

**Eduard C. Groen, Rasmus Adler, Frank Elberzhager,
Julien Siebert, Peter Liggesmeyer (Herausgeber)**

Anwendungsfälle zu dynamischen Systemen der Systeme der Zukunft

Executive Summary

Die zukünftige Rolle dynamischer Systems-of-Systems für sechs Domänen greifbar gemacht

Insight: *Dynamische Systems-of-Systems stellen die Zukunft der digitalen Transformation sicher*

Die zukünftige Entwicklungsrichtung der digitalen Transformation benötigt Formen von Kollaboration und Optimierung, für die heute noch keine Lösungen existieren. In verschiedenen Domänen steigt der Bedarf nach Formen **»globaler« Kollaboration** an, die auch **Domänen-grenzen überspannen** können. Anwendungsfälle, die dies ermöglichen, erfordern den Einsatz **vertrauenswürdiger dynamischer Systems-of-Systems mit autonomen Komponenten** (verkürzt: »DynaSoS«). Die Zukunftsgestaltung mittels DynaSoS verlangt die Beantwortung vieler grundlegender **Forschungsfragen** bei der Entwicklung von Systems-of-Systems bezüglich Aspekten wie Automatisierung, Vernetzung oder den Einsatz Künstlicher Intelligenz.

Insight: *Viele Domänen benötigen dynamische Systems-of-Systems. Wir haben sechs Anwendungsbereiche konkret analysiert*

Das Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) dazu beauftragt, unter Begleitung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) Forschungsfragen bzgl. DynaSoS zu sammeln, zu konsolidieren und darzustellen.

Insight: *Querschnittliche Themen können als Forschungssäulen dargestellt werden, die domänenübergreifende Herausforderungen bündeln*

Ein erster Schritt bestand darin, auf Basis des Stands der Technik und im engen Austausch mit Expertinnen und Experten aus Industrie und Forschung **Anwendungsfälle** zu formulieren, die die Relevanz von DynaSoS erklären, illustrieren und greifbar machen. Dieser Bericht bündelt die identifizierten und ausdefinierten Anwendungsfälle für dynamische Systems-of-Systems in den sechs betrachteten Anwendungsbereichen **»Smart Farming«, »Smart Manufacturing«, »Smart Mobility«, »Smart Healthcare«, »Smart Energy«** und **»Smart City & Regions«**.

Insight: *Das Projekt »Dyna-SoS« sammelt die Herausforderungen auf strukturierte Weise und leitet daraus Forschungsfragen ab*

Durch die **Betrachtung verschiedener Anwendungsbereiche** wird die Ableitung von **domänenübergreifenden Forschungsfragen zu relevanten Querschnittsthemen im Bereich des Systems und Software Engineering** ermöglicht sowie eine **multiperspektivische Sichtweise für eine Querbefruchtung** zwischen Herausforderungen und Lösungen der Anwendungsbereiche gefördert. Die Auswahl von Anwendungsfällen aus diesen Bereichen bildet die Grundlage für die Ableitung weiterer Artefakte in nachfolgenden Arbeitspaketen, darunter die Herausforderungen, repräsentative Beispielsysteme, Anforderungen, Entwicklungsfelder, Handlungsempfehlungen, sowie einer Forschungsarchitektur zur Strukturierung von Software-Engineering-Forschungsthemen für dynamische Systems-of-Systems.

Insight: *Die Forschungsfragen zu dynamischen Systems-of-Systems sollen durch geförderte Projekte beantwortet werden*

Inhalt

Executive Summary	2
Einleitung	4
Anwendungsbereich »Smart Farming«	7
Anwendungsbereich »Smart Manufacturing«	13
Anwendungsbereich »Smart Mobility«	19
Anwendungsbereich »Smart Healthcare«	25
Anwendungsbereich »Smart Energy«	31
Anwendungsbereich »Smart City & Regions«	37
Ausblick	45

Einleitung

Innovative Anwendungsfälle für den Einsatz von dynamischen Systems-of-Systems in sechs Anwendungsbereichen

In diesem Bericht stellen wir die sechs Anwendungsfälle vor, die im Rahmen des Projekts »DynaSoS« erstellt wurden. Das Vorhaben hat die Aufgabe, dem Software-Engineering für vertrauenswürdige, dynamische Systems-of-Systems (SoS) mit autonomen Komponenten neue Impulse zu geben.

Ziel ist es, Forschungsfragen zu sammeln

Die Anwendungsfälle sind der erste Schritt zur Erreichung des Projektziels, die aktuellen Fragestellungen hinsichtlich der Entwicklung von dynamischen SoS zu sammeln, zu konsolidieren und darzustellen um somit die Forschung bzgl. dynamischen SoS voranzutreiben. Wir definieren System-of-Systems (SoS) nach Gorod, Sauser und Boardman (2008):

»Ein System von Systemen führt eine Reihe von Systemen zusammen, um eine Aufgabe zu erfüllen, die keines der Systeme allein bewältigen kann, wobei jedes konstituierende System sein eigenes Management, seine eigenen Ziele und seine eigenen Ressourcen behält, während es sich innerhalb des SoS koordiniert und sich anpasst, um die Ziele des SoS zu erreichen.«

AP 1: Anwendungsfälle

Arbeitspaket 1 des DynaSoS-Projekts war dazu ausgelegt, beispielhafte Anwendungsfälle für verschiedene Anwendungsbereiche zu erstellen. Abbildung 1 zeigt eine Übersicht der Anwendungsbereiche und den jeweiligen Anwendungsfall.

Ein wichtiges Ziel des Projekts ist es, die Qualität dieser Anwendungsfälle sicherzustellen, d. h., dass die Ergebnisse aussagekräftig sind und auf einer belastbaren Datenbasis beruhen. Hierzu wurde zum einen der Stand der Wissenschaft und Technik aus Veröffentlichungen und anderen Ressourcen analysiert. Zum anderen wurden mithilfe von Interviews und Workshops die Einschätzungen von Expertinnen und Experten aus der Industrie und Forschung bezüglich aktueller Herausforderungen, Forschungsfragen und Lösungsrichtungen in der nahen Zukunft der SoS erhoben. So konnten die technologischen, gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Implikationen der SoS erfasst werden. Darüber hinaus wurden die Anwendungsfälle mit den Expertinnen und Experten iteriert und validiert.

Obwohl in jedem Anwendungsbereich mehrere identifizierte Anwendungsfälle eine hohe Relevanz haben, wurde pro Bereich nur ein Anwendungsfall ausgewählt. Die Auswahl erfolgte dabei durch Abstimmung in zwei Richtungen: horizontal durch den Abgleich zwischen den Anwendungsbereichen, um zu großen Ähnlichkeiten im Hinblick auf Forschungsfragen vorzubeugen, und vertikal indem Domänen-Expertinnen und -Experten unsere Vorauswahl entweder bestätigten oder ablehnten. Die horizontale Abstimmung ermöglichte es auch, die Schnittstellen zwischen den Anwendungsfällen und die Kopplungen zwischen dynamischen SoS in



Abbildung 1: Die sechs Anwendungsbereiche in DynaSoS mit ihrem jeweiligen Anwendungsfall.

mehreren Anwendungsbereichen aufzudecken und dadurch gemeinsame Potenziale und Herausforderungen herauszuarbeiten.

Die Anwendungsfälle und deren Beschreibungen erfüllen folgende Kriterien um eine solide Ausgangsbasis für weitere Arbeiten im Projekt zu liefern:

- Sie beschreiben eine **neuartige oder innovative Entwicklung** im Anwendungsbereich, die noch nicht komplett ausgereift ist, und somit potenzielle Herausforderungen für die Umsetzung identifiziert werden können. Für die Umsetzung ist der Einsatz von Systems-of-Systems notwendig, die eine globalere Optimierung unterstützen. D. h., keine lokale Optimierung wie die Kopplung einiger Roboter innerhalb einer Firma, sondern komplexere Zusammenhänge auf z. B. Stadt-Ebene.
- Sie wurden auf relativ **hoher Abstraktionsebene**, bspw. als ein »Teilbereich« (»Vertical«) des Anwendungsbereichs erstellt.
- Sie weisen eine **einheitliche Struktur** untereinander auf. Hierzu bat eine Vorlage verschiedene Leitfragen an, die in drei Hauptfragen unterteilt wurde: »Warum ist dieser Anwendungsfall wichtig für die Welt?«, »Was ist die Rolle von Systems-of-Systems in diesem Anwendungsfall?« und »Was ist die Rolle von Software & Systems Engineering in diesem Anwendungsfall?«

- Sie sind in ihrer Darstellung **kurz und knackig**, mit Inhalten, die verständlich, nachvollziehbar und überzeugend ausformuliert sind. Als Richtwert waren 2–3 Seiten DIN-A4 Text, zzgl. Abbildungen, vorgegeben.
- Sie **belegen alle Aussagen** mit belastbaren Expertenaussagen/-zustimmungen, Literatur oder Beispielen.
- Sie sind **im Einklang mit dem Beispielsystem**, das im gleichen Anwendungsbereich im AP2 ausgearbeitet wird. Das Beispielsystem kann entweder kleiner sein als das Beispielsystem und nur einen Teil des Anwendungsfalls umsetzen, oder größer sein als den Anwendungsfall und den vollständig inkludieren.

Auf den nächsten Seiten stellen wir die sechs Anwendungsfälle vor. Anschließend bieten wir einen Ausblick darauf, wie im DynaSoS-Projekt mit diesen Anwendungsfällen weiter gearbeitet wird.

Kriterien für die Anwendungsfälle

Dokumentengliederung



15098.4
1175.19
734.005
756
67

8374.001991



Anwendungsbereich »Smart Farming«

Zielkonflikte im Nachhaltigkeitsdreieck beim Pflanzenschutz durch konsequente Digitalisierung reduzieren

Jens Henningsen, Thomas Jeswein, Bernd Rauch, Ralf Kalmar

Die Festlegung auf einen konkreten Anwendungsfall stellt sich als eine Herausforderung dar, denn eine gemeinsame Vision von der Landwirtschaft der Zukunft teilen führende Agrarexperten derzeit nicht.

Einig waren sich neun Sachverständige in einem [Fachgespräch des Ausschusses für Ernährung und Landwirtschaft zu den »Chancen und Risiken der Digitalisierung in der Landwirtschaft«](#) am Montag, 11. Februar 2019, nur darüber, dass die Auswirkungen auf die Landwirtschaft beträchtlich sein werden. Ausschussvorsitzender Alois Gerig (CDU/CSU) äußerte die Hoffnung, dass die landwirtschaftlichen Betriebe vom digitalen Fortschritt profitieren, vorausgesetzt sie können sich diese Technologien auch leisten. Eine Chance sah der praktizierende Landwirt Gerig darin, dass durch die **Digitalisierung** für alle Arten

der landwirtschaftlichen Produktion mehr Tierwohl, mehr Umweltschutz und noch mehr Lebensmittelsicherheit erreicht werden könne. Marita Wiggerthale, Referentin bei Oxfam Deutschland e. V., monierte hingegen, dass in der Landwirtschaft derzeit die Vor- und Nachteile der Nutzung **künstlicher Intelligenz** kaum diskutiert würden. Es werde sich blind auf von Unternehmen bereitgestellte Technologien verlassen, die am Ende zu einem Verlust von Souveränität führen können. Wiggerthale argumentierte, dass den Nutzern von zur Verfügung gestellten Farmmanagementinformationssystemen (FMIS) nur bestimmte Produkte vermittelt werden. Dadurch könnte die Bindung an wenige große Unternehmen noch enger werden. Ob die Digitalisierung die Landwirtschaft vor diesem Hintergrund nachhaltiger mache, sei nach derzeitiger Wissenslage nicht sicher. Eine Chance sah Prof. Dr. Sonoko Bellingrath-Kimura vom Leibniz-Zentrum für

Meinungsverschiedenheit

Vendor-Lock-In ist eine Gefahr

Potenziale der Digitalisierung



Abbildung 2: Einbettung des Anwendungsfall Pflanzenschutz in den gesamten Prozess (eigene Darstellung).



Nachhaltigkeitsziele sind ein wesentlicher Treiber für Digitalisierung in der Landwirtschaft

Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V. darin, dass durch die Digitalisierung neue Wertschöpfungsketten und neue Anbausysteme etabliert und miteinander verbunden werden können. Erzeugte landwirtschaftliche Produkte könnten nachvollziehbarer an Umweltmaßnahmen gekoppelt und entsprechend honoriert werden.

Passend zu der letztgenannten Aussage wird in dem Gutachten von Bietendüvel et al. (2021) ausgesagt, dass festgelegte **Nachhaltigkeitsziele ein weiterer Treiber für die Digitalisierung** sind. In den durchgeführten Interviews wurde deutlich, dass bei Unternehmen und in Forschungsprojekten (z. B. **COGNAC**, **ATLAS**, **H2020 DEMETER**) in der Landwirtschaft zu erkennen ist, dass nicht mehr die **Verbesserung** einer einzelnen Maschine im Vordergrund steht, sondern ein **landwirtschaftlicher Prozess**, wie zum Beispiel die Düngung, Ernte oder der Pflanzenschutz. Insgesamt stehen die ökologischen, ökonomischen und sozialen

Nachhaltigkeitsziele im Fokus und die Digitalisierung bietet die Chance, die Zielkonflikte bzw. das Spannungsfeld einvernehmlicher aufzulösen. Dies bedeutet, Auswirkungen auf die Umwelt zu reduzieren, Wirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Betriebe zu erhalten (stabile Erträge und hohe Erntequalitäten) und die Versorgung der Bevölkerung mit qualitativ hochwertigen Lebensmitteln zu gewährleisten.

Definition des Anwendungsfalls und dessen Einbettung in den Gesamtprozess

Insbesondere die Anwendungen Düngung und Pflanzenschutz stehen zukünftig im Fokus, da diese in der Farm2Fork Strategie des EU Green Deals fest verankert sind. Im Folgenden wird der Anwendungsbereich für Pflanzenschutz genauer beschrieben. Viele Aspekte daraus können auch auf den Anwendungsfall Düngung übertragen werden.

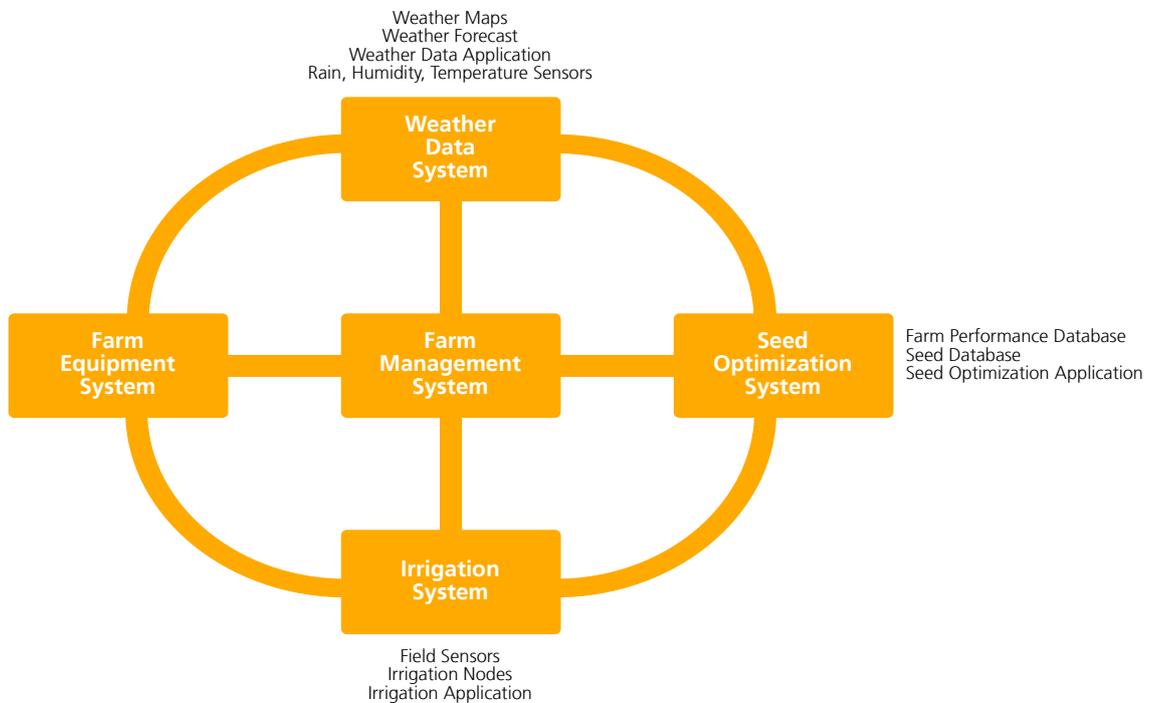


Abbildung 3: System-of-Systems (eigene Darstellung in Anlehnung an Porter & Heppelmann, 2014).



