbranche, dem Investitionsgütersektor sowie der pharmazeutischen und chemischen Industrie charakterisiert. Die hier vorherrschenden Innovationsstrategien richten sich zumeist auf die inkrementelle Entwicklung technologisch anspruchsvoller Güter im Kontext sequentiell verlaufender Innovationsprozesse – häufig Investitionsgüter – mit einem engen Markt- und Kundenbezug, verschiedentlich als „medium-high-tech“ Produkte bezeichnet. Es handelt sich um ein System, das auch als „Diversifizierte Qualitätsproduktion“ (Sorge/Streck 2016) gefasst wird.

Der entscheidende und spezifische Innovationsmechanismus des deutschen NIS wird von Suzanne Berge in ihrer vergleichenden Studie als „*repurposing of key technologies to develop wholly new products and services*“ (Berger 2013: 134; Hervorheb. i. Origin.) gefasst. Gemeint ist hiermit eine Innovationsfähigkeit zu einer anwendungsorientierten Kombination verfügbarer und auch teilweise neuer Ressourcen und Technologien. Es handelt um jene besondere Innovationsstärke, die Werner Abelshauser darin sieht, dass das deutsche System seit jeher in der Lage ist, neue Basisinnovationen – die nicht unbedingt in Deutschland entwickelt worden sind – in konkrete wirtschaftlich vorteilhafte Anwendungen umzusetzen zu können

⁵ Vgl. hierzu die inzwischen klassischen vergleichenden Untersuchungen über die Varieties of Capitalism (zusammenfassend Hall/Soskice 2001).

(Abelshauser 2001: 523). Diese Innovationsstrategie hat vor allem auch in Zusammenhang mit der Nutzung von Mikroelektronik und generell IT-Technologien für industrielle Produkte und Prozesse deutlich an Bedeutung zugenommen. Einerseits geht es dabei um die Verknüpfung von IT- und mikroelektronischen Komponenten mit bestehenden Produktlinien (Sorge/Streeck 2016). Andererseits aber handelt es sich um die Entwicklungspotenziale für völlig neue Produkte und Prozesse wie sie etwa mit KI in Verbindung gebracht werden.

3.2 Innovationssystem unter Druck

Die wachsende Bedeutung von KI und ihre spezifischen Innovationserfordernisse etablieren sich in dem Kontext dieses NIS. Die Folgen sind *Inkompatibilitäten* zwischen den Anforderungen und Bedingungen des KI-Innovationsmodus einerseits und den eingespielten primär industriell orientierten Institutionen und Handlungsmustern des NIS andererseits. Wie eingangs angesprochen, betrifft dies zudem nicht nur KI-Innovationen, sondern, folgt man der vorliegenden Literatur, tendenziell einen weiten Komplex moderner Software- und IT-Technologien (z. B. Winter 2017; Boes et al 2019; ten Hompel et al 2019; Botthof et al. 2020; Otto 2021). Empirisch weisen die entstehenden Inkompatibilitäten folgende Dimensionen auf:

Eingespielte Innovationsketten vs. offene Ecosysteme

Die industrielle Innovationsfähigkeit des deutschen NIS basiert in hohem Maße auf eingespielten, disziplinär und sektoral ausgerichteten Kooperationsbeziehungen zwischen Unternehmen, wissenschaftlichen Einrichtungen sowie wichtigen Lieferanten und Kunden. Mit dieser Situation tritt die wachsende Bedeutung fluider Ecosysteme mit einer Vielzahl heterogener und neuer Akteure mit den agilen Innovationsstrategien von Unternehmen in Konflikt. Damit einher geht die Erosion tradierter Wertschöpfungs- und Innovationsmustern und die beschriebene Aufweichung der bisherigen sektoralen und disziplinären Strukturierung des NIS, an deren Stelle eine neue Vielfalt von Vernetzungen und Wissensaustausch treten.

Indes sprechen Befunde dafür, dass nach wie vor viele Unternehmen aus den etablierten Kernsektoren der Industrie weiterhin ihre bisherigen Innovationsstrategien verfolgen und den neuen Anforderungen nur sehr zögerlich nachkommen (Hahn/Kuhlmann 2018). Die eingespielten Innovations- und Produktionsbeziehungen weisen ganz offensichtlich ein hohes Beharrungsvermögen auf. Dies basiert darauf, dass sie kalkulierbar sind und oft gewachsene Vertrauensbeziehungen aufweisen, damit Ungewissheiten vermieden werden. Oftmals fehlen auch Erfahrungen mit flexiblen Kooperationsformen und bei vielen Unternehmen ist die Sorge um Wissensverlust beim Versuch, neue Muster von Wissenstransfer und Kooperation mit neuen Akteuren zu finden, anzutreffen (ebd.). Ein deutlicher Indikator für diese Situation sind die vielfältigen Maßnahmen und Anstrengungen der Innovationspolitik, den Wissenstransfer zwischen den verschiedensten Akteuren zu beschleunigen, KI-basierte Innovationen massiv zu unterstützen und zugleich neue Kooperations- und Vernetzungsformen zu initiieren.

Tradierte Innovationsmuster vs. agile Innovationsstrategien

Ein Wandel von Innovationsstrategien in Richtung agiler datenorientierter Innovationsstrategien kollidiert ganz offensichtlich in vielen Unternehmen mit tradierten und in der Vergangenheit bewährten Innovationspraktiken. Denn deren Wandel und Umorientierung erfordert nicht nur weitreichende organisatorische und auch personelle Strukturveränderungen in Unternehmen, sondern auch eine Neuorientierung der tradierten Innovationskultur und der sie dominierenden Leitbilder. Sie müssen diesen Wandlungsprozess vor allem vor dem Hintergrund ihrer bisherigen Kernkompetenzen, arbeitsorganisatorischen Prozesse, Wertschöpfungskonzepte sowie gewachsenen Sozialbeziehungen vollziehen. Diese „Mammutaufgabe“ wird derzeit unter erschwerenden Bedingungen der vielfältigen Krisentendenzen in Wirtschaft und Gesellschaft bearbeitet (Boes/Langes 2023).

Hinzu kommt ein weiterer Beharrungsfaktor, der allenfalls schrittweise überwunden werden kann: Industrielle Unternehmen zeigen bislang von Ausnahmen abgesehen nur wenig Interesse an den Innovationspotenzialen der Datenökonomie und den entsprechenden Nutzungsmöglichkeiten der KI (Forschungsbeirat/acatech 2022a). In der Literatur wird allenfalls von „zaghaften Versuchen“ zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle im Umfeld von Pilotvorhaben, die in der Industrie vor allem um das Konzept des Internets der Dinge (IoT) angestoßen wurden, gesprochen (Ferber 2019). Hierbei verbinden sich insbesondere mit dem prominenten Konzept Industrie 4.0 ambivalente Effekte. Einerseits wird damit der Blick vieler Unternehmen grundsätzlich auf Innovations- und Nutzungspotenziale digitaler Technologie gerichtet und damit wird auch der Boden für mögliche KI-Anwendungen bereitet. Andererseits aber werden damit Konzepte bereitgestellt, die sich auf die Optimierung traditioneller industriell orientierter Innovationsstrategien richten. Damit begründet sich die in sehr vielen Fällen beobachtbare Pfadabhängigkeit digitaler Innovationsmaßnahmen (Hirsch-Kreinsen 2020), die bislang einer strategischen Neuorientierung in Richtung einer systematischen Nutzung von Daten entgegenstehen.

