



acatech IMPULS

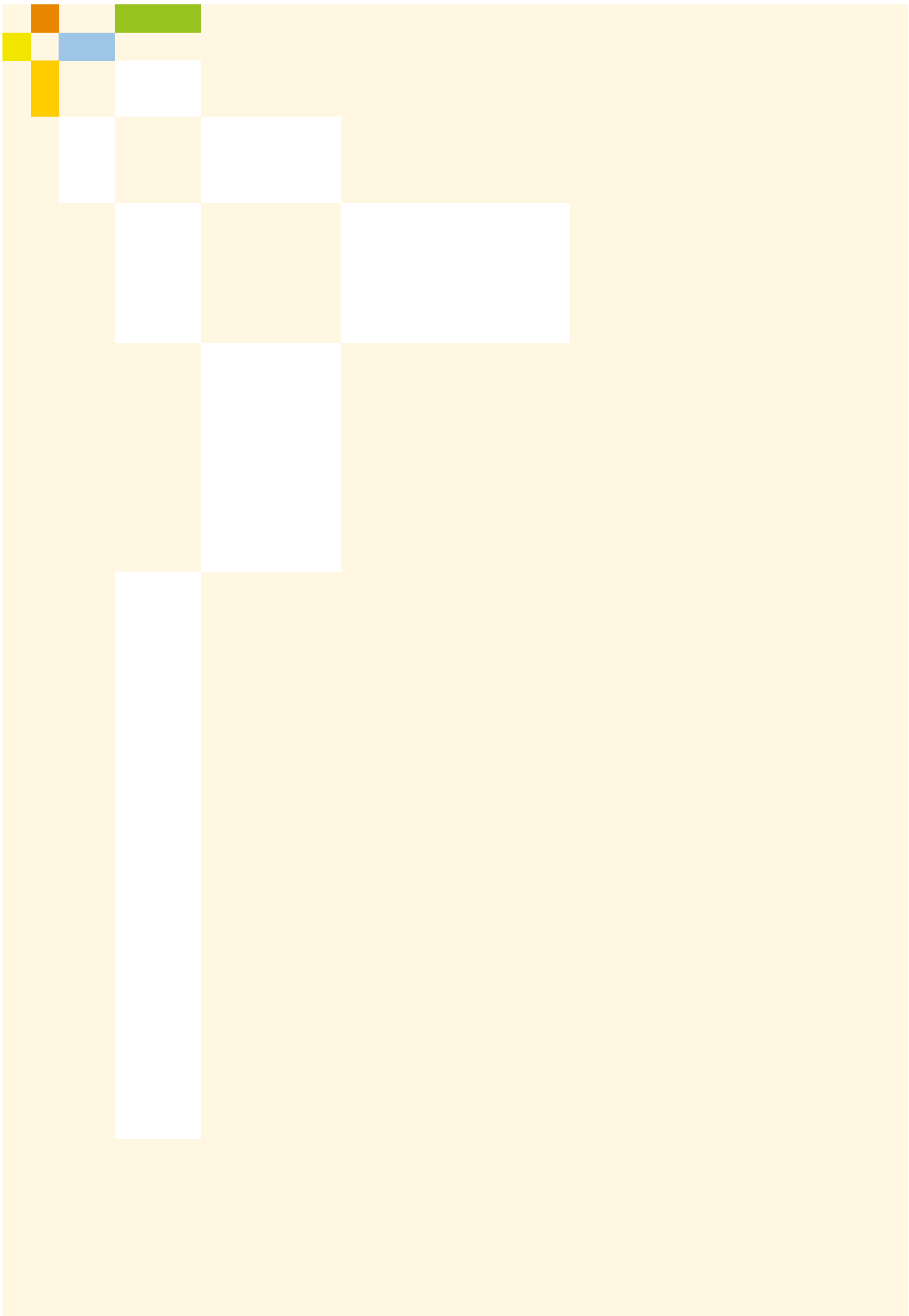
Engineering neu denken und gestalten

Herausforderungen, Anwendungsszenarien
und das neue Leitbild Advanced Systems
Engineering

Albert Albers (Hrsg.)

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech IMPULS

Engineering neu denken und gestalten

Herausforderungen, Anwendungsszenarien
und das neue Leitbild Advanced Systems
Engineering

Albert Albers (Hrsg.)