Pflanzenschutz ist ein wichtiger Baustein für die Lebensmittelproduktion und Lebensmittelversorgung der Bevölkerung und ebenso der Nutztierhaltung. Der integrierte Pflanzenschutz (Zusammenspiel unterschiedlicher Pflanzenschutzmaßnahmen, wie z. B. mechanisch, chemisch oder biologisch) ist ein zentraler Bestandteil auf landwirtschaftlichen Betrieben, um nachhaltig hohe Erträge zu erzielen. Vor dem Hintergrund von dynamischen Systems-of-Systems müssen neben den technischen Aspekten weitere Zusammenhänge betrachtet werden, die die Pflanzenschutzanwendung beeinflussen. Abbildung 2 zeigt die Einbettung und die Beziehung des Anwendungsfalls Pflanzenschutz zu unterschiedlichen Systemen (hier spielen **Schnittstellen und dynamische Kopplungen** wichtige Rollen).

Auf der technischen Ebene bestehen unterschiedliche Visionen von Systems-of-Systems. In Abbildung 3 ist der Ansatz von Porter und Heppelmann (2014) für den Ackerbau dargestellt. Im Mittelpunkt steht das Farm Management System und ist mit unterschiedlichen Systemen vernetzt. Im Bereich Pflanzenschutz besteht die Vision, dass gezielt jede einzelne Pflanze auf einem Feld behandelt wird. Dies bedeutet konkret, dass unterschiedliche Technologien autonom den Gesundheitszustand einzelner Pflanzen erfassen und analysieren, Prognose- und Wachstumsmodelle berücksichtigen und Entscheidungen treffen können. Maßnahmen werden mithilfe von autonomen Fahrzeugen durchgeführt. In dieser Vision werden zudem regionale Wettereinflüsse berücksichtigt und Entscheidungen dynamisch angepasst. Somit kann ein digitaler Zwilling von einem Feld bis hin zu einer Pflanze geschaffen werden (insbesondere bei Kulturen mit einer hohen Wertschöpfung denkbar, wie z. B. im Weinbau).

Technologien und Systeme

Nach Aulbur et al. (2019) gibt es insbesondere vier Hauptfelder der Digitalisierung, die die Landwirtschaft verändern werden:

- Bildverarbeitung und Sensorik
- Robotics
- Automatisierung
- Big Data

Der Einsatz und die Weiterentwicklung dieser Technologien ist ebenfalls für den Anwendungsfall Pflanzenschutz relevant und nach unserer Auffassung durch **KI-Methoden** und **autonome Systeme** zu ergänzen bzw. zu spezifizieren. Die Weiterentwicklung der einzelnen Technologien ist entscheidend, aber auch die mangelnde **Interoperabilität** ist nach wie vor eine Herausforderung. Zunächst ist die Interoperabilität in unterschiedliche Ebenen zu unterteilen (Henningsen et al., 2022):

- Pragmatische Interoperabilität (höchste Stufe)
- Semantische Interoperabilität
- Syntaktische Interoperabilität
- Strukturelle Interoperabilität (unterste Stufe)

Viele Initiativen (AgGateway, DKE-agrirouter, AEF) und Projekte (ATLAS, COGNAC) adressieren die Probleme der mangelnden Interoperabilität, aber in der Agrardomäne hat sich noch kein übergreifender Standard gebildet. Dieser Umstand ist auf viele unterschiedliche Gründe zurückzuführen, wie zum Beispiel die Heterogenität des Marktes und die unterschiedliche Maschinenausstattung auf den landwirtschaftlichen Betrieben (unterschiedliches Alter und unterschiedliche Hersteller). Somit befindet sich die Interoperabilität oftmals noch auf den untersten Stufen. Des Weiteren muss die Interoperabilität auf der **horizontalen Ebene** (z. B. Datenaustausch in der Prozesskette zwischen Maschinen) und der **vertikalen Ebene** (Datenaustausch zwischen

Der Pflanzenschutz der Zukunft ist ein zentrales Thema

Die Interoperabilität ist weiterhin ein Problem in der Landwirtschaft



Technologische Entwicklungen im Pflanzenschutz

Maschinen und höherwertigen Diensten) unterschieden werden.

Pflanzenschutz ist aktuell ein sehr dynamischer Markt und viele Neuentwicklungen streben auf dem Markt. Nennenswert sind autonome Systeme (insbesondere Hackroboter), Drohnen mit Multi-Hyperspektralkameras und die Integration von Sensoren, um die Applikation gezielter durchzuführen (z. B. Verminderung der Abdrift von Pflanzenschutzmitteln). Eine Pflanzenschutzanwendung bettet sich zudem in viele unterschiedliche Systeme ein und muss die Informationen daraus ebenfalls berücksichtigen. Zu nennen sind hier insbesondere rechtliche Systeme mit ihren Vorschriften zur Ausbringung (z. B. zugelassene Wirkstoffe, Abstandsauflagen zu Gewässern). Ebenso sind natürliche Systeme wichtig und die Integration in landwirtschaftlichen Prozessen (Berücksichtigung Fruchtfolge, Schadschwellen, technische Ausstattung), ökonomische Systeme (Wirtschaftlichkeit für landwirtschaftliche Betriebe) sowie unternehmerische Geschäftsmodelle.

Vielfältige Herausforderungen

Integrative Ansätze berücksichtigen alle relevanten Prozesse, Rahmenbedingungen und Systemarten

Mehrwerte durch dynamische SoS

Vor allem beim chemischen Pflanzenschutz wird die Zusammenarbeit verschiedener Systeme zunehmen und die Optimierung des gesamten Prozesses angestrebt. Zum einen werden Roboter und autonome Systeme, Bildverarbeitung und Sensorik, sowie Big Data und KI-Methoden vermehrt Aufgaben durchführen, um die Vision der Behandlung jeder einzelnen Pflanze (insbesondere in Hackkulturen) näher zu kommen. Dabei muss die Anwendung in den gesamten Prozess eingebettet werden. Dies bedeutet, rechtliche Rahmenbedingungen sowie pflanzenbauliche und ökologische Systeme zu berücksichtigen. Das beschriebene SoS verfolgt das übergeordnete Ziel, insbesondere die ökologische, ökonomische und soziale Nachhaltigkeit zu erhöhen. Durch die **Zusammenführung und wechselseitige Abstimmung der**

unterschiedlichen Systeme sind unterschiedliche Mehrwerte zu erwarten, wie zum Beispiel die gezieltere Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und damit die Reduzierung von Abdrift, oder die frühzeitige Befallserkennung durch Kameratechnologie, die den Krankheitsbefall bereits erkennt, bevor er mit dem menschlichen Auge wahrgenommen werden kann. Übergeordnete Integration und vertikale Interoperabilität (z. B. Datenaustausch zwischen FMIS) verbessern Prognosen und Aufwandsmengen können angepasst werden. Ebenfalls können sogenannte Heatmaps erstellt und weitere Resistenzen vermieden werden.

Fragen des Software- & Systems-Engineering

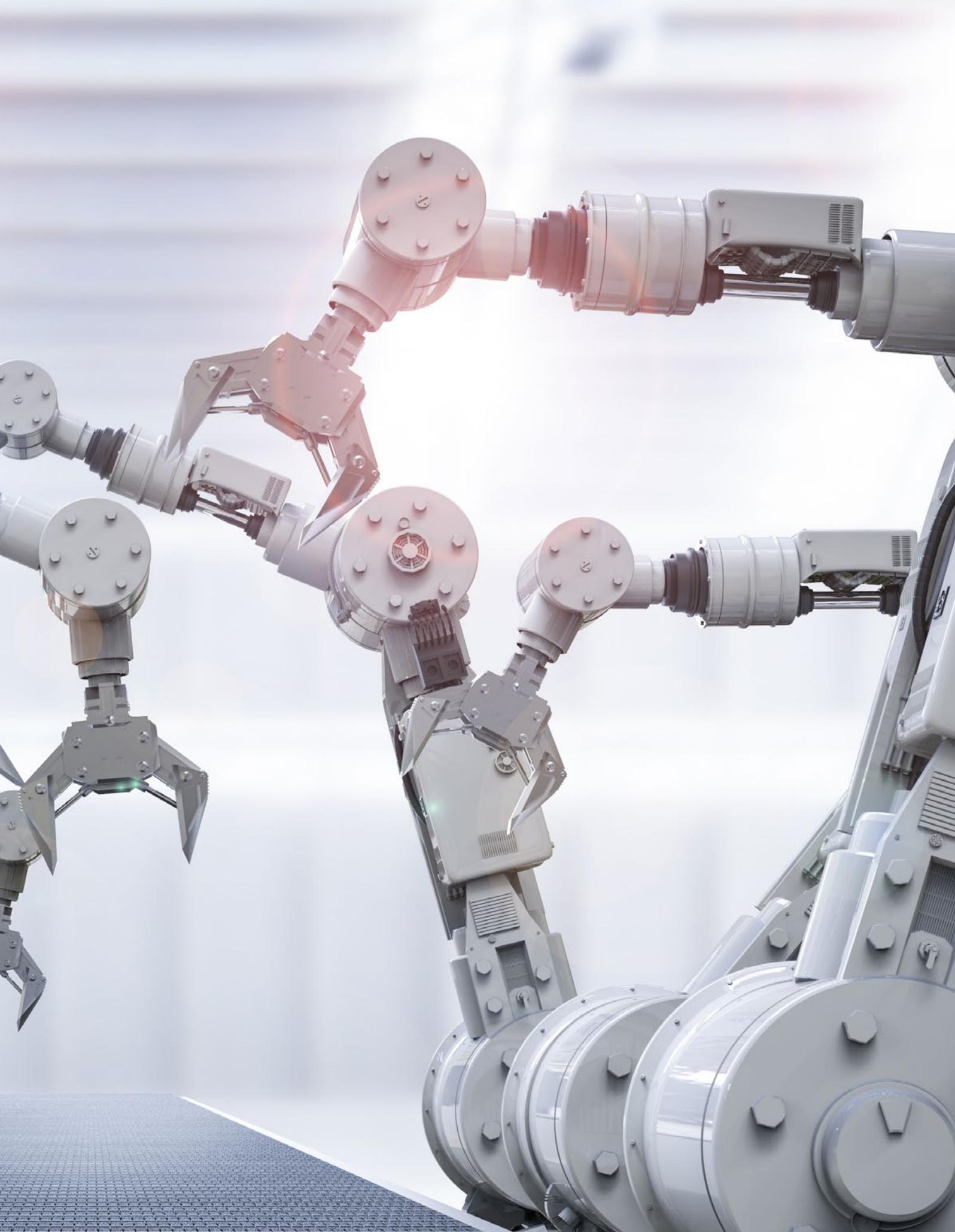
Fokussiert auf die technischen Aspekte, sind noch verschiedene Herausforderungen zu lösen. Insbesondere der Datenaustausch auf semantischer oder pragmatischer **Interoperabilitätsebene** und die Herausforderungen im Bereich **autonomer Systeme**, wie zum Beispiel semantische Umgebungswahrnehmung bzw. Hinderniserkennung. Fragen der Datenspeicherung und der Datenverarbeitung sind ebenfalls noch unbeantwortet und es ist zudem offen, wie **dezentrale und zentrale Plattformen** zusammenspielen können. Im Bereich dynamischer Systems-of-Systems ist ebenfalls deutlich geworden, dass es nicht nur technische Herausforderungen gibt, sondern ebenfalls politische, ökonomische, agronomische bzw. ökologische und auch gesellschaftliche Herausforderungen mit betrachtet werden müssen. Insbesondere in den Interviews wurde deutlich, dass eine **ganzheitliche Betrachtung sehr wichtig** ist. In Tabelle 1 sind die identifizierten Herausforderungen aus den Interviews skizziert.



Tabelle 1: Herausforderungen der Landwirtschaft im Hinblick auf Systems-of-Systems.

Technische Herausforderungen	Politische / Rechtliche Herausforderungen	Ökonomische Herausforderungen	Agronomische / ökologische Herausforderungen	Gesellschaftliche Herausforderungen
<p>Interoperabilität</p> <p>Systemintegration über verschiedene Ebenen</p> <p>Dilemma SoS – horizontale und vertikale Vernetzung</p> <p>Datenspeicherung (Cloud, Edge Computing)</p> <p>Autonome Systeme (Umgebungswahrnehmung)</p> <p>Zusammenspiel zentraler und dezentraler Plattformen</p> <p>Funktionale Verknüpfung der Systeme</p> <p>Semantische Hinderniserkennung autonomer Systeme/ Landmaschinen</p> <p>Integrierte Prozesskettenoptimierung</p> <p>Virtualisierung und Simulation</p>	<p>Interoperabilität keine technische, sondern politische Herausforderung</p> <p>Gestaltung rechtlicher Vorschriften</p> <p>(Globale) Standards für Smart Farming (Datenformat, Schnittstellen)</p> <p>Standardisierungs-dilemma (Vernetzung Unternehmen vs. Geschäftsmodell vs. Innovationskraft)</p> <p>Wer definiert die Regeln im SoS? Data Governance auf SoS Ebene? Bürokratieaufwand</p> <p>Infrastruktur (Mobilfunk, Netzausbau)</p> <p>Trennung Staat und Unternehmen</p> <p>Start-up Kultur</p>	<p>Neuartige Geschäftsmodelle (Digitalisierung) – geeignetes Geschäftsmodell bei Offenlegung der Schnittstellen</p> <p>Welche Geschäftsmodelle entstehen in SoS?</p> <p>Datenmanagement auf landwirtschaftlichen Betrieben</p> <p>Geschäftsmodell für Vernetzung Innen- und Außenwirtschaft nicht vorhanden – ökonomische Effizienzsteigerung</p>	<p>Integrierter Pflanzenschutz</p> <p>Fruchtfolge</p> <p>Wettereinfluss</p> <p>Auswirkungen auf andere Systeme</p> <p>Düngungsstrategie</p> <p>Einsatzumgebung (Regen, Schmutz, Sonne etc.)</p> <p>Integration in die natürlichen Abläufe auf dem landwirtschaftlichen Betrieb</p>	<p>Einbindung Landwirte/ Menschen in Entwicklungsprozess von SoS</p> <p>Arbeitskräftemangel</p> <p>Gesellschaftliche Nachhaltigkeitsziele integrieren</p> <p>Qualifikation der Mitarbeiter</p> <p>Gewöhnungseffekte der Menschen</p> <p>Komplexität der Systeme – Bedienbarkeit für die Anwender muss hoch sein</p>





Anwendungsbereich »Smart Manufacturing«

Dynamisch rekonfigurierbare Produktion durch virtuelle Produktionslinien

Markus Damm, Siwara Schmitt, Pablo Oliveira Antonino

Produktionslinien werden heutzutage manuell und statisch für die Herstellung eines Produktes konfiguriert; bestimmte Produktionsassets sind in der Regel nur für eine Produktionslinie verfügbar. Rekonfigurationen sind aufwendig und erfordern den Stillstand der Produktionslinie.

Durch eine **dynamische Rekonfiguration** der Produktionsassets **zur Laufzeit** können diese effizienter und vielfältiger eingesetzt werden. Im Zusammenspiel mit **flexiblen Transportsystemen**, wie Automated Guided Vehicles (AGV), Autonomous Mobile Robots (AMR) oder Autonomous Forklifts, entsteht so ein hochflexibler Shopfloor, der den variablen Einsatz von Produktionsassets erlaubt. So lassen sich die Produktionsassets auf **virtuelle Produktionslinien** planen, die nicht mehr aus einer statischen Anordnung von Produktionsassets bestehen, sondern diese mit anderen virtuellen Produktionslinien teilen. Neue virtuelle Produktionslinien können somit bei vorhandener Kapazität in kürzester Zeit hinzugefügt werden.

Hohes Optimierungspotential und Eröffnung neuer Geschäftsmodelle

Dieser Ansatz eröffnet **neue Optimierungspotentiale**, die über die Maximierung der Produktionsmengen hinausgehen. So könnte

etwa auf zeitlich variable Energiepreise durch die **Verschiebung energieintensiver Produktionsschritte** in preislich günstigere Zeitfenster reagiert werden. Durch ein intelligentes Scheduling der Produktion können des Weiteren auch Lastspitzen über alle virtuellen Produktionslinien hinweg vermieden werden. Da Produktionsassets austauschbar werden, kann deren Wartung unabhängiger von der Produktion geplant und etwa auf Lebensdauer optimiert werden.