Besonders deutlich kann die strategische Neuorientierung und das damit einhergehende Ringen um einen „Paradigmenwechsel“ der Innovationsstrategien derzeit am Beispiel der deutschen Automobilindustrie beobachtet werden. Denn diese Branche ist vor allem infolge der Digitalisierung konfrontiert mit einem Druck in Richtung einer weitreichenden Transformation ihrer Organisationsformen, Kernkompetenzen, Innovationskulturen und Geschäftsmodelle – insgesamt ihrer Innovationsstrategien. Wie neuere Studien zeigen, steht dabei im Zentrum eine ausgeprägte Orientierung auf Daten und Software.⁶ Bildete die Software im alten Paradigma lediglich ein in die Hardware eingebettetes Element, so verkehrt sich dieses Verhältnis nun. Das Auto muss neuerdings von der Software und den Möglichkeiten der Datennutzung her konzipiert werden. Denn es lassen sich sehr viele Funktionen, die bisher in der Hardware implementiert waren, auf die Software transferieren. Die unternehmenskulturellen Konsequenzen dieser neuen Innovationsmöglichkeiten werden im Wirtschaftsjournal *Economist* anschaulich als eine „knotty cultural“ Transformation beschrieben:

„In the old hardware world, car companies were hierarchical, process-oriented organisations often run by big egos. Launching a new model took around four years and the focus fell on meeting the deadline for the all-important start of production. A new model was much the same as

⁶ Natürlich drängt zugleich die ökologische Notwendigkeit einer schnellen Dekarbonisierung der Mobilität auf einen massiven Wandel der Innovationsstrategien der Automobilindustrie.

the old one, with precious little innovation... In the new software world, by contrast, decentralised teams of developers focus more on problem-solving than on execution. Cars are updated in rhythms counted not in years but in days and sometimes hours. Products are never really finished.“ (The Economist 2022)

Auf diesem Weg wird das Auto in seiner Funktionalität auch nach seiner Produktion und dem Verkauf kontinuierlich weiter Objekt von datengetriebenen Innovationen, etwa durch ständige Updates der Software, die ähnlich wie bei Smartphones in der Automobilindustrie inzwischen als „over the air“ bezeichnet werden (Boes/Ziegler 2021; Boes/Langer 2023). Freilich muss dieser Strategiewandel, wie aktuelle Beispiele zeigen, massive Beharrungskräfte überwinden und Widersprüche ausgleichen. Es ist bislang keineswegs ausgemacht, welche konkrete Digitalisierungs- und Innovationsstrategie sich bei den etablierten Autoherstellern längerfristig durchsetzen wird (The Economist 2022).⁷

Widersprüchliche Akteurskonstellation

Der bisher funktionierende Wissens- und Technologietransfer basiert sehr stark auf der großen Bedeutung der Ingenieurwissenschaften im deutschen Wissenschaftssystem, die sich seit jeher durch einen hohen Praxis- und Anwendungsbezug auszeichnet. In historischer Perspektive wird dieses Innovationsmodell als eine „produktive Symbiose von Wirtschaft und Wissenschaft“ beschrieben (Abelshauser 2004: 44). Im Vergleich dazu ist nun allerdings eine Situation beobachtbar, die die bisherige dominante Akteurskonstellation des NIS erodieren lässt. Denn es wird die bisherige Dominanz der Ingenieurwissenschaften – und ihre enge Kooperation mit Unternehmen aus den verschiedenen industriellen Sektoren in Frage gestellt. Deren herausgehobene Position droht zudem nicht nur durch die KI-Dynamik, sondern seit einiger Zeit auch durch die informatikaffine Industrie 4.0-Vision zu erodieren (Hirsch-Kreinssen 2016). Zwar haben die Ingenieurwissenschaften für den industriellen Sektor seit langer Zeit die Entwicklung IT-basierter produktionstechnologischer Systeme vorangetrieben, es gelingt jedoch erst mit dem stark von Informatiker*innen geprägten Konzept der Industrie 4.0 und später mit den KI-Versprechungen, eine hohe politische und öffentliche Aufmerksamkeit für Digitalisierung zu gewinnen.

Der wachsende Einfluss der KI-Community auf Innovationsziele, Agendasetting, Ressourcenverteilung, generell auf die Ziele der Innovationspolitik stellt daher die bisherige einflussreiche Position der Ingenieurwissenschaften im deutschen NIS in Frage. Dabei entsteht eine widersprüchliche Situation: Zum einen reduziert sich die bisherige einflussreiche Position der Ingenieure aufgrund einer generell verstärkten Orientierung an digitalen Technologien. Ein Indikator hierfür ist die auch vielfach veränderte disziplinäre Zusammensetzung verschiedenster innovationspolitischer Beratungsgremien, wo im Vergleich zu früheren Jahren zu Lasten der Ingenieurwissenschaften jetzt die Informatikwissenschaften stark vertreten sind. Zum anderen aber erfordern anwendungsorientierte KI-Entwicklungen, wie beschrieben, eine intensive und offene Kooperation zwischen KI und den Ingenieurwissenschaften, um den

⁷ Dabei ist die Konkurrenz des „Automobil-Startups“ Tesla in Rechnung zu stellen, das mit zunehmenden Erfolg die etablierte Branche mit seinen agilen Innovationsstrategien unter Wandlungsdruck setzt; z. B. <https://www.heise.de/hintergrund/Missing-Link-Tesla-die-Antriebswende-und-das-Legacy-Problem-der-Autoindustrie-6216061.html> (Zugriff: 07.12.2022)

notwendigen Wissensaustausch zwischen den traditionell sehr unterschiedlichen Disziplinen zu gewährleisten.

Daher wird im innovationspolitischen Diskurs die Notwendigkeit betont, neue Muster von Kooperations- und Abstimmungsprozessen mit den anwendungsorientierten Wissenschaften aus den verschiedenen Anwendungsdomänen zu finden. Allerdings wird dies als ein „schwieriges Unterfangen“ angesehen (Ecker et al. 2021: 7). Denn ganz offensichtlich existiert eine traditionell große disziplinäre Distanz zwischen den Ingenieurwissenschaften, wie den produktionstechnologischen Forschungseinrichtungen einerseits und der Informatik andererseits. Vor allem gilt dies für Softwarefirmen, insbesondere Startups, die nur wenig Industriebezug haben. Verschiedentlich wird in den Experteninterviews auf das Problem nach wie vor existierender „Silos“ zwischen den Disziplinen hingewiesen und „kooperative Bündnisse“ wurden bislang so gut wie nirgendwo erlebt. Früher hätten die Ingenieurwissenschaften IT-Probleme als Nebensache abgetan, die durch Werkstudierende oder auch Praktikant*innen gelöst werden können.

Insgesamt ist aber davon auszugehen, dass sich die Ingenieurwissenschaften im Zusammenspiel mit der jetzt einflussreichen Informatik und KI längerfristig neu positionieren werden, ohne indes ihre bisherige starke Position gänzlich aufgeben zu müssen. Denn ohne Frage haben die Ingenieurwissenschaften nicht nur eine lange Tradition im deutschen NIS, sondern diese verfügen auch über nach wie vor stabile und vor allem auch technologisch unverzichtbare Kooperationsbeziehungen zu zentralen Unternehmen aus den Kernindustrien.

Zögerlicher Kompetenzwandel

Weiterhin ist offen, ob und auf welche Weise das Bildungssystem auf seinen verschiedenen Ebenen tatsächlich in der Lage ist, Kompetenzstrukturen mit der erforderlichen Offenheit und Flexibilität weiterzuentwickeln und die in vielen Beschäftigungssegmenten erforderlichen informatik- und KI-orientierten neuen Kompetenzen zu generieren. Die intensive öffentliche Debatte darüber und vielfältige auf Kompetenzentwicklung zielende politische Maßnahmen sind ein hinreichendes Indiz für diesen offensichtlich drängenden Entwicklungsbedarf (acatech et al. 2016; BMAS 2021). Besonders ist auch unstrittig, dass ein Wandel des beruflichen Ausbildungssystems in Deutschland unabdingbar ist (z. B. EFI 2021; Wilbers/Esser 2022).