Solch eine rekonfigurierbare Produktion durch virtuelle Produktionslinien ermöglicht **hochdynamische Geschäftsmodelle**, die folgende Vorteile mit sich bringen:

- Überschüssige Produktionskapazitäten können am Markt angeboten werden
- Statt Produktionsassets zu kaufen, können diese geleast und pro Nutzung abgerechnet werden
- Aufträge könnten mittels Smart Contracts automatisch abgewickelt werden, die etwa auch Lagerstände berücksichtigen
- Produktionsqualitätseigenschaften und Einsatzstrategien können kontinuierlich evaluiert und simuliert werden

Dynamische Rekonfigurationen in der Produktion steigern die Effizienz



Offene Herausforderungen in der Produktion

Industrie 4.0 und Wirklichkeit

Das in den letzten Jahren aufgekommene Industrie 4.0 Paradigma ist letztlich ein Bestreben, die seit den 80er Jahren auseinanderstrebenden Welten von Industrieautomatisierung und IT wieder zusammen zu bringen. Auch wenn schon einiges erreicht wurde, insbesondere in Richtung Datenverfügbarkeit, haben die befragten Experten einige Punkte genannt, die weiterhin Herausforderungen darstellen:

- **Dynamische Adaptivität:** Statische Produktionsplanung verhindert die flexible Nutzung von Produktionsassets und mithin eine bessere Nutzung von Ressourcen sowie eine weitere Minimierung von Ausfallrisiken.
- **Gap zwischen Theorie und Praxis:** Im Rahmen von Industrie 4.0 erarbeitete Konzepte, wie prädiktive Wartung und fähigkeitsbasierte Kombination von Produktionsassets, kommen noch nicht in der Anwendung an.
- **Standardisierte Kommunikation:** Auch wenn dies ein Kernthema in der Industrie 4.0 ist, wurde dieser Punkt immer wieder angemahnt.

Der hier beschriebene Anwendungsfall stellt in diesem Sinne ein maximales Industrie 4.0-Beispiel dar und setzt Forschungsprojekte wie bspw. BaSys 4.0 und 4.2 fort, die im Wesentlichen eine einfachere Wandelbarkeit der Produktion zum Ziel hatten; also die Minimierung der Stillstandszeiten während der Umrüstung, nicht deren vollständige Vermeidung.

Die oben beschriebene Vision ermöglicht diese durch die Verknüpfung unabhängiger Produktionszellen mit flexibler Intralogistik, bei der Ausfälle zur Laufzeit durch äquivalente oder ausreichend ähnliche Produktionszellen kompensiert werden können. Produkte und Fertigungsteile, die sich selbständig durch die Produktion navigieren, ist eine Zukunftsvision, die von mehreren Experten geteilt wird, etwa umgesetzt durch AGV (Beinschob & Reinke, 2015; Theunissen et al., 2018). Weitere Ansätze für einen flexiblen Transport auf dem Shopfloor sind rekonfigurierbare Fließbänder (Barbosa, Leitão, & Teixeira, 2018; Sun et al., 2019) und Transport durch Werfen (Mironov, 2017; Pongratz et al., 2010).

Ein weiteres Thema, das häufiger genannt wurde, ist die firmenübergreifende Vernetzung zu dynamischen Lieferketten, wie sie bspw. mit Bestrebungen der VW Industrial



Cloud auch schon von Seiten der Industrie verfolgt wird. In einem solchen Umfeld kann eine wie im Anwendungsfall beschriebene Fabrik als hochflexibles Teilsystem hervorragend ihre Produktionskapazitäten anbieten und in gewissem Sinne als »Flexibilitätsbuffer« im Zusammenspiel mit weniger dynamischen Produktionsstätten dienen.

Ebenfalls häufiger genannt wurde das Thema Ausbildung und Mangel an Fachkräften mit dem für Industrie 4.0 notwendigen Spektrum an Fachwissen. In Bezug auf den Anwendungsfall wäre hier die Aufgabe zu analysieren, wie sich der Mensch in diese Arbeitswelt einfügt und was dies für die notwendigen Qualifikationen bedeutet.

Dynamische Systems-of-Systems in der Produktion

Die Systems-of-Systems Sichtweise war der Industrieautomatisierung schon immer zu eigen, auch wenn es nicht so genannt wurde. Mit der Automatisierungspyramide sind verschiedene Hierarchieebenen in der Automatisierung definiert, die jeweils klar definierte Aufgaben übernehmen (Auftragsabwicklung, Produktionsplanung, Prozesssteuerung, etc.). Hierbei kommunizieren die Systeme der unterschiedlichen Hierarchieebenen über definierte Schnittstellen miteinander. Dies hat den Vorteil, dass Systeme innerhalb einer Ebene weitestgehend unabhängig von Systemen anderer Ebenen agieren können. Auch wenn ein Ziel von Industrie 4.0 das Aufbrechen dieser Automatisierungspyramide ist, so werden die typischen Aufgaben in den verschiedenen Bereichen bestehen bleiben und für eine Produktion, wie im Anwendungsfall skizziert, dynamisch und ad-hoc vernetzbar sein müssen.

In der Literatur wird dieser Übergang von der klassischen Automatisierungspyramide auch unter dem Gesichtspunkt Systems-of-Systems (SoS) betrachtet und alternative Modelle

werden propagiert, etwa das bekannte RAMI 4.0 Modell (Axelsson, Fröberg, & Eriksson, 2018; Xu, 2020), welches industrielle Systeme anhand der Achsen Life Cycle, Systemhierarchie und System-Layer organisiert. Colombo, Bangemann, and Karnouskos (2013) schlagen ein Modell mit Achsen für Life Cycle, Intra-Enterprise Domain und Value-Chain Domain vor. Generell wird der Nutzen der SoS-Sichtweise im (modellbasierten) Systems Engineering und Design von Automatisierungssystemen gesehen, etwa mit Architekturframeworks (Mahmood & Montagna, 2012), beim Entwurf von SCADA Systemen (Karnouskos & Colombo, 2011) oder mit Fokus auf Life Cycle Engineering und Sustainable Manufacturing (Mennenga et al., 2019). In Zhou et al. (2011) wird eine SoS-Entwurfsmethodik auf ein einfaches Intralogistikbeispiel angewendet.

Ein wesentliches Element für die ad-hoc Vernetzung auf dem Shopfloor ist die Kombination von Produktionsassets mittels ihrer Fähigkeitsbeschreibungen. Im Kontext des Anwendungsfalls würde das bedeuten, dass zur Umsetzung eines Produktionsschrittes das Produktionsplanungssystem die verfügbaren Assets, die die geforderten Fähigkeiten besitzen, auffindet und diese dann geeignet orchestriert. Dies stellt letztlich eine automatisierte Synthese von Produktionsprozessen dar.

Orchestrierung von Systemen über Fähigkeitsabgleiche

Im Kontext von Industrie 4.0 haben sich in den letzten 10 Jahren die Arbeiten zu sogenannten Fähigkeitsbeschreibungen von Systemen stark verstetigt. Zwar haben diese Arbeiten bisher den Reifegrad von prototypischen Umsetzungen nicht überschritten (Froschauer et al., 2022), dennoch wird hier ein großes Potential für dynamische SoS hinsichtlich der selbstständigen Orchestrierung von Systemen zu einem SoS-Verbund gesehen, der sich entsprechend seiner Zielvorgaben

*Alternativen zur
Automatisierungspyramide*



* Bestätigt in Experten-Interviews mit Karl Tröger (PSI Software AG), Andreas Grieshaber (Sick GmbH), Christian Diedrich (ifak, OvGU) und Björn Höper (LTSOFT GmbH)

Fähigkeitsbeschreibungen ermöglichen autonome und dynamische Adaptierungen

formiert*. Nach Bayha et al. (2020) stellen Fähigkeiten implementierungsunabhängige Beschreibungen von Systemfunktionen dar, die einen bestimmten Effekt in der realen oder virtuellen Welt erreichen. Dabei findet eine funktionale Abstraktion statt, die es ermöglicht, Systemfunktionen, unabhängig von ihrer Implementierung, miteinander zu vergleichen. Meist liegen diese Fähigkeitsbeschreibungen in semantischer, formalisierter Form vor, die sowohl maschinen- als auch menschenlesbar sind. Dadurch lassen sich Fähigkeitsabgleiche (teil-)automatisiert durchführen.

In einer Kooperation zwischen der Plattform I4.0, dem VDI GMA 7.20 sowie dem durch das BMBF geförderten Forschungsprojekt »BaSys 4.2« entstand das White Paper zur Fähigkeitsbeschreibungen von Industrie 4.0 Komponenten (Bayha et al., 2020). Darin ist ein möglicher Ansatz für einen Fähigkeitsabgleich beschrieben, der in Abbildung 4 veranschaulicht ist.

Hierin wird der Ansatz als »Capability-based Continuous Engineering and Operation« bezeichnet. Bereits der Titel lässt darauf schließen, dass dieser Ansatz sowohl während der Engineering- als auch der Betriebsphase angewendet werden kann. Da dieser Ansatz auf die Produktherstellung ausgelegt ist, bilden das Rezept bzw. der Prozess den Startpunkt. An dieser Stelle wäre auch eine formal beschriebene Zieldefinition eines SoS-Verbundes denkbar.

Für den Fall der Produktherstellung beschreiben ein Rezept bzw. ein Prozess, wie das gewünschte Produkt erstellt werden soll. Diese Beschreibung enthält je Aufgabenschritt eine oder mehrere geforderte Fähigkeiten. Das Rezept bzw. der Prozess mit den geforderten Fähigkeiten ist der Input für den Capability Check. Hierbei werden die geforderten Fähigkeiten mit den Fähigkeiten abgeglichen, die durch vorhandene Systeme zugesichert werden. Es wird geprüft, ob die Herstellung des Produktes prinzipiell mit den bestehenden Ressourcen machbar ist. Ist der Capability Check erfolgreich, werden die möglichen Lösungen weiter im Feasibility Check auf ihre Umsetzbarkeit in der realen Umgebung geprüft. Der Feasibility Check kann bspw. durch eine Simulation oder durch mathematisch-physikalische Berechnungen stattfinden. Der Output des Feasibility Checks ist ein parametrisierter, ausführbarer Produktionsprozess.

Sollten mehrere umsetzbare Lösungen beim Feasibility Check identifiziert werden, kann eine Entscheidung nach vordefinierten Kriterien, wie z. B. Kosten, Zeit, Materialeinsparung, etc., erfolgen. Auch ist an dieser Stelle des Ansatzes eine Optimierung des Produktionsprozesses denkbar. Bei einem erfolgreichen Feasibility Check wird der Produktionsprozess nun zur Skill Execution weitergegeben, die die Ausführung des Produktionsprozesses übernimmt und somit die Herstellung des Produktes steuert. Sollte während der Prozessausführung eine Rekonfiguration der

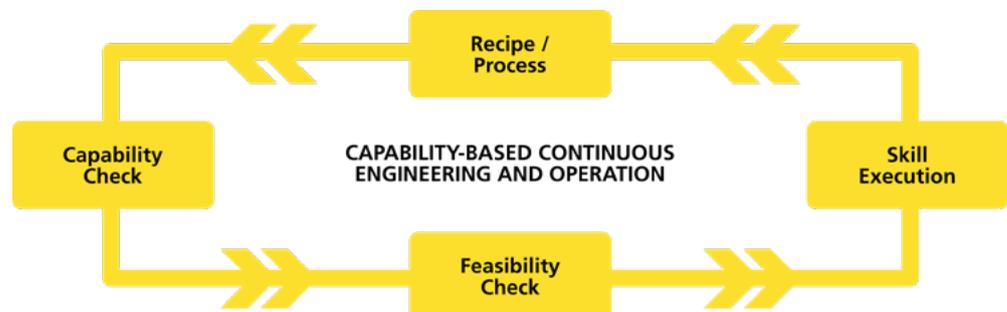


Abbildung 4: Fähigkeitsbasierter Ansatz zur Produktionsplanung (eigene Darstellung in Anlehnung an Bayha et al., 2020).



Produktionsanlage notwendig werden, bspw. durch den Ausfall einer Systemkomponente, so kann die Rekonfiguration der Produktion erneut durch den fähigkeitsbasierten Ansatz erfolgen (Bayha et al., 2020).

Fazit

Die oben beschriebene Vision der dynamisch rekonfigurierbaren Produktion mittels virtueller Produktionslinien adressiert die drei Herausforderungen von dynamischen SoS, die innerhalb der Experteninterviews am häufigsten genannt wurden:

- Dynamische Adaptivität
- Gap zwischen Theorie und Praxis
- Standardisierte Kommunikation

Als eine mögliche Lösung der Problemstellung zur dynamischen Adaptivität wurde in den Experten-Interviews der vorgestellte fähigkeitsbasierte Ansatz zur (Re-)Konfiguration einer Produktionsanlage genannt. Auch wenn dieser Ansatz bislang noch nicht im

produktiven Einsatz ist, so ist bereits jetzt das Potential für dynamische SoS erkennbar. Mittels der funktionalen Abstraktion des fähigkeitsbasierten Ansatzes lassen sich Systeme herstellerunabhängig miteinander vergleichen und orchestrieren. Damit können sich SoS zukünftig (teil-)automatisiert und dynamisch auf ihre Zielvorgaben adaptieren. Die Zuverlässigkeit eines SoS wird durch den Feasibility Check sichergestellt, der potentielle Lösungen auf ihre Realisierung validiert. Die Herausforderung hinsichtlich der standardisierten Kommunikation wird durch Konzepte und Referenzimplementierungen, wie sie in den Forschungsprojekten BaSys 4.0 und 4.2 entstanden sind, adressiert.

Als weiteres Vorgehen innerhalb dieser Studie ist die Konzeption eines Beispielsystems für die skizzierte Vision geplant.

Eine zukünftige Anwendung dynamischer Systems-of-Systems sind die sich autonom (re-)konfigurierenden Produktionslinien





Anwendungsbereich »Smart Mobility«

Dynamische Lieferverkehrszonen zur Optimierung der innerstädtischen Waren- und Lieferverkehre

Patrick Mennig, Thomas Jeswein, Svenja Polst

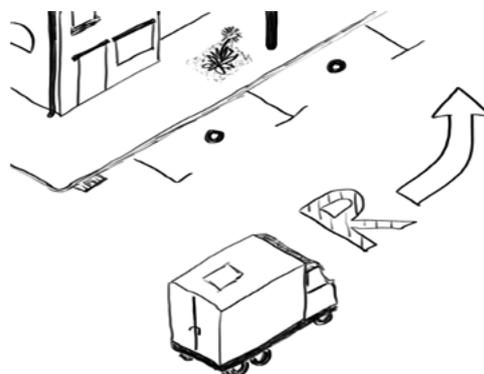
Sehr hohes Verkehrsaufkommen in Städten erzeugt Schadstoffbelastung und senkt die Lebensqualität. Auch Lieferverkehre tragen wesentlich dazu bei.

Durch die **orts- und zeitpräzise Lenkung von Transportvehikeln** (im Folgenden: TV), wie etwa Lieferfahrzeuge für Brief- und Paketzustellungen, in **smarte Ladezonen**, um dort innerhalb genau berechneter Zeitfenster die betreffenden TV be- und entladen zu können, minimieren sich Verkehrsbelastungen durch TV. Die Stellflächen sind dabei nicht fest bestimmt, sondern werden je nach Verkehrslage dynamisch ausgewiesen. Die **dynamischen Lieferverkehrszonen** integrieren sich somit in »Curbside Management« Ansätze und bieten Möglichkeiten für innovative Erweiterungen. Die Vernetzung dieses Systems mit **neuartigen Angeboten** wie beispielsweise bodengebundenen **Lieferdrohnen** ist denkbar. Dabei werden Lieferketten, wie wir sie heute bereits kennen, auf der letzten Meile nicht mehr mit herkömmlichen TV, sondern mit kleinen, angepassten Gefäßen bewältigt. Ebenso ist die Auslieferung an private oder geteilte Gefäße (z. B. Kofferraum von PKW oder autonome Shuttles) denkbar, um so die Wegeketten zu kombinieren. Lieferverkehre können durch Bündelung minimiert werden, wenn Logistikunternehmen miteinander kooperieren.

»Zero Emission« und Nachhaltigkeit als Ziele

Egal ob »Sustainable Mobility«, »Minimum Footprint Mobility« oder »Transformation to Zero Emission«. Die wichtigste Herausforderung im Bereich Mobilität ist die Reduzierung der Treibhausgas- und sonstiger Schadstoffemissionen und die Erhöhung der Nachhaltigkeit in diesem Sektor. Auch wenn nicht alle interviewten Expert*innen diese Herausforderung direkt nennen, schwingt sie dennoch in ihren Ausführungen als gegeben mit. Daneben führt insbesondere der motorisierte Verkehr zu Lärmbelastung (auch bei E-PKW) und hoher Flächennutzung. Das betrifft neben persönlichen Mobilitätszwecken auch Logistikverkehre.

Dynamische Lieferverkehrszonen entlasten die städtische Infrastruktur



In Deutschland werden neben mehr als 60 Millionen Briefen und Katalogen tagtäglich gut 13 Millionen Pakete zugestellt, davon – getrieben durch den Online-Handel – mittlerweile fast 10 Millionen Pakete an Privathaushalte (Meyer, 2022) – Tendenz steigend. Ein besseres Management dieser Verkehre und eine Integration von Liefer- und Warenverkehren in Quartiersmobilitätskonzepte ermöglicht lebenswertere Städte.

Lösungen im Mobilitätsbereich erfordern ein komplexes Zusammenspiel von Sensoren und Modellen

Der Anwendungsfall integriert sich in Forschungsprojekte (z. B. »Urban Loading: Ladezonenmanagement im urbanen Raum«) und Bestrebungen für Curbside Management (z. B. »DB Curbside Management«), Smart City Lösungen und Bestrebungen hin zu autonomen Fahrzeugen (z. B. U-Shift). Insbesondere profitiert er von vorhandener Sensorik (z. B. »Internet of Things«) und Möglichkeiten der Verkehrsüberwachung und Steuerung, aber auch von Mobilitätskonzepten auf Quartiers- und Stadtebene, Mobilitätshubs, Sharing-Konzepten und Erprobungen im Bereich autonomer Mobilität. Wichtige Stakeholder sind hier politische Akteure (Gesetzgebung,

Existierende Regularien, insbesondere im Hinblick auf autonome Fahrzeuge würgen Innovation ab

politischer Rahmen), Anbieter von Logistikdienstleistungen (Speditionen, Paketlogistik), Nutzer*innen, Ladengeschäfte, welche Warenlieferungen erhalten, Quartiers- und Stadtplaner*innen, Anbieter von Mobilitätsdienstleistungen (insb. Sharingangebote), Hersteller von (Liefer-) Fahrzeugen und Kommunen (z. B. Baustellenplanung).

Die bisher in diesem Umfeld getroffenen Maßnahmen sind oftmals nur regulatorischer Natur, sind zurückhaltend und greifen restriktiv in die Verkehrssysteme ein. Gut gemeinte Vorgaben wie die EU »Clean Vehicle Directive«, die im August 2021 in Deutschland durch das »Saubere Fahrzeuge Beschaffungsgesetz« umgesetzt wurde, greifen zu kurz. Der urbanen Logistik haben SPD, Grüne und FDP im aktuellen Koalitionsvertrag nur einen einzigen Satz gegönnt: »Wir unterstützen regionale Güterverkehrskonzepte, fördern emissionsfreie Stadtlogistik wie Ladezonen und Logistik-Hubs« (SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN, & FDP, 2021). Existierende Regularien, insbesondere im Hinblick auf autonome Fahrzeuge, würgen Innovation ab: »Passierschein A38



– genauso läuft es hier«*. Kooperationen von verschiedenen Anbietern scheitern nicht an technischen Hürden, sondern an organisatorischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Gründen. »Oft wird versucht offensichtlich einfache organisatorische Lösungen durch komplexe technische Lösungen zu ersetzen – oder anders: statt einfacher organisatorischer Lösungen komplexe technische Lösungen einzusetzen«, so ein Experte im Interview.

Insgesamt zeigt sich für den Bereich Mobilität ein hoher Grad an Interdependenz: »Jedes einzelne der Systeme [Linienbus, Bahn, on-Demand Verkehr, ...] die wir gerade sehen wäre zum Scheitern verurteilt, wenn wir nur darauf setzen würden. Jedes einzelne alleine reicht nicht.« Dies gilt ebenso für den Güterverkehr, welcher sich in das Gesamtsystem Mobilität und Stadt einordnen muss und mit diesen verwoben ist. Als problematisch wird der aktuelle Stand der Digitalisierung angesehen: »System-of-Systems ist gleich Datenaustausch. Digitalisierung ist nötig, um überhaupt

erst die Grundlage für Austausch zu haben. Wir haben Nachholbedarf, um Daten aus Systemen überhaupt erst verfügbar zu machen damit sie sich überhaupt vernetzen können«.

Dynamische Lieferverkehre als System-of-Systems

Mobilität – und damit auch die innerstädtische Logistik – ist geprägt von fragmentierten Angeboten mit unterschiedlichem Grad an Digitalisierung. Regionale ÖPNV-Angebote sind »teilweise noch im Excel«, während überregionale Anbieter neuer Mobilität von Anfang an digital ausgerichtet waren. Kooperationen zwischen Anbietern sind jedoch aus organisatorischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Gründen schwierig. Logistikunternehmen haben aus ihrer wirtschaftlichen Tätigkeit heraus einen starken Antrieb hin zur Digitalisierung, allerdings sehen wir heute noch keine tiefe Integration ihrer Systeme in Smart City Systeme oder andere Angebote

* Diese Aussage nannte ein Experte im Interview. »Pasierschein A38« referenziert das »Haus, das Verrückte macht« aus dem Film »Asterix erobert Rom«. Diese Persiflage auf die Bürokratie wird als Beschreibung für überbordenden Bürokratismus benutzt

Ein hohes Ausmaß an organisationsübergreifender Integration ist erforderlich

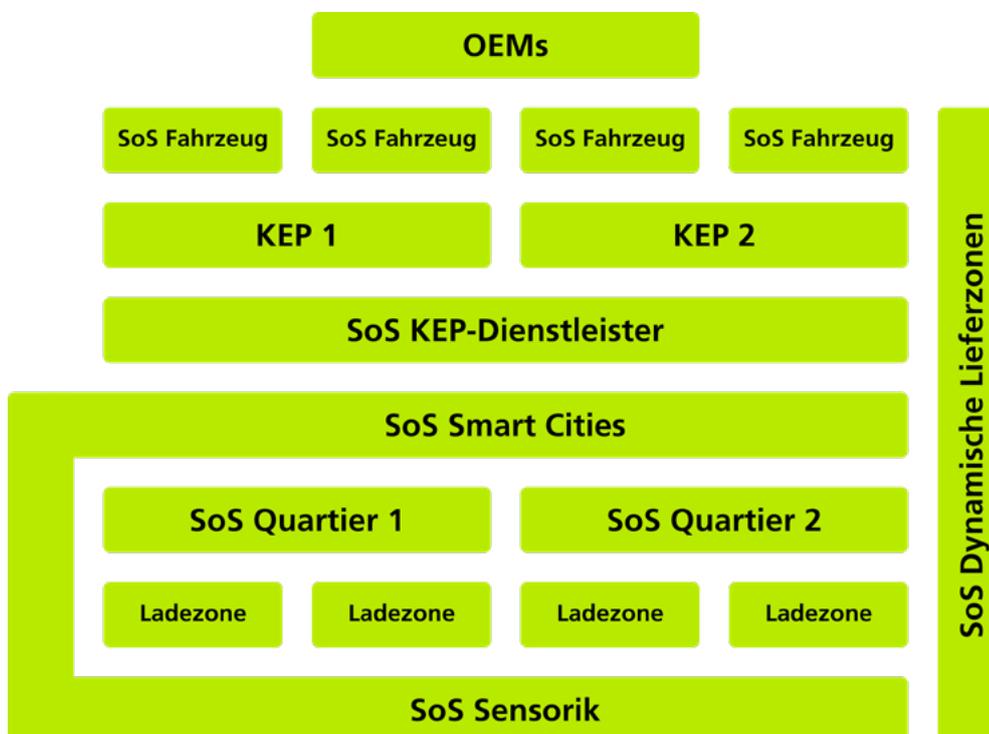


Abbildung 5: Übersicht potenzieller Systems-of-Systems in der Domäne Smart Mobility.



(z. B. Kooperation mit Sharing-Anbietern für Lieferungen an den Kofferraum), die über Prototypen und Forschungsprojekte hinausgehen. Ladengeschäfte, welche regelmäßig beliefert werden (z. B. Supermarkt, Bekleidungs-geschäft) bündeln ihre Lieferungen nicht, obwohl sie in der Stadt räumlich direkt nebeneinander liegen.

Städte sind lebendige Organismen und Gegebenheiten ändern sich ständig

Eine Betrachtung aus Perspektive der »Systeme aus Systemen« (SoS), insbesondere unter dem Aspekt der dynamischen Kopplung, ist wünschenswert. Städte sind lebendige Organismen und Gegebenheiten ändern sich ständig (zeitliche-, räumliche- und Intensitätsvolatilität). Systeme der beteiligten Akteure müssen sich zur Laufzeit an neue Kontexte anpassen können und gemeinsam auf ein globales Optimum (hinsichtlich Nachhaltigkeit oder Effizienz) hinarbeiten. Dynamische Lieferverkehre als System-of-Systems sollte es ermöglichen, Menschen und (teil-) autonome Systeme gleichzeitig zu betrachten.

Rechtliche und ethische Fragestellungen erschweren die praktische Umsetzung

Während der Transitionsphase hin zu vollständig autonomer Mobilität und Logistik spielt die Erklärbarkeit von Systemverhalten eine wesentliche Rolle. Die Kopplung unterschiedlichster Systeme erfordert die Koordination der Schnittstellen und Protokolle. Sobald Fahrzeuge (teil-) autonom fahren sollen, stellen geltende Regularien enorme Anforderungen an die Softwarequalität und verhindern insbesondere selbstlernende Systeme. Feldversuche sind in Deutschland praktisch nicht möglich, sodass Simulationen ein Zwischenschritt sein können.

Als sozio-technisches System-of-Systems kann der Anwendungsfall die aktuelle und zukünftige Situation der Stakeholder Paket-zusteller*innen und Logistikmitarbeiter*innen nicht ausblenden. Hier ergeben sich

ethische Fragestellungen im Spannungsfeld zwischen Entlastung durch (teil-)autonome Lieferfahrzeuge und Entlassungen durch den Wegfall von Arbeitsplätzen durch autonome Fahrzeuge.

Fragen des Software- & Systems-Engineering

Im Bereich »smarter Mobilität« existiert eine Vielzahl von isolierten Forschungsprojekten und Erprobungen, welche erfolgreich mit heutigen Software-Engineering Methoden erzeugt wurden. In wenigen Projekten wurden Methoden der Modellierung von Digitalen Ökosystemen (z. B. »Smart MaaS«) eingesetzt, um die Vernetzung von Systemen zu orchestrieren. Trotzdem existiert keine flächendeckend verfügbare Multimodalitäts-plattform, genauso wenig wie eine Plattform zur Kopplung von Logistikverkehren. Und das, obwohl die technischen Herausforderungen für eine Kopplung von den befragten Expert*innen als gering angesehen werden.

Das Software- und Systems Engineering muss in diesem Bereich um die Perspektiven der politischen Rahmensetzung, einschränkender gesetzlicher Regulatorik, wirtschaftlichen Interessen von Unternehmen und gesellschaftlichen Zielen erweitert werden. Eine rein technische Lösung wird immer scheitern. Das System-of-Systems »Dynamische Lieferverkehrrzonen« kann nur als soziotechnisches System Erfolg haben.







Anwendungsbereich »Smart Healthcare«

Smarte Produktion von Advanced Therapy Medicinal Products (ATMP)

Rolf van Lengen, Moritz Mumme

Die Entwicklung neuer Arzneimittel und Medizinprodukte ist eine zentrale Säule der Gesundheitswissenschaften.

Durch große Erfolge in der Wirkstoffforschung stehen heute immer bessere, aber auch komplexere Therapiemöglichkeiten zur Behandlung sich rasch entwickelnder, neuer Infektionskrankheiten und bisher kaum heilbarer Krankheiten wie Krebs zur Verfügung. Zugleich steigen mit dem qualitativen und quantitativen Bedarf an neuartigen Wirkstoffen und Arzneimitteln die technischen und wirtschaftlichen Ansprüche an deren Produktionsverfahren.

Advanced Therapy Medicinal Products (ATMP) sind Therapeutika, die ihre Anwendung u. a. in der personalisierten Medizin finden, d. h. die individuelle Anwendung an einem Patienten. Die Produktion von ATMPs besteht aus **etlichen komplexen Herstellungsschritten**, welche hohe personelle, organisatorische, regulatorische (Iglesias-López et al., 2019; Ziegele & Müller, 2012) und technische Anforderungen haben. Die derzeit in der pharmazeutischen Industrie etablierten Herstellungsprozesse sind hochgradig manuell und daher zeitaufwendig und damit ausgesprochen kostenintensiv (z. B. ca. ¼ Mio. € pro Charge CAR-T-Zellen in der Krebstherapie), wodurch nur eine ausgesprochen geringe Patientenzahl über die bestehenden

Produktionsabläufe mit personalisierten Produkten behandelt werden kann. Daher müssen diese Verfahren grundlegend modifiziert und als flexible, modulare und automatisierte Produktionsprozesse mit hohem Durchsatz und bei vertretbaren Kosten unter Einhaltung der geforderten hohen Qualitätsstandards mit Hilfe leistungsfähiger Automatisierung komplett neu aufgesetzt werden (Klöss et al., 2019; Köhl & Abken, 2012).

Einzelne Schritte des Produktionsprozesses können technologisch als **Komponente (Einzelsystem)** verstanden werden. Der Einbau eines mRNA-Wirkstoffs in ein Lipid-Nanopartikel wäre beispielsweise in diesem Zusammenhang eine Komponente. Derartige Komponenten müssen an der jeweiligen Produktklasse der ATMP dynamisch ausgerichtet werden. Die Pharma 4.0 konforme Orchestrierung einzelner Komponenten ermöglicht eine **flexible, skalierbare** und **automatisierbare** Herstellung individueller Therapeutika als auch von Impfstoffen (z. B. mRNA-Wirkstoffe) für die Hochdurchsatzproduktion.

Fraunhofer Vision einer automatisierten Produktion

Die **Entwicklung von automatisierten und skalierbaren Produktionstechnologien** hinkt dem rasanten biomedizinischen

Die (Teil)-Automatisierung des komplexen ATMP-Produktionsprozesses ist möglich

Die manuelle Herstellung von ATMPs ist auf Dauer nicht durchführbar

Die Nachfrage nach ATMPs übersteigt deutlich das Angebot



Fortschritt hinterher. Daher stellt die **Entwicklung neuer Produktionstechnologien**, mit welchen mRNA-basierte Wirkstoffe zügig, qualitativ verlässlich und wirtschaftlich hergestellt werden können, eine zentrale Herausforderung für den Gesundheitssektor dar. Eine Schlüsselrolle kommt dabei der **Prozessautomatisierung** zu, mit welcher nicht nur die Produktqualität, sondern über eine Prozessskalierung die Maßstabsausweitung und damit Produktverfügbarkeit sichergestellt werden kann. Zusätzlich ist die Automatisierung der Wirkstoffproduktion eine Grundvoraussetzung, um auch die Herstellungskosten zu senken und damit die Wirtschaftlichkeit zu steigern. Um eine automatisierte Hochdurchsatzherstellung von mRNA-basierten Wirkstoffen zu erreichen, sind technische Innovationen in den Bereichen Bioreaktoren, Fluidodynamik, intelligente Qualitätskontrolle und automatisierte Datenanalyse erforderlich.

Notwendige Unterstützung kommt dazu auch von den schnellen Fortschritten der **Industrie 4.0**, damit die verschiedenen verwendeten Geräte digital miteinander kommunizieren und validierbare Konzepte der künstlichen Intelligenz zur Steuerung der Produktion entwickelt werden.