Freilich sind Hinweise unübersehbar, dass die Entwicklungstrends in diesem Feld widersprüchlich sind und von mangelnder Kompatibilität zwischen KI-spezifischem Kompetenzbedarf und den gegebenen Bildungs- und Kompetenzstrukturen gesprochen werden kann. So zeigen vorliegende Daten, dass bei neu abgeschlossenen Ausbildungsverträgen der Anteil der Berufsgruppen, die durch eine hohe Digitalisierungsorientierung gekennzeichnet sind, lediglich von 50 Prozent im Jahr 2010 auf 55 Prozent im Jahr 2018 gestiegen ist. Auf der Ebene des klassischen Berufsbildungssystems gelingt allerdings den vorliegenden Befunden zufolge eine stetige Weiterentwicklung, d. h. bestehende Ausbildungsberufe werden angepasst, neue entstehen und Rahmenlehrpläne werden weiterentwickelt. Expertinnen und Experten attestieren daher diesem System eine gewisse Flexibilität und Anpassungsfähigkeit (Kirchmann et al. 2021: 49). Zugleich aber wird die praktische Umsetzung neuer beruflicher

Orientierung auf der betrieblichen Ebene als problematisch angesehen. Zwar haben vorliegenden Befunden zufolge viele Unternehmen die wachsende Bedeutung digitaler Kompetenzen erkannt und vermitteln in der betrieblichen Ausbildung bereits eine Vielzahl der neuen Kompetenzen. Jedoch passen viele Betriebe, vor allem auch wenig digitalisierte kleinere Betriebe ihre Ausbildungsaktivitäten den neuen Erfordernissen kaum an (EFI 2021: 60).

Hinzu kommt eine vielfach beklagte Ungleichgewichtigkeit von Weiterbildungsaktivitäten. Denn zumeist erhalten ohnehin schon einschlägig qualifizierte Beschäftigte Weiterbildungsmöglichkeiten, während weniger qualifizierte Beschäftigtensegmente nur selten berücksichtigt werden (zusammenfassend z. B. Abel 2018). Verstärkte Segmentationstendenzen innerhalb vieler Beschäftigtengruppen sind die Folge. Zwar haben sich in den letzten Jahren neueren Befunden zufolge die Weiterbildungsaktivitäten vor allem auf betrieblicher Ebene verstärkt. Jedoch finden sich hier Segmentationstendenzen zwischen größeren und digitalisierungsintensiven Betrieben einerseits und einer beträchtlichen Zahl kleinerer weniger technologieorientierter Unternehmen, wobei die Weiterbildungsaktivitäten generell deutlich je nach Branche und der Struktur der Beschäftigten variieren. Zudem kann von einer hohen Intransparenz des Weiterbildungssektors insgesamt ausgegangen werden, da berufsbezogene Weiterbildung in Deutschland von einer Vielzahl sehr unterschiedlicher Einrichtungen durchgeführt wird. Schließlich spielen Hochschulen und Universitäten als Anbieter für berufsbezogene Weiterbildung eine sehr geringe Rolle. Kritiker*innen drängen, dass sie in diesem Bereich stärker aktiv werden sollten, weil nicht zuletzt der Bedarf an tertiärer beruflicher Bildung angesichts der technologischen Veränderungen steigt (EFI 2021: 61 ff.). Freilich stehen dem, wie vielfältige Erfahrungen im universitären Sektor zeigen, traditionelle Orientierung an akademischen Standards und Furcht vor dem Verlust wissenschaftlicher Reputation durch berufsorientierte Aktivitäten entgegen.

Transnationalisierung vs. technologische Souveränität

Die internationale Dimension des KI-Modus tritt schließlich in Widerspruch zu gegenläufigen national orientierten innovationspolitischen Trends, deren Einfluss politisch in der letzten Zeit zunimmt. Denn unter dem Stichwort technologische Souveränität werden europäisch und auch national orientierte Innovationsstrategien gerade für das Feld der KI breit diskutiert und politisch eingefordert. Es geht darum, nicht nur für traditionelle Industrieprodukte, sondern vor allem für jene Bereiche, die als Schlüsseltechnologien angesehen werden, strukturelle Abhängigkeiten von anderen Staaten und Regionen zu verhindern, um die eigene technologische und wirtschaftliche Handlungsfähigkeit auf Dauer sicherzustellen (Edler et al. 2020; Kroll et al. 2022).

Hinzu kommt, dass eine explizit national orientierte industriepolitische Strategiediskussion auch innerhalb der EU ein wachsendes Gewicht gewinnt (BMWi 2019). Es wird eine Politik angemahnt, die Kompetenzen, Kapazitäten und Wertschöpfung in Deutschland – und nur sekundär in Europa – auf Dauer sichern hilft. Dieser Diskurs erkennt zwar neue und internationalisierte Innovationskonstellationen an, ist aber in seiner Stoßrichtung traditionell, das heißt, er rekuriert trotz transnationaler Innovationsdynamiken verstärkt wieder auf nationale Bezugsmuster und Marktprozesse sollen in diesem Sinne stärker reguliert werden (EFI 2022: 53). Dies kann auch eine wachsende Bedeutung der regionalen Clusterbildung im Kontext des NIS implizieren. Nicht zuletzt gewinnt diese nationale Perspektive auf Produktion

und Innovation durch die Krisentrends zu Anfang der 2020er Jahre an Dynamik. Einmal mehr spielt hier die vielfach als schmerzhaft empfundene Abhängigkeit von fragilen internationalen Wertschöpfungsketten eine Rolle, die in der Krise massiv gestört wurden. Unter dem Stichwort der Resilienz werden neue Ansätze von Unternehmensstrategien und Innovationspolitik sichtbar und es wird vermehrt über Möglichkeiten einer Relokalisierung und Renationalisierung von Produktionsstandorten diskutiert (Höhn 2020; Wessels 2020).

3.2 Hohe Steuerungsanforderungen an die Politik

Missionsorientierung vs. Diffusionsorientierung

Der Wandel hin zu einer missionsorientierten Innovationspolitik auf der Basis eines erweiterten gesellschaftlichen Innovationsverständnisses sowie die skizzierten Inkompatibilitäten zwischen dem KI-Modus und den eingespielten industriellen Innovationsmustern impliziert steigende Anforderungen an die Steuerungsfähigkeit des Staates auf seinen verschiedenen Ebenen. Freilich ist Skepsis angezeigt und die Frage ist, inwieweit dieser Wandel sich tatsächlich durchsetzen lässt. Denn diese Anforderungen sind kaum kompatibel mit den eingespielten Praktiken der Politik (Botthof et al. 2020: 18 f.). Mit der erweiterten gesellschaftlichen Perspektive auf das, was als wünschenswerte Innovation zu verstehen ist, verbinden sich zudem auch neue, politikfeldspezifische Zielkonflikte; festzumachen z. B. an der Absicht Wachstumsziele und Nachhaltigkeit zu verknüpfen (Forschungsunion/acatech 2013). In jedem Fall aber erfordert dieses breitere Innovationskonzept eine Komplementarität technologischer, sozialer, organisatorischer und institutioneller Innovationen. Die überraschende forschungspolitische Konjunktur des Begriffs der „Sozialen Innovation“ ist hierfür hinreichendes Indiz (Howaldt et al. 2021).

Damit unterscheidet sich Missionsorientierung deutlich von der traditionell vorherrschenden „diffusionsorientierten“ Politik. Diese richtet sich größtenteils auf eine Förderung gegebener industrieller Strukturen und ebenso unspezifisch wie unspektakulär auf die Unterstützung primär der industriellen Innovationsfähigkeit, ohne Innovationen in eine bestimmte Richtung lenken zu wollen und Ressourcen auf einige wenige ausgewählte Spitzentechnologien zu konzentrieren. Missionsorientierung meint demgegenüber, dass Politik aktiv zu einem gezielten Systemwandel beitragen muss und große gesellschaftliche Herausforderungen angehen soll. Insofern wird auch von einem Wandel hin zu einer „transformative innovation policy“ gesprochen (Haddad et al. 2022: 15).