Übergeordnete Zielsetzung ist es, automatisierte Herstellungsverfahren innovativer mRNA-Wirkstoffe für eine nachhaltige und wirtschaftliche Gesundheitsversorgung zu entwickeln. Es soll die gesamte Prozesskette (von der DNA-Sequenz über automatisierte und skalierbare Produktion der mRNA bis zur biologischen Funktionsprüfung) abgebildet und für die weitestgehend automatisierte Produktion neuer Wirkstoffe nutzbar gemacht werden. Dazu wird zunächst die manuelle Labormaßstab-Herstellung der Ausgangsprodukte (mRNA,

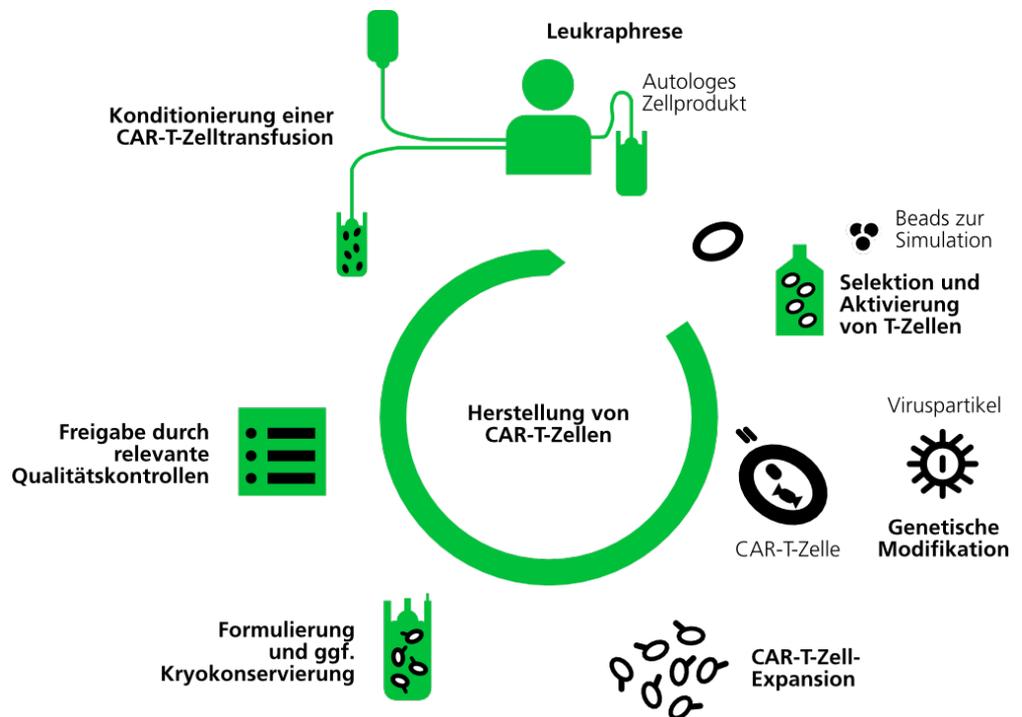


Abbildung 6: Generischer Prozessablauf zur Herstellung von CAR-T-Zellen.



mRNA-Nanotransporter-Komplex, mRNA-modifizierte Zellen) optimiert.

Darauf aufbauend werden automatisierte Herstellungsprozesse abgeleitet und die zur Umsetzung benötigten Produktionstechnologien für die skalierte GMP-konforme Herstellung von mRNAs als Impfstoffe und mRNA-basierten Gentherapeutika, insbesondere für die Krebstherapie, bis zum klinischen Maßstab etabliert und bis zum industriellen Maßstab skaliert (Anderlei et al., 2017; Bedenbender et al., 2020; Frost & Sullivan, 2020, Mieke et al., 2017).

innovativen Arzneimitteln zu entwickeln. Die Entwicklung von Automatisierungslösungen für den komplexen Bereich innovativer Arzneimittel geht damit einher und erfordert ein hohes Maß an Interdisziplinarität, welche durch die Breite der Fraunhofer-Gesellschaft optimal abgebildet wird. Mit den entwickelten, vielschichtigen Technologie-Lösungen (automatisierte und skalierbare Produktionstechnologien, innovative Wirkstoffe und digitale Prozesssicherung) trägt das Leitprojekt dazu bei, die Fraunhofer-Gesellschaft als wichtigen Innovator in der deutschen und europäischen Arzneimittel- und Medizinproduktversorgung optimal zu positionieren.

Die Automatisierung der ATMP-Herstellung ist ein komplexes Zusammenspiel von Prozessen, Wirkstoffen und der Qualitätssicherung

Gesellschaftlicher Bedarf

Das Vorhaben orientiert sich am dringenden gesellschaftlichen Bedarf, breit einsetzbare Produktionstechnologien für eine kapazitiv schnell hochfahrbare Bereitstellung von

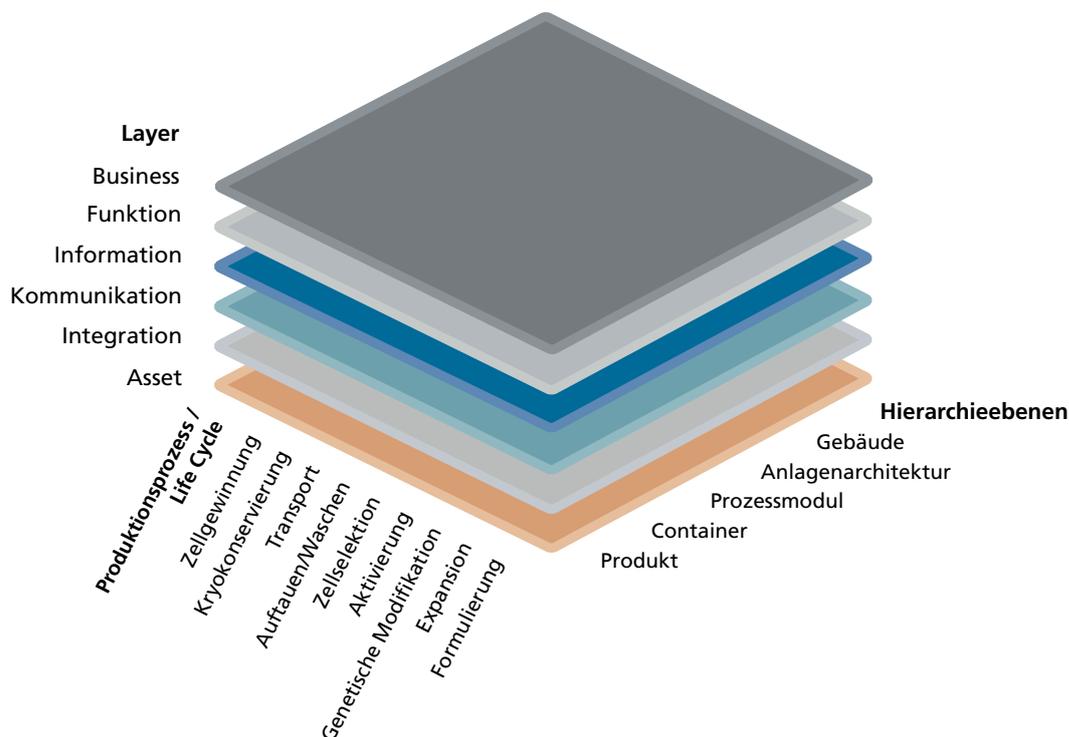


Abbildung 7: Architekturmodell / Lösungsmodell für das Beispiel der CAR-T-Produktion im Sinne der Industrie 4.0.



Markt

Der Anwendungsfall fokussiert auf den Markt der Gesundheitswirtschaft und adressiert Beiträge zu zentralen Elementen des Fraunhofer **strategischen Forschungsfelds »Intelligente Medizin«**:

1. Sicherstellung der Gesundheitsversorgung durch Automatisierungs- und Digitalisierungslösungen,
2. Souveränität und Technologieführerschaft in der Arzneimittelversorgung und
3. Kostenintelligente Medizin.

Strategie der beteiligten Institute ist die gemeinsame Entwicklung eines automatisierten Produktionsverfahrens für Nukleinsäurebasierte Wirkstoffe im Konsortium mit involvierten Industriepartnern. Die übergeordnete Strategie wurde in mehreren gemeinsamen Recherche- und Vorlaufprojekten erarbeitet*. Zur erfolgreichen Umsetzung wurden verbundübergreifend Expertisen in den Bereichen Impfstoffentwicklung (IZI, ITEM, IMM), Zell- und Gentherapie (IZI), Bioprozessentwicklung (ITEM, IZI, IPA, IPT), smarte Sensorik (IMS, IMM), sowie Automatisierung und Digitalisierung der Produktion (IPA, IPT, IESE) zielgerichtet verzahnt. Die herbeigeführte Synergie ist zum einen essentiell für das Erreichen der ambitionierten Projektziele und wird zum anderen das Profil des strategischen Forschungsfelds »Intelligente Medizin« weiter schärfen und ausbauen.

* *Innopush »Fraunhofer Vaccine Technologies«, Innopush »Etablierung eines Reallabors zur modularen automatisierten Herstellung von Arzneimitteln für Neuartige Therapien (ATMPs)«, Präsidialprojekt »Produktionsstrategie ATMP-Automatisierung«, Innovationsprogramm »Pilotanlage für modulare, automatisierte Produktionsprozesse zur Gesundheit 4.0«*

Die **Kundenzielgruppen** bestehen zum einen aus Unternehmen, die Geräte und Automatisierungslösungen für die Herstellung und Qualitätskontrolle von ATMPs anbieten und zum anderen aus einem heterogenen Kreis von akademischen und Industriepartnern, die sich durch eine im eigenen Verantwortungsbereich betriebene Herstellung von ATMPs definieren und in diesem Sinne ein Endanwender für unsere Technologien/Lösungen darstellen. Entstehende Technologien sollen in lizenzbasierte Entwicklungs- und Vermarktungspartnerschaften mit Geräteherstellern für jeweils verschiedene Anwendungszwecke eingehen. Weiterhin können Pharmaunternehmen, sowohl als Abnehmer von mRNA-Prozessentwicklungs- und GMP-Herstellungsleistungen, als Firmenpartner für die gemeinsame Entwicklung von kundenspezifischen Automatisierungslösungen sowie als Lizenznehmer für die im Projekt entwickelten Gentherapie- und Impfstoffansätze fungieren. Eine dritte wichtige Kundengruppe sind größere Auftragsherstellungsunternehmen, die unsere Automatisierungslösungen nutzen, um ihre eigene Wettbewerbsposition im rasch wachsenden mRNA-Markt zu verbessern (Alliance for Regenerative Medicine, 2019, 2020; Dluczek et al., 2019, Future Market Insights, 2022; Verdin & Tsang, 2021).







Anwendungsbereich »Smart Energy«

Ein vernetztes zellulares Energiesystem zur Komplexitätsbeherrschung auf lokaler Ebene

Denis Uecker, Florian Balduf

Um der steigenden Komplexität durch die zunehmende Anzahl von Verbrauchern, Speichern und dezentralen Erzeugern sowie deren Flexibilisierung zu begegnen, sollte das Energiesystem in kleine lokale Energiezellen geteilt werden.

Diese Energiezellen betreiben ihr Energiemanagement unter integrativer Berücksichtigung der Sektoren Strom, Gas, Wärme sowie Mobilität nach dem Subsidiaritätsprinzip, das heißt, sie sorgen für den Ausgleich von Energieerzeugung und -verbrauch eigenständig und involvieren höhere Ebenen nur, sofern eine Zelle diese Aufgabe nicht selbstständig oder nicht effizient lösen kann (Bayer et al., 2019). Hierfür kommunizieren sie an Nachbarzellen sowie hierarchisch höheren Zellen ihre Energie-Fahrpläne sowie ihr Flexibilitätspotential. Abbildung 8 zeigt die Entwicklung hin zu den lokalen Energiezellen, mit dem Feature der sektorübergreifenden Assets in dezentraler Verantwortung.

Werden die Sektoren Strom, Wärme, Gas, Mobilität integrativ betrachtet, ermöglicht dies, Energie effizienter zu nutzen, Speichereffekte zu realisieren und eine verbesserte Stromnetzstabilisierung zu realisieren (Bayer et al., 2019). Um diese Potentiale anwenden sowie die zusätzlichen Anforderungen an Management und Flexibilität beherrschen zu

können, ist eine durchgängige Digitalisierung unerlässlich. Bereits das heutige Energiesystem muss als System-of-Systems betrachtet werden. Jedoch gibt es bisweilen häufig Medienbrüche bei der Informationsübermittlung (Austausch bisher oft telefonisch) und wenig Datenerhebung (zumeist nur lokal). Dies führt zu einem großen Bedarf an Digitalisierung sowie einheitlichen Schnittstellen und Datenstrukturen. Ferner resultieren dynamische Aspekte aus der Volatilität erneuerbarer Energien sowie des Marktpreises und der größer werdenden Zahl an Marktteilnehmern auf Angebots- und Nachfrageseite.

Die Komplexität des Energiesystems kann mittels dezentraler Energiezellen bewältigt werden

Eine Verbesserung der Interoperabilität im System-of-Systems des Energiesektors ist notwendig



Eine Energiezelle besteht aus der Infrastruktur für verschiedene Energieformen, in der durch ein Energiezellenmanagement in möglicher Koordination mit Nachbarzellen der Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch über alle vorhandenen Energieformen organisiert wird.«

Bayer et al., 2019



Die steigende Volatilität und Dezentralisierung der Energieerzeugung bedarf der Koordination

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, stellt der zellulare Ansatz ein zweckdienliches Konzept zur Umsetzung dezentraler Energieversorgung dar. Der zellulare Ansatz ist ein interdisziplinäres Modell mit der Energiezelle im Mittelpunkt. Diese enthält die Infrastruktur verschiedener Energieformen sowie ein eigenes Energiezellenmanagement (EZM). Im EZM erfolgt die Koordination nach dem Subsidiaritätsprinzip mit den Nachbarzellen sowie die Koordination von Erzeugung und Verbrauch. Die Zellen sind über mehrere Ebenen verteilt, angefangen mit der Zellebene 1, in der Höchstspannungen sowie Im- und Export betrachtet werden. Auf Zellebene 5, im Niederspannungsbereich, sind beispielsweise die privaten Haushalte zu finden. Abbildung 9 zeigt ein zellulares Energiesystem als generische Systemarchitektur.

Durch die Aufteilung des Energiesystems in unterschiedliche Ebenen wird ein besseres Verständnis und mehr Einheitlichkeit erreicht. Die Architektur des zellularen Ansatzes könnte, ähnlich wie RAMI 4.0 (Deutsches Institut für Normung, 2016) in der Industrie, zu einem Standard werden.

Die Nutzung von regenerativer Energie bedeutet eine dezentrale, wechselrichterbasierte und volatile Erzeugung. Um trotz Volatilität eine stabile Energieversorgung zu sichern, wird die Speicherung von Energie (in elektrischen Speichern & weiteren Sektoren) zunehmend wichtiger. Hierzu muss jedoch eine Digitalisierung in Verbindung mit einer »Smartifizierung« des bestehenden Systems durchgeführt werden. Im Consumer-Bereich werden Produkte im Kontext von Internet of Things (IoT) immer smarter und deren Konnektivität steigt. Hieraus kann eine mögliche Schwarmbildung abgeleitet werden, was positive als auch negative Auswirkungen haben kann. Zum einen lassen sich viele Anlagen und Geräte zusammenfassen und beispielsweise als virtuelle Kraftwerke betreiben, zum anderen kann es jedoch auch zu Gleichzeitigkeitseffekten kommen, welche negativ auf die Netzstabilität wirken können. Beispiele hierfür wären gleiche Spannungsschwellen, welche zur Abschaltung von Anlagen und Geräten führen oder Preissignale von Energiekosten bzw. der Vergütung von Flexibilitäten. Mit steigender Volatilität sowie einer Vielzahl von Erzeugungsanlagen auf der Anbieterseite und

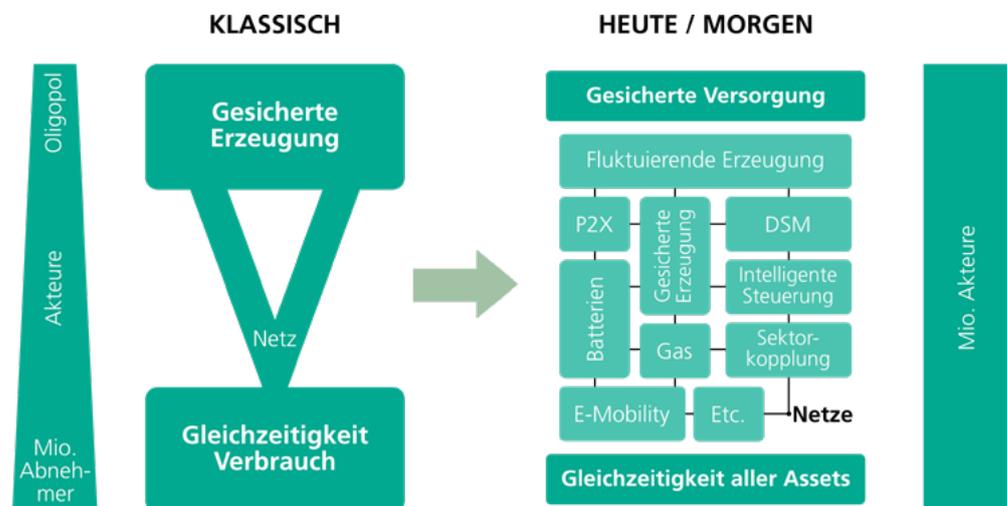


Abbildung 8: Wandel im elektrischen Energiesystem (eigene Darstellung in Anlehnung an Verband kommunaler Unternehmen e. V., 2018).