Neue Dimensionen der Innovationspolitik

Dabei ist davon auszugehen, dass die Politik neue Innovationserfordernisse kaum dominant oder gar alleine „steuern“ kann. Das heißt, Governance in einem gewandelten NIS muss mehrere Dimensionen berücksichtigen: zum einen eine ausdifferenzierte Rolle des Staates angesichts erweiterter Herausforderungen und zum anderen die Notwendigkeit zu breiteren, viele Akteure umfassenden Interaktionen. Erforderlich werden daher Politikfähigkeiten, die auch als „transformativ“ bezeichnet werden (Botthof et al. 2020/2023). Sie zielen darauf, einen Systemwandel hin zu größerer technologischer Offenheit und Agilität anzustoßen, zu begleiten und insbesondere die skizzierten Widersprüche zwischen Wandlungserfordernissen und

Beharrungskräften innerhalb des NIS auszugleichen. Entsprechend können zentrale Zielsetzungen einer missionsorientierten Innovationspolitik präzisiert werden (Botthof et al. 2020: 17 ff.):

- Erforderlich ist eine kontinuierliche Orientierung in Hinblick auf die Generierung von für die Zukunft als relevant erachteten Innovationen. Hierbei ist mit Zielkonflikten zu rechnen, für deren Moderation dem Staat eine wichtige koordinierende Rolle zukommt. Dies zeigt das Beispiel der KI, deren Innovationserfordernisse in Gegensatz zu den herkömmlichen Innovationspraktiken geraten; weitere Beispiele sind gesellschaftspolitische Widersprüche zwischen Wachstum versus Nachhaltigkeit, industrielle Transformation versus Erhalt von Arbeitsplätzen oder das Erreichen der Klimaziele versus eine stabile Energieversorgung. Zudem soll, wie auch im Kontext von KI-Innovationen angesprochen, einerseits das System agiler und flexibler gestaltet werden, andererseits sollen dauerhaft langfristig wirkende gesellschaftliche Herausforderungen bewältigt werden.
- Weiterhin ist die Koordination der zunehmenden Zahl beteiligter heterogener Akteure unabdingbar. Vor allem geht es um die Integration auch nicht unmittelbar involvierter Akteure aus verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen. Besonders sind solche Wissenschaftsdisziplinen oder auch die Zivilgesellschaft, die in der Vergangenheit bei technologischen Innovationen nur eine nachgeordnete Rolle gespielt haben, einzubeziehen. So geht es eben bei der KI-Entwicklung sowohl um eine möglichst produktive Abstimmung zwischen den traditionell dominanten Ingenieurwissenschaften und der KI-Community als auch um den Einbezug weiterer Wissensdomänen wie Linguistik, Neurowissenschaft, Psychologie und Philosophie (Görtz et al. 2020).
- Für eine auf die großen gesellschaftlichen Herausforderungen gerichtete Innovationspolitik ist es erforderlich, in einer breiten Perspektive die Wechselwirkungen zwischen etablierten Innovationspfaden und Suchprozessen nach neuem Wissen in zunächst nur schwer erfassbaren Nischen zu erkennen. Zudem müssen die Funktionen der zum Teil mehrdimensional agierenden Akteure identifiziert werden, die gleichermaßen in Nischen und in Pfaden unterschiedlicher Reifestadien agieren, um Suchprozesse in Nischen im Sinne der politischen Gestaltung anzuregen und zu fördern (ISI 2016: 2). Die Bedeutung von Nischen für die Genese eines neuen Technologiefeldes zeigt eindringlich die frühe Entwicklung der KI, die in den 1970ern in Deutschland ihre Entwicklung als „Invisible College“ in einer relativ geschützten Nische des Wissenschaftssystems begann (Ahrweiler 1995).
- Angestrebt werden sollte die Reflexionsfähigkeit des komplexen Multi-Akteurssystems der Innovation. Diese Fähigkeit ist für die Governance einer längerfristigen und kontinuierlichen Neuorientierung essenziell. Wenn der Staat nicht mehr nur als Rahmensetzer agieren soll, sondern gezielter als bisher Innovationsaktivitäten in gesellschaftlich gewünschte Bahnen lenken soll, erfordert dies eine deutlich pro-aktivere Rolle staatlicher Akteure. Das umfasst zum Beispiel die Fähigkeit zur Antizipation gesellschaftlicher Problemlagen und Entwicklungen und damit auch das Wissen über die Schwerpunkte und die Richtung von anzustoßenden Innovationen und Transformationen. Ansatzpunkte hierfür liegen sowohl in der explorativen Erfassung des anzustrebenden Möglichkeitsraums als auch in der Genese normativer Visionen und Leitbilder.

Missionsorientierte Innovationspolitik muss sich im Kontext beschleunigter Innovations- und Transformationszyklen, wie sie bei KI anzutreffen sind, an diesen Zielsetzungen messen lassen und Instrumente und Verfahren entwickeln, die diese erfüllen (Kuhlmann/Rip 2018). Dabei ist zu betonen, dass die legitimatorische Grundlage gerade auch für Innovationspolitik der Nationalstaat ist und bleibt. Trotz der globalen Natur von Innovationsverläufen wie der KI, vielfältigen transnationalen gesellschaftlichen Problemen und der offensichtlich notwendigen internationalen Abstimmung zu ihrer Lösung sind globale Steuerungsansätze jenseits der internationalen Aushandlung von mehr oder weniger bindenden Zielvereinbarungen bis auf Weiteres nicht denkbar. Selbst auf Ebene der EU ist dies allen Erfahrungen nach nur begrenzt möglich. Dies gilt in Hinblick auf die Frage nach der Bewertung von KI-Systemen nach ethischen und Antidiskriminierungskriterien und ihrer Durchsetzung bei der Entwicklung und der Anwendung solcher Systeme. Das heißt, die Rolle des Staates in der Governance von Innovationsprozessen ist schwerpunktmäßig national und subnational zu definieren, ergänzt um internationale Verhandlungen und begrenzte delegierte Kompetenzen auf der europäischen Ebene. Vermutlich werden sich im Kontext neuerer und weiterer Krisenentwicklungen nationalstaatliche Orientierungen und darauf basierende Politiken eher noch verstärken denn abschwächen.

4. Perspektiven: Vertiefte Segmentation im NIS

Ohne Frage existiert ein hoher Veränderungsdruck auf die bisherigen Strukturen des NIS. Dies ist nicht allein Konsequenz der schnell wachsenden Bedeutung des Technologiefeldes KI und seiner spezifischen Innovationsanforderungen, sondern generell des Drucks der fortschreitenden Digitalisierung und der damit in vielen Technologiebereichen neu entstehenden Innovationspotenziale. Sofern zwischen diesen und den gegebenen Strukturen mangelnde Passungsverhältnisse entstehen, ist ein Veränderungsdruck die Folge. Daher sind auch Argumente plausibel, wonach eine Neuausrichtung des Innovationssystems in seiner Gesamtheit aufgrund des notwendigen „Paradigmenwechsels“ von Innovationsprozessen so gut wie unvermeidbar sei (Boes/Lange 2023). Nun ist allerdings nicht zu erwarten, dass sich das NIS in seiner Gesamtheit in Richtung der spezifischen Anforderungen und Möglichkeiten der digitalen Technologien wandelt bzw. sich innovationspolitisch gezielt verändern lässt. Denn zum einen zeichnen sich die strukturellen und institutionellen Bedingungen eines NIS durch eine hohe Beständigkeit aus (Werle 2005; Lundvall 2007). Ein Beispiel hierfür ist, dass sich viele traditionelle Technologiefelder im Kontext von ausgeprägten Innovationsdynamiken bis heute durch hohe pfadabhängige Entwicklungen auszeichnen (z. B. Hirsch-Kreinsen 2008). Zum anderen sind die neuen Innovationsanforderungen nicht unbedingt kompatibel mit den Entwicklungsanforderungen weiterverfolgter traditioneller oder aber auch anderer neuer Technologiefelder. So bleibt auch ein hochgradig digitalisiertes Automobil auf traditionelle Technologiekomponenten angewiesen, deren Beherrschung und kontinuierliche Innovation auch in Zukunft zentral für die Funktionsfähigkeit und Effizienz des Gesamtsystems Automobil sind. Ein aktuelles Beispiel hierfür ist, dass die Entwicklung der Teslaautomobile eben

nicht nur auf der extensiven Nutzung von Daten basiert, sondern auch auf produktionstechnologischen Innovationen, die auf tradiertem Wissen und auf einer inkrementellen Weiterentwicklung seit langem existierender Technologien beruhen.⁸

Daher ist davon auszugehen, dass sich insgesamt verstärkt *Segmentationstendenzen* im Kontext des NIS durchsetzen und seine Strukturen sich fortlaufend ausdifferenzieren. In diesem Sinn können das soziotechnische Feld der KI und der damit verknüpfte KI-spezifische Innovationsmodus in der Terminologie der sozialwissenschaftlichen Innovationsforschung als die Genese eines neuen *Technology Specific Innovation System* verstanden werden. Dieses unterscheidet sich von den umgebenden nationalen, sektoralen oder auch anderen technologischen Innovationssystemen in Hinblick auf seine Strukturen und seine Dynamik deutlich (Carlsson/Stankiewicz 1991; Hekkert et al. 2007).

Ein solch spezifisches Teilsystem weist, wie im Fall der KI, ein stabiles Innenverhältnis etwa in Hinblick auf die Komplementarität institutioneller Regelungen, die beteiligten Akteure, die Interaktionsmuster und die vorherrschenden Orientierungen auf. Zudem sind seine Offenheit, Fluidität und hohe Innovationsdynamik zentrale Merkmale. Folgt man neueren empirischen Analysen, so beschränken sich diese Tendenzen allerdings nicht nur auf das Feld der KI, sondern sie finden sich im Kontext einer ganzen Reihe im Rahmen eines NIS weiterer nebeneinander existierender spezifischer Teilsysteme der Innovation wie z. B. Teilsysteme der Nanotechnologie, der Mobilität, der Medizintechnologie, Energietechnik oder auch der Militärtechnologie (Botthof et al. 2020/2023; Boes/Kämpf 2021). In einer generellen Perspektive sind zentrale Dimensionen dieser Segmentationstendenzen die folgenden:

- Zum ersten entfaltet der Faktor Zeit für Innovationsverläufe eine zunehmend differenzierende Wirkung zwischen technologischen Teilsystemen und dem NIS insgesamt. Einerseits verkürzen sich Innovationszyklen in bestimmten Technologiefeldern insbesondere im Kontext digitaler Technologien und es wird ihre hohe Agilität angemahnt (ten Hompel et al. 2019). Andererseits setzt sich dieser Trend nicht generell durch. So zeigt die Innovationsforschung, dass viele industrielle Wirtschaftsbereiche bis heute von lediglich inkrementellen und langfristig orientierten Innovationen innerhalb vorgezeichneter Trajektorien charakterisiert sind (Hirsch-Kreinsen 2008).
- Zum zweiten ist die Innovationsdynamik einzelner Teilsysteme nicht nur geprägt von einer sich beschleunigenden technologischen Entwicklung entlang gegebener Innovationstrajektorien, sondern nicht ausgeschlossen sind auch Innovationssprünge mit weitreichenden Folgen. Wie gezeigt, stellt sich aktuell im Kontext der durch KI getriebenen dynamischen Entwicklung die Frage, ob und in welcher Weise möglicherweise radikale und in der öffentlichen Debatte oft als „disruptiv“ bezeichnete Innovationen Rückwirkungen auf die Gesellschaft insgesamt haben (Ford 2018; Science Media Center 2021).

⁸ Konkret handelt es sich dabei um eine Weiterentwicklung der Pressentechnologie, die es offenbar nun erlaubt, im Karosseriebau Teile des Autorahmens nicht mehr aus Einzelteilen zusammenzuschweißen, sondern aus einem Stück zu pressen. Fraglos handelt es sich dabei um einen Rationalisierungsschub, insofern als zuvor arbeitsteilige Prozesse technologisch re-integriert und damit (vermutlich) vereinfacht werden (<https://teslamag.de/news/kompletter-tesla-rahmen-guss-idra-giga-presse-mehr-kraft-4717>; Zugriff: 07.12.2022).

- Zum dritten ist in verschiedenen Teilsystemen die Ausdifferenzierung und Erweiterung des Spektrums einflussreicher, aber auch häufig wechselnder Akteure zu beobachten. Sie interagieren oft auf der Basis digital gestützter Koordinationsmechanismen im Kontext fluider Ökosysteme. Dies belegt nicht nur das Feld der KI. Die Analysen über den geradezu dramatischen aktuellen Wandel des Innovationssystems der Automobilindustrie sind hierfür ebenfalls ein instruktiver Beleg. Ein hier ablaufender Wandel wird als digital getriebener Übergang von einer langen Phase erfolgreicher inkrementeller Innovationen hin zu einer „disruptiven Dynamik“ charakterisiert. Damit werden die Ziele, Praktiken und Verlaufsformen der bisherigen Innovationsprozesse grundlegend verändert (Boes/Kämpf 2021; The Economist 2022).

Schließlich etabliert sich ein Mehrebenensystem der Innovation mit seinen unterschiedlichsten Innovationsebenen und institutionellen Konstellationen. Dies ist Folge des wachsenden politischen Fokus auf Innovation auf den unterschiedlichsten Handlungsebenen und der damit einhergehenden Innovationskonkurrenz etwa zwischen verschiedenen Regionen. Dabei weisen die Komplementaritäts- und Interaktionsmuster zwischen den verschiedenen Strukturebenen in der Regel oftmals eine hohe Dynamik auf und können sehr unterschiedliche, vor allem auch differenzierende Relationen annehmen (Bergek et al. 2015).

5. Implikationen

Abschließend seien einige Implikationen dieser Entwicklungstendenzen diskutiert: Konzeptionell stellt sich zum wiederholten Male die Frage nach der analytischen Tauglichkeit der Kategorie NIS (Lundvall 2007; Godin 2017). Denn bis heute wird dieses Konzept als zentral angesehen, um gesellschaftliche Bestimmungsfaktoren technologischer Trends erfassen zu können und vor allem auch innovationspolitische Zielsetzungen und Maßnahmen begründen zu können (Blättel-Mink/Ebner 2020). Indes zeigt die voranstehende Analyse, dass mit dieser Kategorie die Wechselwirkungen zwischen gesellschaftlichen Strukturbedingungen und zentralen technologischen Entwicklungstrends kaum zureichend erfasst werden können, vielmehr davon zu unterscheiden je spezifische institutionelle Bedingungen bei einer Analyse Berücksichtigung finden müssen. Mehr noch, die Rede von einem relativ homogenen und stabilen industriell dominierten deutschen NIS (Schmoch/Frietsch 2020) ist den dynamischen technologischen Entwicklungstrends kaum mehr angemessen. Denn die Stabilität eines Innovationssystems basiert keineswegs nur auf der Komplementarität seiner Institutionen, sondern auch auf der Passung, dem „Fit“ zwischen ihnen und der jeweils benutzten und vor allem der zu entwickelnden Technologie. Offensichtlich basieren technologische Innovationen verschiedener Art auf unterschiedlichen institutionellen Voraussetzungen, einschließlich der Art der Forschungsförderung und der Organisation der Forschung (Werle 2005).

Daher kann die Kategorie NIS allenfalls als Rahmen für verschiedene spezifische (Teil-)Innovationssysteme gedacht werden, die zum großen Teil auch verschränkt sind mit Innovationssystemen in anderen nationalen und internationalen Zusammenhängen. Diese verschiedenen institutionellen Ebenen können, anknüpfend an die institutionentheoretische Debatte, als „background institutions“ und „proximate institutions“ gefasst werden (Whitley 2007;

Lane/Wood 2009; Jackson/Sorge 2012). Bei ersteren geht es um generelle institutionelle Zusammenhänge, die als eingespielte Merkmale eines übergreifenden nationalen Systems anzusehen sind. Bei dem zweiten Typ handelt es sich um die unmittelbaren, für spezifische Technologien relevanten Institutionen, die ein innovatives Teilsystem konstituieren. Das Zusammenspiel beider Ebenen kann als lose gekoppelt angesehen werden. Denn ein nationales System kann unterschiedlich gut geeignet sein, Technologieentwicklung in verschiedenen technologischen Teilsystemen zu generieren (Botthof et al. 2020: 25); d. h., je nach struktureller Konstellation ist von unterschiedlichen Kopplungsgraden zwischen beiden Ebenen auszugehen. Damit lassen sich ohne Frage ein Stück weit die Kontinuitäten unterschiedlicher technologischer Innovationsschwerpunkte verschiedener Länder erklären. Diese Kopplung zeigt sich beispielsweise daran, dass die KI-Entwicklung in Deutschland aufgrund der strukturellen Dominanz der Industrie weit mehr als in anderen Ländern auf industrielle Anwendungsfelder ausgerichtet ist (Hirsch-Kreinsen 2023). Generell freilich verweist dieser Umstand einmal mehr auf die Notwendigkeit, Modellannahmen weitgehend homogener nationaler Innovationssysteme zu erweitern und die Bedeutung von „Subsystemen“ technologischer Art zu betonen. Ihre Analyse ist für das Verständnis technologischer Dynamiken und die Erklärung des sozioökonomischen wirtschaftlichen Strukturwandels unverzichtbar.