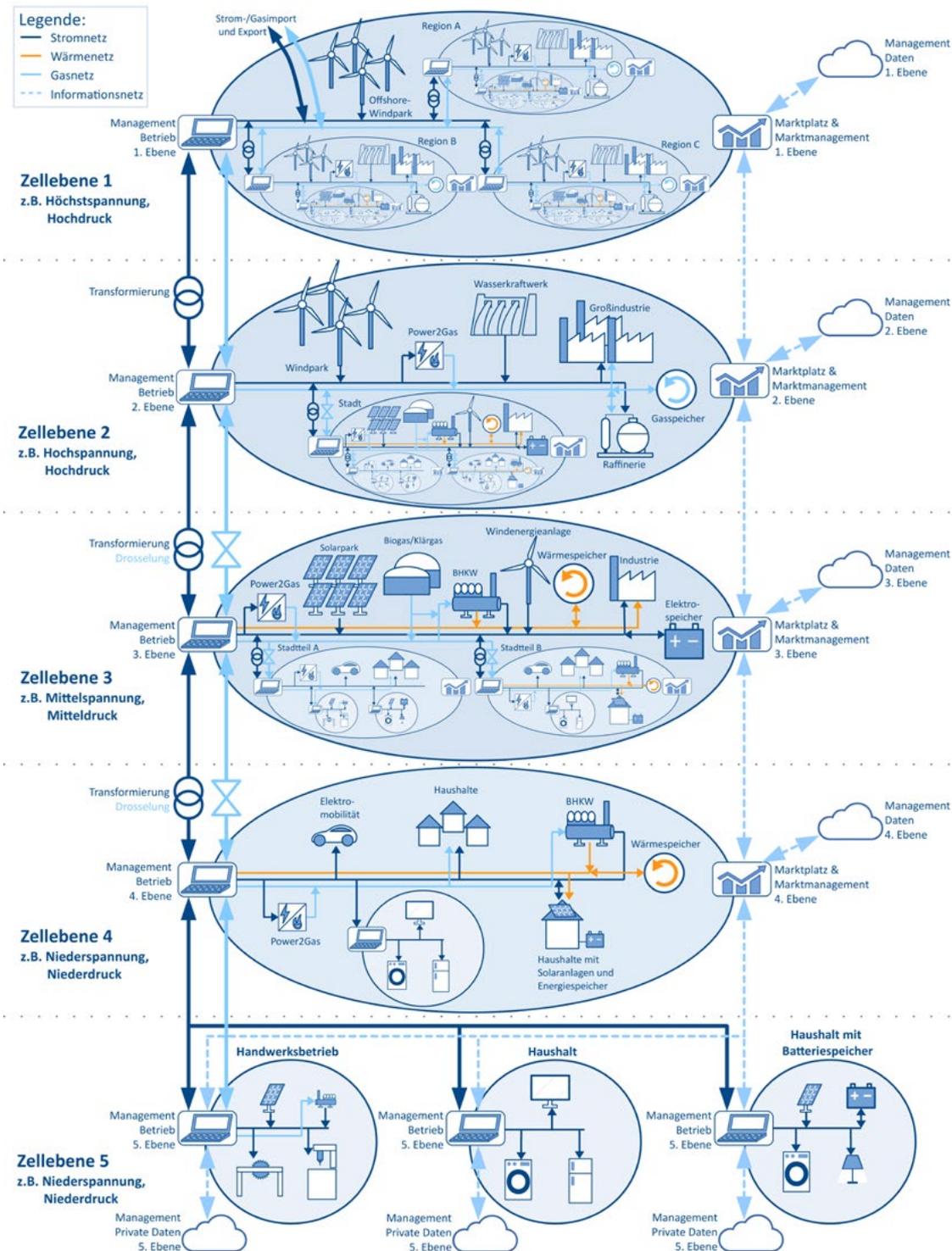


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines zellularen Energiesystems (Uhleb, CC BY-SA 4.0, via Wikimedia Commons).



Die Steuerung und Beobachtung erhöht die Flexibilität und Erklärbarkeit, aber auch den Bedarf an Informationssicherheit

den Entwicklungen im Consumer-Bereich auf der Nachfrageseite wird sich der Koordinierungsbedarf erhöhen.

Um das Konzept der zellularen Energiezelle nutzen zu können, gibt es zusätzliche Anforderungen, beispielsweise an die Datenhaltung und -verarbeitung. Durch die Selbstverwaltung der Zellen muss ein Mindestmaß an Beobachtungs- und Steuermöglichkeiten (Observation & Control) vorausgesetzt werden. Hierdurch erlangt die Informationssicherheit in zellularen Energiesystemen eine sehr große Bedeutung.

Es werden zunehmend Smart Meter in den Haushalten verfügbar sein. Dies sorgt für genauere Prädiktionen auf einer tieferen Ebene und sorgt für neue Geschäftsmodelle. So wird es zukünftig eine hohe Anzahl von zeit- und lastflexiblen Tarifen geben. Mit wachsendem Eigenversorgungsgrad der Endkunden, verbunden mit dem Einsatz smarterer Haustechnik und -geräten, wird ein komplexeres Management notwendig sein und neue Geschäftsmodelle, wie lokales Energiemanagement, Peer-to-Peer-Handel oder Flexibilitätshandel, wird Einzug halten.

Herausforderungen und Lösungen

Die Energiesysteme und die damit Verbundenen Sektoren – Strom, Gas, Wärme – befinden sich im Wandel. Mit der Verpflichtung zur dezentralen und CO₂-armen Energieerzeugung ergeben sich neue Anforderungen an die Architektur von Energiesystemen (Bayer et al., 2019). Der laufende Smart Meter Rollout sorgt für mehr Sensorik im Netz, eine kommunikationstechnische Anbindung von steuerbaren Verbrauchern und Erzeugern und darauf aufbauend neue flexible Abrechnungsmodelle, bei denen Börsenpreise und Anreizsysteme in die Preisgestaltung einfließen.

Herausforderungen entstehen durch Dezentralität, Volatilität und Speicherung

In Deutschland werden zur Dekarbonisierung vor allem die Technologien Photovoltaik (PV),

Windkraft und Biomasse eingesetzt (Umweltbundesamt, 2022). Geothermie rückt zusätzlich in den Fokus. Diese Anlagen haben jedoch eine geringere Maximalleistung, als konventionelle Großkraftwerke. Hieraus folgt der Bedarf an einer steigenden Anzahl von Erzeugungsanlagen, welche aus Platz- und Effizienzgründen dezentral über die Fläche verteilt werden müssen. Zusätzlich lässt sich auf der Verbrauchseite vor allem in den Sektoren Wärme und Mobilität eine Verlagerung hin zum Energieträger Strom beobachten (Umweltbundesamt, 2022), hierfür sorgt unter anderem die strategische Förderung der Elektromobilität (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2021). Zur optimierten Nutzung von PV zur Eigenversorgung werden sowohl Heimspeicher, als auch geteilte Quartierspeicher Verbreitung finden. Bei Speichertechnologie existiert noch viel Forschungspotential, so dass hier mit neuen Lösungen gerechnet werden kann.

Die Versorgungssicherheit steht in Energiesystemen an erster Stelle, daran wird sich auch in Zukunft nichts ändern. Die Herausforderungen hieran steigen jedoch durch technologiebedingte Unterschiede bei erneuerbaren gegenüber konventionellen Erzeugern. Die Erzeugung ist bei Solar und Wind volatil und wird durch Wechselrichter auf die erforderliche Wechselspannung konvertiert. Schwankungen in der Erzeugungsleistung sind prinzipbedingt vorhanden. Diese Schwankungen müssen simultan ausgeglichen werden, da es sonst zu Verletzungen von Netzfrequenz sowie Spannungsbändern kommt. Hierfür werden in Zukunft neue Maßnahmen erforderlich, da durch wechselrichterbasierte Erzeuger keine Energie in rotierenden Massen vorhanden ist, wie z. B. im Rotor einer Turbine, die kurzzeitige Schwankungen ausgleichen kann. Stattdessen werden aktive steuernde Eingriffe erforderlich, wie dem Abrufen von Flexibilitäten (zeitlich oder volumenmäßig flexible Erzeuger oder Verbraucher). Die Steuerzentrale einer Energiezelle kann jedoch in günstigen Fällen (mind.



Frequenzregelung im Netz) für einen Schwarzstart der Zelle verwendet werden. So könnten theoretisch Energiezellen nach einem Stromausfall wieder separat hochgefahren und anschließend zusammengekoppelt werden. Forschungsbedarf besteht vor allem in der praktischen Erprobung, da die physikalischen Effekte nicht trivial sind. Durch steigenden Strombedarf, in Folge der Elektrifizierung der Sektoren Wärme und Mobilität, wird auch ein Ausbau der schwarzstartfähigen Erzeugungsanlagen erforderlich sein. Eine dezentrale Lösung des Schwarzstartproblems wäre volkswirtschaftlich kostengünstiger, als dedizierte hierfür vorgehaltene Großkraftwerke. Durch intelligente Steuerung von Verbrauchs- und Erzeugungsanlagen lässt sich ein resilientes Verhalten realisieren, welches kostengünstiger ist, als die bisherige auf Redundanz basierte Architektur des Energiesystems.

Durch die Vielzahl von dezentralen Erzeugungsanlagen, steuerbaren Verbrauchern und Speichern steigt, über alle Sektoren betrachtet, der Koordinierungsaufwand sowie die Komplexität des System-of-Systems. Die Integration der verschiedenen Sektoren wird ebenfalls durch eine jährlich durchgeführte Expertenbefragung von EY und BDEW (Fidan, Beermann, & Timm, 2021) bestätigt, wie nebenstehendes Diagramm zeigt. Es ist davon auszugehen, dass auch die Anzahl der Hersteller von Systemen zunehmend wird, zwischen denen eine Interoperabilität hinsichtlich Datenaustausch sowie horizontalen und vertikalen Prozessen sichergestellt werden muss.

Im zukünftigen Energiesystem wird der Kommunikationsbedarf daher weiter zunehmen, verstärkt zusätzlich durch die steigende Anzahl an Kommunikationsteilnehmern, die durch den Einsatz smarter Haustechnik und -geräte miteinander verbunden sind. Vor allem in kritischen Infrastrukturen ist die Verlässlichkeit der Kommunikation essentiell. Diese Systeme müssen gegen Software- und Hardware-Fehler, sowie gegen Cyber-Angriffe abgesichert werden.

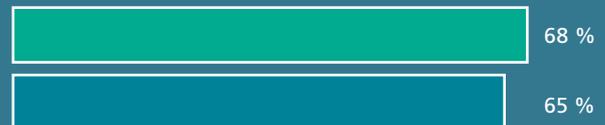
Die bereits stark integrierten europäischen Energienetze und -märkte verstärken den Koordinierungsbedarf der Systeme nochmal.

Diese Herausforderungen lassen sich nur durch Komplexitätsbeherrschung mittels Abstraktion begegnen.

Sektorenkopplung durch Digitalisierung

Inwieweit stimmen Sie der Aussage zu: »Durch die Digitalisierung wachsen verschiedene Sektoren/ Industrien zusammen – dies betrifft zunehmend die Energiewirtschaft«? (Fidan et al. 2021)

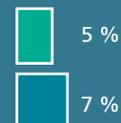
Sehr hohe Zustimmung



Hohe Zustimmung



Niedrige Zustimmung



Weiß nicht / Keine Angabe





Anwendungsbereich »Smart City & Regions«

Self-driving trees: Blau-grüne Infrastruktur, die sich an die Bedürfnisse einer Stadt anpasst

Julien Siebert, Sarah Brandt

Bevölkerungswachstum und Klimawandel sind zwei der heutzutage wichtigsten, aber häufig unterschätzten Gründe, warum Städte intelligenter, vernetzter, autonomer, dynamischer und vor allem nachhaltiger und widerstandsfähiger werden müssen.

Schon jetzt nutzt die urbane Transformation großer Metropolen wie in Singapur (Wong, Wood, & Paturi, 2020), in China (Zevenbergen, Fu, & Pathirana, 2018) oder auch in Europa sowie den Niederlanden ([Adaptive Circular Cities Project](#)) zunehmend **blau-grüne Infrastrukturen** (siehe Info-Box). Sinn und Zweck dieser Strukturen ist u. a. das Wassermanagement zu verbessern, die Temperatur zu regulieren, die Luft zu reinigen und allgemein das Stadtleben zu verbessern und lebenswerter und attraktiver zu machen. Der Erhalt und die Ausgestaltung der Attraktivität der Stadt, der Schutz der lokalen Biodiversität, sowie das gesunde Leben sind nur einige Ansätze, die uns auf den Weg der intelligenten grünen Stadt lenken. Die grüne und intelligente Stadt geht dabei Hand in Hand mit einem kulturellen Wandel, wie wir über Städte und ihre Dienstleistungen denken. Hier kommt das ganzheitliche Denken im Sinne von Systemen von Systemen ins Spiel, welches in den Städten nicht unbekannt ist, da es bereits schon lange dort gelebt wird. Die Neuheit liegt darin, dass die Digitalisierung es uns

Blau-grüne Infrastruktur

Blau-grüne Infrastrukturen beziehen sich auf ein Netz naturbasierter Systeme (Blau steht für Wasser und Grün für Pflanzen), die auf städtische und klimatische Herausforderungen und Probleme ausgerichtet sind. Blau-grüne Infrastrukturen sind in der Regel kostengünstiger als die so genannten grauen Infrastrukturen (grau in Bezug auf Beton), die sich ausschließlich auf technische Systeme stützen, die ausschließlich vom Menschen geschaffen wurden. Zu den blau-grünen Infrastruktursystemen gehören unter anderem begrünte Dächer, begrünte Fassaden, Bioswales, Wassergärten, durchlässige Bürgersteige usw. (Ghofrani et al. 2017).



Nachhaltige Infrastrukturen erfordern Steuerung durch Digitalisierung

ermöglicht, die Art und Weise, wie naturbasierte Lösungen gesehen und genutzt werden, neu zu überdenken, z. B. »Natur als Infrastruktur« (Gabrys, 2020) oder »Internet der Natur« (Gale et al., 2019, siehe Figure 1). Um Jennifer Gabrys (2020) zu zitieren:

»Diese Prozesse programmieren die Natur als Infrastruktur, die funktioniert und auf die Anforderungen der laufenden Umweltveränderungen und der Klimakrise antwortet. Digitale Technologien führen Fern- und In-situ-Erfassungen durch, um die Kohlenstoffspeicherkapazität von Bäumen und Böden zu bewerten. Kartierungstechnologien lokalisieren Bäume und Vegetation als »natürliche Ressourcen« [natural assets], die Umweltbelastungen abmildern können. Roboter pflanzen, klettern und pflegen Bäume, um deren Wachstum und Effizienz zu verbessern. Sensoren ermitteln den Feuchtigkeitsgehalt des Wassers und verfolgen den Chlorophyllgehalt. Bürgerinitiativen überwachen und pflegen die städtische Baumbepflanzung. Und vernetzte digitale Systeme tragen zu Immobilienentwicklungsprojekten für die Schaffung künftiger intelligenter Waldstädte bei.«

Dies wiederum ermöglicht die Umsetzung futuristischer Szenarien wie das Neom-Projekt in Saudi-Arabien oder das Smart Forest City-Projekt Cancún in Mexiko.