Die innovationspolitische Konsequenz der Segmentationstrends ist die beschriebene multidimensionale Sicht auf Förderschwerpunkte und mögliche Maßnahmen. Einerseits geht es, soweit politisch möglich, um eine langfristig orientierte Entwicklung der institutionellen Rahmenbedingungen des NIS, mit dem Ziel, dass diese Offenheit und Dynamik ermöglichen und fördern. Andererseits muss es dezidiert um spezifische Missionen gehen, die sich gezielt auf die Förderung unterschiedlicher Schlüsseltechnologien und die Bewältigung gesellschaftlicher Herausforderungen richten. Naturgemäß trägt diese Missionsorientierung der Innovationspolitik zugleich zu weiteren Segmentationstendenzen im NIS bei. Denn der Fokus auf bestimmte Technologiefelder und konkrete gesellschaftliche Herausforderungen sowie die Erweiterung staatlicher Politik über die Rolle eines bloßen Rahmensetzers hinaus, implizieren differenzierte Effekte zu Lasten eines zuvor relativ homogenen NIS.

Angesichts eines gesellschaftspolitisch erweiterten Innovationsverständnisses ist dabei für Innovationspolitik stets auch die normative Frage virulent, in welcher Weise mit Innovationen einerseits die klassischen Ziele von Wachstum und Beschäftigung erreicht werden können und wie sie andererseits zur Bewältigung gesellschaftspolitischer und ökologischer Herausforderungen beitragen können. Weiterhin werden Aspekte der Diffusion und Transformation neuer Technologien stärker Gegenstand von Innovationen und es spielen seit längerem Fragen von Systeminnovationen eine große Rolle (Botthof et al. 2020: 23). Insbesondere die normative Perspektive weitet sich mit dem Fokus auf gesellschaftliche Herausforderungen vor allem unter dem Druck der Klimakrise zunehmend aus, gewinnt einen zunehmend wichtigeren Stellenwert und stellt sich in Hinblick auf unterschiedliche Technologien verschieden dar. Wie nicht zuletzt anhand der KI-Dynamik gezeigt werden kann, sind Innovationen immer auch mit weitreichenden Versprechungen und daran gebundenen positiven wie aber auch negativen kollektiven Erwartungen und Fragen nach ihren sozialen oder auch ethischen Konsequenzen verknüpft (Krokowski/Hirsch-Kreinsen 2022). Insofern bedarf Innovationspolitik zunehmend Akzeptanz und Legitimation durch den öffentlichen Diskurs. Es ist jedoch unübersehbar, dass dies zu einer weiteren Ausdifferenzierung sowohl des institutionellen Rahmens

um normative Anforderungen als auch zur Ausweitung der für Innovationen relevanten Akteurskonstellation wie etwa einem erweiterten Einbezug der Zivilgesellschaft führen wird. Diese gewinnt angesichts der nicht übergehbaren gesellschaftlichen und vor allem ökologischen Herausforderungen einen schnell wachsenden Einfluss auf technologische Innovationen.

Literatur

- Abel, Jörg (2018). Kompetenzentwicklungsbedarf für die digitalisierte Arbeitswelt, FGW-Studie, Düsseldorf: FGW – Forschungsinstitut für gesellschaftliche Weiterentwicklung e.V.
- Abelshauser, Werner (2001), »Umbruch und Persistenz: Das deutsche Produktionsregime in historischer Perspektive«, in: *Geschichte und Gesellschaft*, 27 (4), S. 503–523.
- Abelshauser, Werner (2004), *Deutsche Wirtschaftsgeschichte*, München: C. H. Beck.
- acatech (Deutsche Akademie der Technikwissenschaften in Kooperation mit Fraunhofer IML und equeo) (2016), *Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0*, München: acatech.
- Ahrweiler, Petra (1995), *Künstliche Intelligenz-Forschung in Deutschland. Die Etablierung eines Hochtechnologie-Fachs*, Münster/New York: Waxman.
- André, Elisabeth/Bauer, Wilhelm u. a. (Hg.) (2021), *Kompetenzentwicklung für Künstliche Intelligenz – Veränderungen, Bedarfe und Handlungsoptionen*. Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme, München: Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz/acatech.
- Bender, Gerd (2005), »Technologieentwicklung als Institutionalisierungsprozess«, in: *ZfS*, 34/3, S. 170–187.
- Bergek, Anna/Hekkert, Marko/Jacobsson, Staffan/Markard, Jochen/Sandén, Björn/Truffer, Bernhard (2015), »Technological innovation systems in context: Conceptualizing contextual structures and interaction dynamics«, in: *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 16, S. 51–64, <http://doi.org/10.1016/j.eist.2015.07.003>.
- Berger, Suzanne (2013), *Making in America. From Innovation to Market*, Cambridge, MA: MIT Press.
- Bibel, Wolfgang/Furbach, Ulrich (2018), *Formierung eines Forschungsgebiets – Künstliche Intelligenz und Intellektik an der Technischen Universität München*. Deutsches Museum Preprint, H. 15, https://www.deutsches-museum.de/assets/Verlag/Download/Preprint/preprint_015.pdf (abgerufen am: 19.01.2023).
- Bitkom/DFKI (2017), *Künstliche Intelligenz: Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung*. Positionspapier, 05.09.2017, <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publicationen/Entscheidungsunterstuetzung-mit-Kuenstlicher-Intelligenz.html> (abgerufen am: 25.06.2021).
- Blättel-Mink, Birgit/Ebner, Alexander (Hrsg.) (2020), *Innovationssysteme: Technologie, Institutionen und die Dynamik der Wettbewerbsfähigkeit. 2. Auflage*, Wiesbaden: VS-Verlag für Sozialwissenschaften.
- BMAS (Bundesministerium für Arbeit und Soziales) (2021), *Nationale Weiterbildungsstrategie der Bundesregierung*, <https://www.bmas.de/DE/Arbeit/Aus-und-Weiterbildung/Weiterbildungsrepublik/Nationale-Weiterbildungsstrategie/nationale-weiterbildungsstrategie.html> (abgerufen am: 19.02.2022).
- Boes, Andreas/Langes, Barbara/Vogl, Elisabeth (2019), Die Cloud als Wegbereiter des Paradigmenwechsels zur Informationsökonomie. In: Andreas Boes/Barbara Langes (Hrsg.): *Die*

Cloud und der digitale Umbruch in Wirtschaft und Arbeit. Strategien, Best Practices und Gestaltungsimpulse, Freiburg: Haufe, S. 115–146.

Boes, Andreas/Ziegler, Alexander (2021), *Umbruch in der Automobilindustrie. Analyse von Schlüsselunternehmen an der Schwelle zur Informationsökonomie*, München: Institut für sozialwissenschaftliche Forschung, <https://www.isf-muenchen.de/wp-content/uploads/2021/06/Forschungsreport-Umbruch-in-der-Automobilindustrie.pdf> (abgerufen am: 19.01.2023).

Botthof, Alfons/Edler, Jakob/Hahn, Katrin/Hirsch-Kreinsen, Hartmut/Weber, Matthias/Wessels, Jan (2020), *Transformation des Innovationssystems: Neue Anforderungen an die Innovationspolitik*. Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis, Nr. 67, Karlsruhe: Fraunhofer Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.

Botthof, Alfons/Edler, Jakob/Hahn, Katrin/Hirsch-Kreinsen, Hartmut/Weber, Matthias/Wessels, Jan (2023), *Transformative und agile Informationssysteme*, Frankfurt (i. E.).

Brynjolfsson, Erik/McAfee, Andrew (2014), *The second machine age: work, progress, and prosperity in a time of brilliant technologies*, New York/London: Norton & Company.

BMW (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie) (2019), *Industriestrategie 2030*, Berlin.

Bundesregierung (2018), *Eckpunkte der Bundesregierung für eine Strategie Künstliche Intelligenz*. 18.07.2018, https://www.bmbf.de/files/180718%20Eckpunkte_KI-Strategie%20final%20Layout.pdf (abgerufen am: 28.05.2021).

Bundesregierung (2020), *Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung. Fortschreibung 2020*, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Technologie/strategie-kuenstliche-intelligenz-fortschreibung-2020.html> (abgerufen am: 01.07.2021).

Carlsson, Bo/Stankiewicz, Rikard (1991), »On the Nature, Function, and Composition of Technological systems«, in: *Journal of Evolutionary Economics*, 1 (1991), S. 93–118.

Cuhls, Kerstin/Edler, Jakob/Koschatzky, Knut (2019), *Sprunginnovationen: Konzeptionelle Grundlagen und Folgerungen für die Förderung in Deutschland*. Kurzstudie, <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-555002.html> (abgerufen am: 09.11.2020).

De Groote, Julia K./Backmann, Julia (2019), »Initiating open innovation collaborations between incumbents and startups: How can David and Goliath get along?«, in: *International Journal of Innovation Management*, 24 (02), S. 1–33.

Ecker, Wolfgang/Coulon, Carl-Helmut/Kohler, Markus (2021), *KI in die Anwendung bringen – Eine Gemeinschaftsaufgabe für Hochschulen, Forschungseinrichtungen Unternehmen und Politik*. Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme, München: Lernende Systeme – Die Plattform für Künstliche Intelligenz, Geschäftsstelle/acatech.

Edler, Jakob/Blind, Knut/Frietsch, Rainer/Kimpeler, Simone/Kroll, Henning/Lerch, Christian/Reiss, Thomas/Roth, Florian/Schubert, Torben/Schuler, Johanna/Walz, Rainer (2020), *Technologiesouveränität – Von der Forderung zum Konzept*, Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI.

- Edquist, Charles (1997), *Systems of Innovation. Technologies, Institutions and Organizations*, London/New York.
- EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (2019), *Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2019*, Berlin: EFI.
- EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (2021), *Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2021*, Berlin: EFI.
- EFI (Expertenkommission Forschung und Innovation) (2022), *Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022*, Berlin: EFI.
- EU (European Commission, Directorate-General of Communications Networks, Content & Technology) (2020), *European enterprise survey on the use of technologies based on artificial intelligence: final report*, Luxemburg: Publications Office of the European Union, <https://data.europa.eu/doi/10.2759/759368> (abgerufen am: 21.03.2022).
- Fagerberg, Jan/Srholec, Martin (2008), »National innovation systems, capabilities and economic development«, in: *Research Policy*, 37, S. 1417–1435.
- Ferber, Stefan (2019), Mit Offenheit das IoT erobern. In: Andreas Boes/Barbara Langes (Hrsg.), *Die Cloud und der digitale Umbruch in Wirtschaft und Arbeit. Strategien, Best Practices und Gestaltungsimpulse*, Freiburg: Haufe, S. 69–75.
- Ford, Martin (2018), *Architects of Intelligence: The truth about AI from the people building it*, Birmingham: Packt Publishing.
- Forschungsbeirat/acatech (Hg.) (2022), *Open Source als Innovationstreiber für Industrie 4.0*, München: Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech.
- Forschungsbeirat/acatech (Hg.) (2022a), *Aufbau, Nutzung und Monetarisierung einer industriellen Datenbasis*, München: Forschungsbeirat der Plattform Industrie 4.0/acatech.
- Forschungsunion/acatech (Hg.) (2013), *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0*. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0, Frankfurt am Main: Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft/acatech.
- Gesellschaft für Informatik (2019), *Data Science: Lern- und Ausbildungsinhalte*, https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/GI_Arbeitspapier_Data-Science_2019-12_01.pdf (abgerufen am: 11.11.2021).
- Gibbons, Michael/Limoges, Camille/Nowotny, Helga/Schwartzmann, Simon/Scott, Peter/Trow, Martin (1994), *The new production of knowledge. The dynamics of science and research in contemporary societies*, London: SAGE.
- Godin, Benoît (2017), *Models of Innovation. The History of an Idea*, Cambridge: MIT Press.
- Görz, Günther/Braun, Tanya/Schmid, Ute (2021), Einleitung. In: Günther Görz, Tanya Braun, Ute Schmid (Hg.), *Handbuch der Künstlichen Intelligenz. 6. Aufl.*, Berlin/Boston: De Gruyter Oldenbourg, S. 1–26.
- Gornig, Martin/Belitz, Heike/Geppert, Kurt/Löckener, Ralf/Schiersch, Alexander/Werwatz, Axel (2018), »Industrie in der Stadt: Wachstumsmotor mit Zukunft«, in: *DIW Wochenbericht*, 47, Berlin.

- Granstrand, Ove/Holgersson, Marcus (2020), »Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition«, in: *Technovation*, Vol. 90–91, 102098.
- Haddad, Carolina/Nakic, Valentina/Bergek, Anna/Hellsmark, Hans (2022), »Transformative innovation policy: A systematic review«, in: *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 43, S. 14-40.
- Hahn, Katrin/Kuhlmann, Stefan (2018), *Offene Innovationskulturen schaffen. Kollektive Antizipation und Experimentieren als Herausforderung und Möglichkeit für Innovationspolitik. Abschlussbericht Projekt AntEx*, https://www.tib.eu/de/suchen?tx_tibsearch_search%5Baction%5D=download&tx_tibsearch_search%5Bcontroller%5D=Download&tx_tibsearch_search%5Bdocid%5D=TIB-KAT%3A1029921326&cHash=15ede7166761d3a01e3dd154e8b19a9b# (abgerufen am: 10.11.2021).
- Hekkert, M./Suurs, R.A.A./Negro, S.O./Kuhlmann, S. (2007), »Functions of Innovation Systems: A New Approach for Analysing Technological Change«, in: *Technological Forecasting and Social Change*, 74 (4), S. 413–432.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2008), »»Low-Tech« Innovations«, in: *Industry & Innovation*, 15 (1), S. 19–43.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2020), *Digitale Transformation von Arbeit. Entwicklungstrends und Gestaltungsansätze*, Stuttgart: Kohlhammer.
- Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2023). *Das Versprechen der Künstlichen Intelligenz. Gesellschaftliche Dynamik einer Schlüsseltechnologie*. Frankfurt/New York: Campus.
- Höhn, Hilmar (2020): »... leuchtet die Zukunft hervor«, in: Hans-Böckler-Stiftung, Dossier Nr. 8/9, Düsseldorf, https://www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-007836 (abgerufen am: 19.01.2023).
- Howaldt, Jürgen/Kaletka, Christoph/Schröder, Antonius (Hg.) (2021), *A Research Agenda for Social Innovation*, Cheltenham: Edward Elgar.
- ISI (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung) (2016), *Innovationssystem – breiter denken: Fünf Thesen an die Innovationspolitik zu einem neuen Innovationssystemverständnis*, https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/ccp/thesenpa-piere/Thesenpapier_Innovationssystem.pdf (abgerufen am: 01.03. 2022).
- Jackson, Gregory/Sorge, Arndt (2012), »The trajectory of institutional change in Germany, 1979 – 2009«, in: *Journal of European Public Policy*, 19, S. 1146–1167.
- Kersting, Kristian/Tresp, Volker (2019), *Maschinelles und Tiefes Lernen*. Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme, München, https://www.plattform-lernende-systeme.de/files/Downloads/Publikationen/Zusammenfassungen/AG1_WP_Kurzfassung_final_200303.pdf (abgerufen am 19.01.2023).
- Kirchmann, Andrea/Laub, Natalie/Maier, Anastasia/Zühlke, Anne/Boockmann, Bernhard (2021), *Technologische Innovationen und Wandel der Arbeitswelt in Deutschland: Herausforderungen für die berufliche Aus- und Weiterbildung sowie die Re-Qualifizierung im Zuge des digitalen Wandels*. Studien zum deutschen Innovationssystem, Nr. 10-2021, Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).