Herausforderungen der heutigen Städte

Die Vision der grünen und intelligenten Stadt der Zukunft erfordert zunächst einmal das Zusammenspiel und die Koordination verschiedener städtischer Dienste und ihrer Systeme. Dabei wird die Stadt als ein Organismus betrachtet, der sich selbstständig anpasst und weiterentwickelt, und zwar auf der Grundlage von Synergien oder Symbiosen zwischen den verschiedenen (technischen, sozialen und natürlichen) Systemen, aus denen sie besteht. Das Städtesystem ist an sich schon komplex,

da es aus einer Vielzahl von Stakeholdern besteht und sich aus verschiedenen konstituierenden Systemen zusammensetzt. Daher muss jedes konstituierende System in der Lage sein, mit anderen zu **interagieren**, sich selbst **zu identifizieren** und **seine Fähigkeiten zu beschreiben**, sich an den Kontext anzupassen und sogar seine Funktionen im Laufe des Prozesses zu ändern. Als diese Vision einem Expertengremium vorgestellt wurde, nannten die meisten Experten die Kommunikation, Koordination und Kooperation zwischen den verschiedenen Interessengruppen (Stadtverwaltung, Stadtplanung, Politik, Bürger, Unternehmen, Wissenschaft, Kultur usw.) als eine der zentralen Herausforderungen. Das spiegelt sich auf mehrere Ebenen wider, wie:

1. Interoperabilität der Systeme – Informationsaustausch existiert wenig oder noch gar nicht;
2. Strukturen und Arbeitsabläufe – Koordinierungsprobleme und Inkompatibilität der Arbeitsstrukturen, sowie
3. Kommunikation – eine solche Vision erfordert für jede Interessengruppe einen anderen Kommunikations- und Transparenzaufwand.

Alle Experten erwähnten die grundlegenden Hindernisse auf dem Weg zu grüneren und intelligenteren Städten: den **Konflikt zwischen verschiedenen Flächennutzungen**: Im Gegensatz zu relativ neuen Städten (wie z. B. in China) oder futuristischen »from scratch«-Projekten (wie z. B. das Neom-Projekt oder das Smart Forest City-Projekt Cancún) ist der Raum in Städten – ob unterirdisch, ebenerdig oder auf Dächern – knapp, und viele Systeme konkurrieren um ihn: Mobilität (Nutzung von Straßen, Parkplätzen, Garagen, ...), Gebäuden (Wohnungen, Geschäfte, Kultur, Dienstleistungen, ...), Energie (Energieerzeugung, -verteilung), Wasser (Sammlung, Klärung, Verteilung), etc. Außerdem sind die bestehenden **Infrastrukturen in den Städten** in der Regel **starr und robust** und können **kaum dynamisch umgestaltet**

Blau-grüne Systeme erfordern auf engem Raum eine Symbiose auf technischer, sozialer, natürlicher und organisatorischer Ebene





Abbildung 10: Das Internet der Natur (Internet of Nature, IoN): Beispiele und Anwendungen für die städtische Forstwirtschaft und grüne Infrastrukturverwaltung (Galle, 2019).

- 1) LiDAR zur Überwachung der Baumkronenmenge und der Waldstruktur.
- 2) Fernerkundung und Satellitenbilder für die Überwachung der Baumkronenbedeckung.
- 3) Intelligente Gebäude und Integration von grüner und grauer Infrastruktur für Energieeinsparungen und Gebäudeleistung.
- 4) Entwicklungs- und Flächennutzungsplanungsentscheidungen auf der Grundlage von Abwägungen zwischen Ökosystemleistungen und Informationen aus ergänzenden Datenquellen.
- 5) Pflanzen als Biosensoren für die Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen.
- 6) Aussaat aus der Luft zur Wiederaufforstung in Städten.
- 7) Virtuelle Sammlung von pflanzenpathologischen Informationen zur Erkennung und Diagnose von Schädlingen.
- 8) Sensornetzwerke zur Überwachung von Regenwasser, städtischen Wärmeinseln und der Aufnahme von Luftverschmutzung.
- 9) Straßenbilder und KI für die Qualität und das Management von Grünflächen.
- 10) Verbesserung der biologischen Vielfalt durch freiwillig zur Verfügung gestellte geografische Informationen.
- 11) VR und AR für die Grünflächenwahrnehmung.
- 12) Sensornetzwerke zur Überwachung der Wirksamkeit von Regenwasserbewirtschaftungsstrategien und der Bodenqualität.
- 13) Social-Media-Plattformen für die Erhebung öffentlicher Werte über die Gestaltung von Grünflächen.
- 14) Wearable Technologien für das Gesundheitsmanagement in Reaktion auf die Exposition gegenüber Grünflächen.
- 15) Blockchain und Kryptowährung für Begrünungsinitiativen.
- 16) Robotik für die Pflege grüner Infrastrukturen.
- 17) Alle Informationen über das Ökosystem werden in der ‚Cloud‘.
- 18) Echtzeit-Kommunikation zwischen IoN-Netzwerk und Stadt.



werden, um den aktuellen Bedürfnissen der heutigen Zeit gerecht zu werden (z. B. im Falle extremer klimatischer Ereignisse wie starker Regenfälle oder großer Hitze). Nicht zuletzt zeigen unsere Interviews auch, dass die **Komplexität** der Herausforderungen, vor denen die Städte derzeit stehen, benutzerfreundliche technische Lösungen erfordert, die die Auswirkungen von Begrünungsmaßnahmen konkret und sichtbar machen.

Das System-of-Systems-Puzzle-Prinzip für die Begrünung

Adaptivität steht in intelligenten Städten im Vordergrund

Die Herausforderungen der Anpassung an den Klimawandel in intelligenten Städten wird nur dann leichter zu lösen sein, wenn 1) eine breitere Einführung von blau-grünen Infrastrukturen erfolgt und 2) diese stärker vernetzt, dynamisch und anpassungsfähig werden. Eine Art **Puzzle-Prinzip**, dass alle Stakeholder, natürliche und technischen Systeme verknüpft und dem Sinne eines System-of-Systems gerecht wird, muss zukünftig integriert werden. Der bisherige starre Aufbau der Städte trifft auf dynamische Klimaentwicklungen, sowie extreme Klimaereignisse, die heutzutage immer häufiger auftreten, immer größere Schäden anrichten und gleichzeitig sehr dynamisch und deshalb schwer vorherzusagen sind. Die Abschwächung ihrer Auswirkungen erfordert, dass sich blau-grüne Infrastruktursysteme zukünftig schnell umgestalten können, um den Bedürfnissen der Stadt gerecht zu werden.

Dieses Puzzle-Prinzip kann nur erreicht werden, wenn Informationen über alle interagierenden Systeme und ihr Umfeld gesammelt, zentralisiert und für alle Beteiligten verfügbar gemacht werden können. Ein grundlegender Baustein sind geografische Informationssysteme, die Informationen über die Stadt auf verschiedenen Ebenen enthalten, wie z. B. Straßenkarten, und Arten der Oberfläche (durchlässig, undurchlässig). Zusätzlich werden die Art der Gebäude und ob sie

begrünt sind oder nicht, die Wasserinfrastrukturen (nicht nur Leitungen, sondern auch private Infrastrukturen wie Zisternen), klimatische Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag), Luftqualität, und natürlich grüne Komponenten wie Parks, Pflanzen usw. benötigt. Da diese Informationen die Grundlage für das korrekte Funktionieren der Begrünungssysteme und -dienste sind, müssen sie regelmäßig aktualisiert werden, z. B. durch Sensoren, Bildanalysen oder direkte Angaben der Bürger. Die Qualität dieser Informationen muss langfristig gesichert werden.

Eine zweite Informationsebene sind Prognosemodelle, wie z. B. lokale Klimamodelle zur Vorhersage von Niederschlag, Wind oder Hitze und Mobilitätsmodelle zur Vorhersage von Luftqualität oder Straßennutzung. Ebenfalls können Wachstums- und Gesundheitsmodelle für Pflanzen und Bäume zur Vorhersage des »Zustands« dieser naturbasierten Systeme dienen: ob sie Wasser, Nährstoffe oder Pflege benötigen, sowie Energie- und Wasserverbrauchsmodelle, die u. a. für die Versorgung der Pflanzen benötigt werden.

Zugängliche und aktuelle Informationen über den Zustand der Stadt sowie Prognosen über ihre potenzielle Entwicklung sind die ersten Schritte zu einem proaktiven Ansatz für eine grün-blaue Infrastruktur, die sich den Bedürfnissen der Stadt anpasst. So können beispielsweise städtische grüne Infrastruktursysteme wie Bäume, Bioswales oder lebende Wände das Bewässerungssystem über ihren Zustand informieren (ob sie Wasser benötigen oder in Zukunft benötigen werden) und die Bewässerung in naher Zukunft aufgrund dieser Informationen optimieren. Maßnahmen zur Verringerung der Luftverschmutzung können auf der Grundlage der Vorhersage der Mobilitätsnutzung und der aktuellen Wirksamkeit von Pflanzen zur Luftreinigung angepasst werden (einige Pflanzen können sogar als Luftqualitätssensoren verwendet werden; Bruno et al., 2021). Man könnte auch bewegliche naturbasierte Systeme (z. B. lebende Wände, siehe



nächster Abschnitt) einsetzen, um die Luftreinigungsfunktionen an bestimmten Tagen an bestimmten Orten zu unterstützen, an denen die Luftqualität als kritisch angesehen wird. Dies erfordert auch die Berücksichtigung von Logistiksystemen.

Wenn neue Systeme oder Dienste hinzukommen (z. B. eine neue Dachbegrünung, eine neuartige Bürger-App zur Bewässerung von Bäumen, z. B. »Gieß den Kiez«), muss ihr Bedarf an Informationen oder Prognosen berücksichtigt werden (dynamisch). Die Funktionen von Informationen und Diensten müssen durchsuchbar sein, und der Zugang und die Koordinierung sollten durch die zugrunde liegende Plattform erleichtert werden. Andererseits können diese neuen Systeme oder Dienste dem SoS neue Daten oder Informationen liefern, und das SoS muss sich auch an diese neuen Eingaben anpassen.

Lebendige Mooswand: Die Sicht eines Systems

Mooswände können beispielsweise zur Luftfilterung und Wärmereduzierung eingesetzt werden, aber Moos kann auch große Mengen an Wasser aufnehmen und speichern. Eine vertikale Mooswand kann zu einer wasserspeichernden Fläche werden, indem sie einfach horizontal auf Flächen gelegt wird, die normalerweise wenig oder gar kein Regenwasser aufnehmen können. Auf diese Art und Weise würde Regenwasser nicht oberflächlich abfließen, sondern könnte gespeichert und gezielt Böden zugeführt werden, die dann wiederum das Grundwasser speisen könnten. Genauso könnten Mooswände oder andere Grünflächen mobil gemacht werden, z. B. als autonome Fahrzeuge, die auf Freiflächen wie Marktplätzen feste Standplätze haben und bei Bedarf durch die Stadt geschickt werden können. Wenn sie als Wasserrückhalteflächen verwendet werden, können diese Mooswände physikalisch miteinander gekoppelt werden, um die verbundene Fläche zu vergrößern und

ein Oberflächenwassernetz zu schaffen. Als vertikale lebende Wände, die z. B. zur Temperatursenkung eingesetzt werden, interagieren sie indirekt über ihre Auswirkungen auf ihre direkte Umgebung. Als isolierte Einheiten sind ihre Auswirkungen vielleicht nur begrenzt, aber durch virtuelle Interaktion können sich diese Systeme selbst organisieren und sich an ihre Umgebung anpassen, um ihre gemeinsamen Ziele zu erreichen: z. B. indem sie sich so positionieren, dass die Temperatur bestmöglich reguliert wird, wie es ein echter Wald tun würde (Wohlleben 2015).

Die Anpassungsfähigkeit und Dynamik naturbasierter Systeme könnte, durch eine solche Nutzung, in die starren und wenig veränderbaren Strukturen der Stadt eingesetzt und zeitlich flexibel genutzt werden. So können beispielsweise ein Parkplatz oder ein Marktplatz dynamisch in eine Grünfläche umgewandelt werden, wenn er nicht genutzt wird, und bei Bedarf wieder seinem ursprünglichen Zweck einnehmen, ähnlich wie es in manchen Fußballstadien seit Jahrzehnten gemacht wird. Eine solche Veränderung der Funktionalität ist naturbasierten Systemen inhärent, erfordert aber, dass bei der Planung und Umsetzung solcher Systeme ein System-der-Systeme-Ansatz verfolgt wird. Damit ein solches System Teil eines Systems von Systemen sein kann, benötigt es zunächst einen digitalen Zwilling, der zumindest die Art der nutzbaren Funktionen, der vom System gelieferten Informationen (z. B. durch Sensoren) und der benötigten Informationen beschreibt. Um zu klären, wann ein Bedarf besteht, werden Daten aus verschiedenen Systemen benötigt, die mithilfe von Analysealgorithmen aufgearbeitet werden, da hierbei viele parallele Anwendungen betrachtet werden. Effizientere Vorhersagemodelle und die Interoperabilität miteinander verbundener Systeme sowie die Einbeziehung von Interessensgruppen werden die erfolgreiche Umsetzung einer dynamischen und autonomen blau-grünen Infrastruktur ermöglichen.

Bereits existierende Lösungen illustrieren das zukünftige Potenzial für den Einsatz von Systems-of-Systems



Blick in die Zukunft

Eine funktionierende Systemlandschaft, die ebenfalls flexibel auf die Dynamik der Städte und deren Herausforderungen reagieren kann, ist das Ziel, mit dem die Systeme von Systemen betraut werden.

Dementsprechend konzentriert sich der Anwendungsfall auf das Zusammentragen von Informationen aus verschiedenen Bereichen der Smart City, die sonst nur mit einzelnen Systemen erfasst und verwertet werden würden. Eine Verknüpfung von Informationen über Raum, Klima und Zeit in Echtzeit mit Simulationen/Modellierungen, die mithilfe autonomer Komponenten arbeiten, sind das Ziel zukünftiger Städte. Entscheidungen auf Stadtebene über Vorgehensweisen werden durch datenbasierte Entscheidungen, Simulationen sowie die Anwendung von

KI-Methoden unterstützt. Für den Bürger wird ein verbessertes Umfeld geschaffen, mit Visualisierungen, wie das mobile Grün das Klima verbessert, den Bürger schützt und mehr Trinkwasser zu Verfügung stellt. Soziale Gerechtigkeit bleibt erhalten, weil grüne Assets dynamisch sind und nicht bevorzugte Stadtteile aufgewertet werden. Im Gegenteil, die Assets werden dort eingesetzt, wo sie am dringendsten gebraucht werden, was vermutlich eher in dichtbesiedelten Räumen der Fall sein wird. Durch den zusätzlichen Einsatz von Drohnen könnten Bildauswertungen verstärkt eingesetzt und zudem der Verkehr effektiv entlastet werden. Ohne Systeme von Systemen könnten die nötigen Informationen nicht zusammengetragen werden, und auch Simulationen und automatische Entscheidungen, die automatische Reaktionen auslösen, wären nicht möglich.







Ausblick

Aus den Anwendungsfällen Erkenntnisse über die Zukunft dynamischer Systems-of-Systems gewinnen

Das Projekt DynaSoS untersucht für zukünftige Fördervorhaben, welche Forschungsfragen zu dynamischen Systems-of-Systems bestehen

Das vorherige Kapitel schilderte realistische Perspektiven zur Anwendung dynamischer Systems-of-Systems in unterschiedlichsten Innovationsbereichen. Diese stellen die Ergebnisse des Arbeitspakets 1 zur »Identifikation relevanter Anwendungsfälle« im Forschungsprojekt »DynaSoS« dar, das vom BMBF gefördert und vom DLR Projektträger begleitet wird. Ziel dieses Projekts ist die Sammlung, Konsolidierung und Darstellung der Forschungsfragen bei der Entwicklung von Systems-of-Systems, die zunächst die Weiterentwicklung der Forschung im Bereich des Software-Engineerings darstellt.

Schritte sind von zentraler Bedeutung bei der Übersetzung von abstrakten Visionen in möglichst reale Szenarien, nur auf Grund dessen die Sinnhaftigkeit und Realisierbarkeit dynamischer Systems-of-Systems im Kontext festgestellt werden können.