- Kroll, Henning/Berghäuser Hendrik/Blind, Knut/Neuhäusler, Peter/Scheifele, Fabian/Thielmann, Axel/Wydra, Sven (2022), »Schlüsseltechnologien«, in: *Studien zum deutschen Innovationssystem*, Nr. 7, Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).
- Krokowski, Thorben/Hirsch-Kreinsen, Hartmut (2022), *Vertrauenswürdige KI Made in Germany und Europe: Distinktionsmerkmal oder Verkaufstrick?* Beiträge aus der Forschung, Sozialforschungsstelle Dortmund.
- Kuhlmann, Stefan/Rip, Arie (2018), »Next Generation Innovation Policy and Grand Challenges«, in: *Science and public policy*, 45 (4), S. 448–454.
- Laguna de la Vera, Rafael/Ramge, Thomas (2021), *Sprunginnovation*, Berlin: Econ.
- Lane, Christel/Wood, Geoffrey (2009), »Capitalist diversity and diversity within capitalism«, in: *Economy and Society*, 38, S. 531–551.
- Lundvall, Bengt-Åke (2007), »National Innovation Systems – Analytical Concept and Development Tool«, in: *Industry and Innovation*, (14) 1, S. 95–119.
- Mazzucato, Mariana, (2018), »Mission-oriented innovation policies: challenges and opportunities«, in: *Ind. Corp. Change*, 27, S. 803–815.
- Malhotra, Arvind/Majchrzak, Ann (2021), »Hidden patterns of knowledge evolution in fluid digital innovation«, in: *Innovation: Organization & Management*, 24, 10.1080/14479338.2021.1879653.
- Majchrzak, Ann/Griffith, Terri L. (2020), The new wave of digital innovation: the need for a theory of sociotechnical self-orchestration. In: Satish Nambisan/Kalle Lyytinen/Youngjin Yoo (2020), *Handbook of Digital Innovation*, Cheltenham: Edward Elgar, S. 17–40.
- Markard, Jochen/Truffer, Bernhard (2008), »Technological Innovation Systems and the Multi-Level Perspective: Towards an Integrated Framework«, in: *Research Policy*, 37 (4), S. 596–615.
- Satish Nambisan/Kalle Lyytinen/Youngjin Yoo (2020), *Handbook of Digital Innovation*, Cheltenham: Edward Elgar.
- Satish Nambisan/Kalle Lyytinen/Youngjin Yoo (2020), Digital innovation: towards a transdisciplinary Perspective. In: dies. (Hrsg.). *Handbook of Digital Innovation*, Cheltenham: Edward Elgar, S. 2–12.
- Nelson, R. R. (ed.) (1993), *National Innovation Systems: A Comparative Analysis*, New York/Oxford: Oxford University Press.
- Nowotny, Helga/Scott, Peter/Gibbons, Michael (2001), *Re-Thinking Science. Knowledge and the Public in an Age of Uncertainty*, Cambridge: Polity.
- Otto, Boris (2021), »Deutsche Innovationen auf die Straße bringen«, in: *FAZ*, 22.11.2021, <https://zeitung.faz.net/faz/unternehmen/2021-11-22/3b1844679510df38c00ffd42ad3beade/?GEPC=s5> (abgerufen am: 23.11.2021).
- Pinch, T. J., /Bijker, W.E. (1984), »The social construction of facts and artefacts: or How the sociology of science and the sociology of technology might benefit each other«, in: *Social studies of science*, 14 (3), S. 399–441.

Polt, Wolfgang/Berger, Martin/Boekholt, Patries/Cremers, Katrin/Egeln, Jürgen/Gassler, Helmut/ Hofer, Reinhold/Rammer, Christian (2010), *Das deutsche Forschungs- und Innovationssystem. Ein internationaler Systemvergleich zur Rolle von Wissenschaft, Interaktionen und Governance für die technologische Leistungsfähigkeit*. Studien zum deutschen Innovationssystem Nr. 11-2010, Berlin: Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI).

Science Media Center (2021), *Transkript »Künstliche Intelligenz – Stand der Forschung und Förderung in Deutschland«*, https://www.sciencemediacenter.de/fileadmin/user_upload/Press_Briefing_Zubehoer/Transkript_KI-Situation-Deutschland_SMC-Press-Briefing_2021-03-17.pdf (abgerufen am: 04.02.2022).

Schmoch, Ulrich/Frietsch, Rainer (2020). Perspektiven des deutschen Innovationssystems: Technologische Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftlicher Wandel. In: Birgit Blättel-Mink/Alexander Ebner (Hrsg.), *Innovationssysteme: Technologie, Institutionen und die Dynamik der Wettbewerbsfähigkeit. 2. Auflage*, Wiesbaden: VS-Verlag für Sozialwissenschaften, 287–310.

Sorge, Arndt/Streeck, Wolfgang (2016), *Diversified quality production revisited the transformation of production systems and regulatory regimes in Germany*. MPIfG Discussion Paper, Nr. 16/13, Köln, https://pure.mpg.de/rest/items/item_2367957_3/component/file_2367955/content (abgerufen am: 19.01.2023).

ten Hompel, Michael/Anderl, Rainer/Schöning, Harald (2019), *Schneller zum Markterfolg. Memorandum des Forschungsbeirats der Plattform Industrie 4.0*. München: acatech.

The Economist (2022), The race to reinvent the car industry, 14.11.2022, <https://www.economist.com/business/2022/11/14/the-race-to-reinvent-the-car-industry> (abgerufen am: 20.12.2022).

Uni Tübingen (2022), *Cyber Valley*, <https://uni-tuebingen.de/forschung/kooperationspartner/cyber-valley/> (abgerufen am: 19.02.2022).

Warnke, Philine/Koschatzky, Knut/Dönitz, Ewa/Zenker, Andrea/Stahlecker, Thomas/Som, Oliver/Cuhls, Kerstin/Güth, Sandra (2016), *Opening up the innovation system framework towards new actors and institutions*. Discussion Papers Innovation Systems and Policy Analysis, Nr. 49. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung.

Weber, K. Matthias/Rohracher, Harald (2012), »Legitimizing research, technology and innovation policies for transformative change: Combining insights from innovation systems and multi-level perspective in a comprehensive »failures« framework«, in: *Research Policy*, 41 (6), S. 1037–1047.

Weber, K. Matthias/Truffer, Bernhard (2017), »Moving innovation systems research to the next level: towards an integrative agenda«, in: *Oxford Review of Economic Policy*, 33 (1), S. 101–121.

WEF (World Economic Forum) (2018), *Global Competitiveness Report*, Cologny, Schweiz: WEF.

Werle, Raymund (2005), »Institutionelle Analyse technischer Innovationen«, in: *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 57 (2), S. 308–332.

Wessels, Jan (2020), *Zwölf Thesen zu den Auswirkungen der Corona-Pandemie auf das deutsche Innovationssystem*. Working Paper of the Institute for Innovation and Technology Nr. 51. Berlin, https://www.iit-berlin.de/iit-docs/4b8adb54b9214d9698bc322803fe547d_2020_07_iit-perspektive_Nr_51.pdf (abgerufen am: 19.01.2023).

West, Joel/Salter, Ammon/Vanhaverbeke, Wim/Chesbrough, Henry (2014), »Open innovation: The next decade«, in: *Research Policy*, 43 (5), S. 805–811.

Whitley, R. (2007). *Business Systems and Organizational Capabilities: The Institutional Structuring of Competitive Competences*, Oxford: Oxford University Press.

Wilbers, Karl; Esser, Friedrich Hubert (2022): Berufliche Bildung: Und sie bewegt sich doch! <https://zeitung.faz.net/faz/wirtschaft/2022-12-15/85cc36efb7bab59903a8364f5e6fe19a/?GEPC=s5> (16.12.2022).

Winter, J. (2017): Europa und die Plattformökonomie – Wie datengetriebene Geschäftsmodelle Wertschöpfungsketten verändern. In: Manfred Bruhn/Karsten Hadwich (Hrsg.): *Dienstleistungen 4.0. Geschäftsmodelle – Wertschöpfung – Transformation. Band 2*. Wiesbaden: Springer Gabler, S. 71–88.

Band 214
Beiträge aus der Forschung

sfs