Die Anwendungsfälle machen die Potenziale dynamischer Systems-of-Systems, aber auch die Herausforderungen sichtbar

Die Anwendungsfälle dienen im Allgemeinen zur Inspiration für Praktiker und Forscher, sich solche Systeme konkret vorstellen zu können. Diese Fähigkeit unterstützt insbesondere das Projekt »DynaSoS«, eine handfeste Diskussionsgrundlage für die weiteren Schritte zu haben. Hieraus werden neue Einblicke gewonnen für die Zukunft des Systems-Engineering und somit in den Roadmaps für die jeweiligen Bereiche, insbesondere im Hinblick auf die Entwicklung dynamischer Systems-of-Systems. Damit sind sie ein Anhaltspunkt, der tiefere Analysen ermöglicht. Diese weiterführenden

Die Beiträge im weiteren Verlauf des Projekts sind wie folgt: Bereits während der Erstellung wurden Herausforderungen zu den jeweiligen Anwendungsfällen gesammelt, dessen Konsolidierung eine Analyse von domänenspezifischen und -übergreifenden Herausforderungen ermöglicht. Im Arbeitspaket 2 zur »Beschreibung repräsentativer Beispielsysteme« werden passende Umsetzungen der Anwendungsfälle prototypisch modelliert und spezifiziert. Diese weitere Konkretisierung ermöglicht die »Ableitung von Anforderungen an dynamische Systems-of-Systems« (Arbeitspaket 3), sowie die »Entwicklung eines Grobkonzepts für eine Forschungsarchitektur« (Arbeitspaket 4). Zusammen tragen diese Projektergebnisse zur Identifizierung von Entwicklungsfeldern und Handlungsempfehlungen im Hinblick auf die Förderung von Forschungsvorhaben bezüglich dynamischen Systems-of-Systems bei.

Aus den Anwendungsfällen werden Beispielsysteme abgeleitet, die in Anforderungen und eine Forschungsarchitektur übersetzt werden

Referenzen

- Alliance for Regenerative Medicine (2019). *Advancing gene, cell, & tissue-based therapies: ARM annual report & sector year in review*. Annual report. Washington, D.C.: ARM. [Online]. Available: <https://alliancerm.org/sector-report/2019-annual-report>
- Alliance for Regenerative Medicine (2020). *Growth & resilience in regenerative medicine: Annual report*. Annual report. Washington, D.C.: ARM. [Online]. Available: <https://alliancerm.org/sector-report/2020-annual-report>
- Anderlei, T., Eibl, D., Eibl, R., Eisenkrätzer, D., John, G., Hohenauer, W. et al. (2017). *Facilities of the future*. DECHEMA Statuspapier. Frankfurt am Main: Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. ISBN: 978-3-89746-199-4
- Aulbur, W., Henske, R., Uffelmann, W., & Schelfi, G. (2019). *Farming 4.0: How precision agriculture might save the world*. Roland Berger Focus. Munich: Roland Berger. [Online] Verfügbar: https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_precision_farming.pdf, abgerufen am 22.06.2022.
- Axelsson, J., Fröberg, J., & Eriksson, P. (2018). Towards a system-of-systems for improved road construction efficiency using lean and Industry 4.0. In: *Proceedings of the IEEE 13th Annual Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*. 576–582. DOI: 10.1109/SYSE.2018.8428698
- Barbosa, J., Leitão, P., & Teixeira, J. (2018). Empowering a cyber-physical system for a modular conveyor system with self-organization. In: T. Borangiu, D. Trentesaux, A. Thomas, & O. Cardin (Eds.), *Service orientation in holonic and multi-agent manufacturing* (pp. 157–170). Cham: Springer.
- Bayer, J., Benz, T., Erdmann, N., Grohmann, F., Hoppe-Oehl, H., Hüttenrauch, J. et al. (2019). *Zelluläres Energiesystem: Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellulären Ansatzes mit Handlungsempfehlungen*. Frankfurt am Main: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
- Bayha, A., Bock, J., Boss, B., Diedrich, C., & Malakuti, S. (2020). *Describing capabilities of Industrie 4.0 components*. Whitepaper. Berlin: German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi), Plattform Industrie 4.0. [Online]. Verfügbar: https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Capabilities_Industrie40_Components.pdf?__blob=publication-file&v=3, abgerufen am 22.06.2022.
- Bedenbender, H., Bock, J., Boss, B., Diedrich, C., Garrels, K., Graf Gatterburg, A. et al. (2020). *Verwaltungsschale in der Praxis: Wie definiere ich Teilmodelle, beispielhafte Teilmodelle und Interaktion zwischen Verwaltungsschalen (Version 1.0)*. Diskussionspapier. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Plattform Industrie 4.0. [Online]. Verfügbar: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/2020-verwaltungsschale-in-der-praxis.html>
- Bietendüvel, N., Bodensteiner, B., Bohne, N., Hünecke, C.-A., Kotula, J., Mehr, J., et al. (2021). *Landwirtschaft 4.0 – Chancen und Herausforderungen am Standort Nordrhein-Westfalen*. Landtag Nordrhein-Westfalen, Information 17/330. [Online] Verfügbar: https://www.landtag.nrw.de/files/live/sites/landtag-r20/files/Internet/I.A.1/EK/17._WP/EK%20V/Information%2017-330.pdf, abgerufen am 22.06.2022.

- Bruno, D., Sevilla-Callejo, M., Navarro, E., & Sanz F. (2021). Vigilantes del Aire – Measuring air quality in Spain. *ERCIM News* 127, Special theme: Smart and Circular Cities.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2021). *Elektromobilität in Deutschland*. [Online] Verfügbar: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>, abgerufen am: 20.05.2022
- Colombo, A. W., Bangemann, T., & Karnouskos, S. (2013). A system of systems view on collaborative industrial automation. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 1968–1975. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505980
- Deutsches Institut für Normung (2016). DIN SPEC 91345:2016-04. *Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0. (RAMI4.0)*. [Online] Verfügbar: <https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-spec-91345/250940128>
- Dluczek, S., Tretbar, S., Fricke, S. & Köhl, U. (2019). CAR-T-Zellen: Update 2019. *Transfusionsmedizin*, 9(3), 187–200. DOI: 10.1055/a-0833-2631
- Fidan, M., Beermann, E., & Timm, M. (2021). *Stadtwerkstudie 2021, Zusammen in die Zukunft: Wie Stadtwerke und Kommunen gemeinsam klimaneutral und erfolgreich werden können*. Stuttgart: Ernst & Young; Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft.
- Froschauer, R., Köcher, A., Meixner, K., Schmitt, S., & Spitzer, F. (2022). Capabilities and skills in manufacturing: A survey over the last decade of ETFA. *arXiv preprint arXiv:2204.12908*. DOI: 10.48550/arXiv.2204.12908
- Frost & Sullivan (2020). *Supply chain optimization and decentralized manufacturing to expand the contract cell and gene therapy manufacturing market, 2020–2026*. Research report. Global Transformational Health Research Team. New York: Frost & Sullivan.
- Future Market Insights (2022): *Allogeneic T cell therapies market: Global industry analysis 2015-2019 and opportunity assessment 2020–2030*. Research report, REP-GB-12159. Newark, DE: Future Market Insights.
- Gabrys, J. (2022). Programming Nature as Infrastructure in the Smart Forest City. *Journal of Urban Technology*, 29(1), 13–19. DOI: 10.1080/10630732.2021.2004067
- Galle, N. J., Nitoslawski, S. A., & Pilla, F. (2019). The Internet of Nature: How taking nature online can shape urban ecosystems. *The Anthropocene Review*, 6(3), 279–287. DOI 10.1177/2053019619877103
- Ghofrani, Z., Sposito, V., & Faggian, R. (2017). A comprehensive review of blue-green infrastructure concepts. *International Journal of Environment and Sustainability*, 6(1), 15–36. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2019.103639
- Gorod, A., Sauser, B., & Boardman, J. (2008): System-of-systems engineering management: A review of modern history and a path forward. *IEEE Systems Journal*, 2(4), 484–499. DOI: 10.1109/JSYST.2008.2007163

- Henningsen, J., Herlitzius, T., Jeswein, T., Martini, D., Neuschwander, P., Rauch, B. et al. (2022). Machbarkeitsstudie für Betriebliches Datenmanagement und Farm Management Information System in der Landwirtschaft. *Schriftenreihe des LfULG, Heft 4/2022*. Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
- Iglesias-López, C., Agustí, A., Obach, M., & Vallano, A. (2019). Regulatory framework for advanced therapy medicinal products in Europe and United States. *Frontiers in Pharmacology, 10*, article 921. DOI: 10.3389/fphar.2019.00921
- Karnouskos, S. & Colombo, A. W. (2011). Architecting the next generation of service-based SCADA/DCS system of systems. In: *Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 359–364. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119279
- Klöss, S., Kretschmer, A., Stahl, L., Fricke, S., & Köhl, U. (2019). CAR-expressing natural killer cells for cancer retargeting. *Transfusion Medicine and Hemotherapy, 46*(1), 4–13. DOI: 10.1159/000495771
- Köhl, U. & Abken, H. (2021). CAR T cells as drugs for novel therapies (advanced therapy medicinal products). *Internist, 62*(4), 449–457. DOI:10.1007/s00108-021-00953-x
- Mahmood, A. & Montagna, F. (2012). System of systems architecture framework (SoSAF) for production industries. In: *Proceedings of the IEEE 7th International Conference on System of Systems Engineering (SoSE)*, 537–542. DOI: 10.1109/SYSoSE.2012.6384151
- Mennenga, M., Cerdas, F., Thiede, S., & Herrmann, C. (2019). Exploring the opportunities of system of systems engineering to complement sustainable manufacturing and life cycle engineering. *Procedia CIRP, 80*, 637–642. DOI: 10.1016/j.procir.2019.01.026
- Meyer, T. (2022) Die urbane Logistik läuft auch zukünftig hauptsächlich über die Straße. *Tagesspiegel Background Verkehr & Smart Mobility*. Veröffentlicht am 01.04.2022.
- Miehe, R., Bauernhansl, T., Schwarz, O., Traube, A., Lorenzoni, A., Waltersmann, L. et al. (2018). The biological transformation of the manufacturing industry – Envisioning biointelligent value adding. *Procedia CIRP, 72*, 739–743. DOI: 10.1016/j.procir.2018.04.085
- Mironov, K. (2017). Transport by robotic throwing and catching: Accurate stereo tracking of the spherical object. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. DOI: 10.1109/ICIEAM.2017.8076490
- Pongratz, M., Kupzog, F., Frank, H., & Barteit, D. (2010). Transport by throwing: A bio-inspired approach. In: *Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*, 685–689. DOI: 10.1109/INDIN.2010.5549657
- Porter, M. E. & Heppelmann, J. E. (2014). How smart, connected product are transforming competition. *Harvard Business Review, 92*(11), 64–88.

- SPD, BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN, & FDP (2021). *Mehr Fortschritt wagen: Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit*. Koalitionsvertrag 2021 – 2025 zwischen der Sozialdemokratischen Partei Deutschlands (SPD), BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN und den Freien Demokraten (FDP).
- Sun, T., Zhang, Y., Zhang, H., Wang, P., Zhao, Y., & Liu, G. (2019). Three-wheel driven omnidirectional reconfigurable conveyor belt design. In: *Proceedings of the IEEE Chinese Automation Congress (CAC)*, 101–105. DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8997050
- Umweltbundesamt (2022). *Erneuerbare Energien in Deutschland: Daten zur Entwicklung im Jahr 2021*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Verband kommunaler Unternehmen e. V. (VKU) Landesgruppe Bayern (2018). *Wir halten Bayern am Laufen: Positionen der VKU-Landesgruppe Bayern zur bayerischen Landtagswahlperiode 2018-2023*. München: VKU.
- Verdin, P. & Tsang, T. M. (2021). Next-generation therapeutics thrust into the spotlight. *Nature*, 15(3), B3–B5. DOI: 10.1038/d43747-021-00105-y
- Wang, W., Tolk, A., & Wang, W. (2009). The levels of conceptual interoperability model: Applying systems engineering principles to M&S. *arXiv preprint arXiv:0908.0191*. DOI: 10.1145/1639809.1655398
- Wohlleben, P. (2015). *Das geheime Leben der Bäume: Was sie fühlen, wie sie kommunizieren – die Entdeckung einer verborgenen Welt*. München: Ludwig Verlag. ISBN 9783453280670.
- Wong, C., Wood, J., & Paturi, S. (2020). Vertical farming: An assessment of Singapore City. *Etropic: Electronic Journal of Studies in the Tropics*, 19(2), 228–248. DOI: 10.25120/etropic.19.2.2020.3745
- Xu, L. D. (2020). The contribution of systems science to Industry 4.0. *Systems Research and Behavioral Science* 37(4), 618–631. DOI: 10.1002/sres.2705
- Zevenbergen, C., Fu, D., & Pathirana, A. (2018). Transitioning to sponge cities: Challenges and opportunities to address urban water problems in China. *Water*, 10(9), Paper 1230. DOI: 10.3390/w10091230
- Zhou, B., Dvoryanchikova, A., Lobov, A., Minor, J., & Martinez Lastra, J. L. (2011). Application of the generic modelling method for system of systems to manufacturing domain. In: *Proceedings of the 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, 352–358. DOI: 10.1109/IECON.2011.6119278
- Ziegele, B. & Müller, A. (2012). *Arzneimittel für neuartige Therapien: Regulatorische Anforderungen und praktische Hinweise. Broschüre*. Langen: Paul-Ehrlich-Institut. [Online] Verfügbar: <https://www.pei.de/SharedDocs/Downloads/DE/regulation/beratung/innovationsbuero/broschuere-atmp.html>



Impressum

02. August 2022

IESE-011.22/D | öffentlich

Dieser Bericht ist im Rahmen des Projekts »DynaSoS: Weiterentwicklung der Forschung des Software-Engineering für vertrauenswürdige, dynamische Systems-of-Systems mit autonomen Komponenten« entstanden, das unter dem Förderkennzeichen 01|S21104 vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde.

Verantwortlich: Eduard C. Groen

Redaktion: Eduard C. Groen, Dr. Rasmus Adler, Dr. Frank Elberzhager, Dr. Julien Siebert, Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer

Studienbegleitung: Dirk Günther (DLR Projektträger), Simon Kind (DLR Projektträger), Dr. Sonja Riedel (DLR Projektträger), Dr. Holger Stegemann (DLR Projektträger), Dr. Michael Weber (BMBF)

Autorinnen und Autoren: Florian Balduf, Dr. Sarah Brandt, Dr. Markus Damm, Jens Henningsen, Thomas Jeswein, Ralf Kalmar, Rolf van Lengen, Patrick Mennig, Moritz Mumme, Dr. Pablo Oliveira Antonino, Svenja Polst, Bernd Rauch, Dr. Julien Siebert, Siwara Schmitt, Denis Uecker

Gestaltung: Patrick Mennig, Julia Kirch, Marianna La Rocca

Lektorat: Thomas Jeswein

Wir bedanken uns bei allen Domänen-Expertinnen und -Experten, die zur der Erhebung der Anwendungsfälle beigetragen haben.

Bildnachweise: Titelseite & Seite 50: arquiplay77 – stock.adobe.com | Seiten 6 & 11: © iStock.com/Scharfsinn86 | Seite 12: © iStock.com/PhonlamaiPhoto | Seite 14: © iStock.com/gorodenkoff | Seite 17: © iStock.com/Vanith Janthra | Seite 18: © iStock.com/1933bkk | Seite 23: © iStock.com/halbergman | Seite 24: © iStock.com/Kinwun | Seite 29: © iStock.com/sergeyryzho | Seite 30: © iStock.com/onlyyouqj | Seite 36: Arcansél – stock.adobe.com | Seite 43: Artinun – stock.adobe.com | Seite 44: © iStock.com/scotto72

© Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software-Engineering IESE, Kaiserslautern 2022

Das Fraunhofer IESE ist ein Institut der Fraunhofer-Gesellschaft.

Das Institut transferiert innovative Software-Entwicklungstechniken, Methoden und Werkzeuge in die industrielle Praxis.

Es hilft Unternehmen, bedarfsgerechte Software-Kompetenzen aufzubauen und eine wettbewerbsfähige Marktposition zu erlangen.

Das Fraunhofer IESE steht unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer

Kontakt



Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer
Executive and Scientific Director
liggesmeyer@iese.fraunhofer.de
Fraunhofer IESE
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
www.iese.fraunhofer.de



Dr. Rasmus Adler
Research Program Autonomous Systems
rasmus.adler@iese.fraunhofer.de
Fraunhofer IESE
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
www.iese.fraunhofer.de



Dr. Frank Elberzhager
Architecture-Centric Engineering
frank.elberzhager@iese.fraunhofer.de
Fraunhofer IESE
Fraunhofer-Platz 1
67663 Kaiserslautern
www.iese.fraunhofer.de