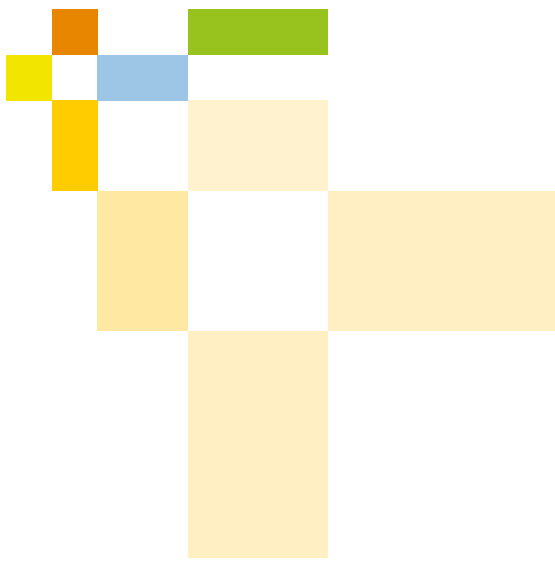
Die Reihe acatech IMPULS

In dieser Reihe erscheinen Debattenbeiträge und Denkanstöße zu techniwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie erörtern Handlungsoptionen, richten sich an Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. Impulse liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

Acht Kernbotschaften	5
Projekt	6
1 Was ist Advanced Systems Engineering?	7
1.1 Komplexität als Herausforderung	7
1.2 Herausforderungen gemeinsam angehen mit Advanced Systems Engineering	7
1.3 Wenn viele Systeme zusammenwirken – System of Systems (SoS)	10
1.4 Die Methoden von morgen	11
2 ASE-Anwendungsszenarien – heute und in Zukunft	14
2.1 Das schlaue Haus	14
2.2 Autonomes Fahren mit Advanced Systems Engineering	16
2.3 Lieferketten transparent gestalten	19
2.4 Nachhaltige Energieversorgung mit Advanced Systems Engineering	21
3 Der globale Blick auf Advanced Systems Engineering	23
4 Der Weg in die ASE-Welt	25
Literatur	29



Acht Kernbotschaften

1. Vom Smartphone über moderne Fahrzeuge bis hin zu Produktionsanlagen: In der Ära der Globalisierung und Digitalisierung bestehen Produkte aus immer mehr Komponenten und Softwarebausteinen. Alle diese Produkte und Komponenten sind heute Teil größerer, komplexer Systeme.
2. Technische Entwicklungen müssen daher angesichts der zunehmenden Komplexität als System betrachtet und geplant werden. Das gilt für Produkte, damit verbundene Dienstleistungen sowie für dazugehörige Produktionssysteme.
3. Schon während der Produktentwicklung muss bedacht werden, wie sich ein Produkt später in das System einbetten lässt. Eine besondere Herausforderung stellen sogenannte soziotechnische Systeme dar, die den Alltag des Menschen berühren.
4. Angesichts der zunehmenden Komplexität stößt die klassische und etablierte Entwicklung von Produkten und Produktionssystemen heute an ihre Grenzen. Der Lösungsansatz, um diese wachsende Komplexität zu erfassen, ist das Advanced Systems Engineering (ASE).
5. Advanced Systems Engineering unterstützt Entwicklerinnen und Entwickler bei ihrer Arbeit, indem es die Komplexität beherrschbar macht und für Transparenz zwischen den verschiedenen Disziplinen sorgt. Nur mit Advanced Systems Engineering lassen sich künftig komplexe, intelligente, vernetzte, soziotechnische Systeme, sogenannte Advanced Systems (AS), gestalten.
6. Advanced Systems Engineering bietet die Voraussetzung dafür, dass die Wirtschaft langfristig wettbewerbs- und zukunftsfähig bleibt, nachhaltig gestaltet ist und alle Kundenbedürfnisse befriedigt.
7. Voraussetzung für Advanced Systems Engineering ist ein kooperatives, interdisziplinäres und agiles Arbeiten. Die Ingenieurinnen und Ingenieure von morgen brauchen dafür nicht nur fundiertes Fachwissen in ihrer Disziplin, sondern eine hohe Vernetzungskompetenz, Systemkompetenz und Architekturkompetenz.
8. Die Entwicklung von ASE-Konzepten steht noch am Anfang. Es bedarf einer konzertierten Gemeinschaftsanstrengung vor allem von Wissenschaft und Wirtschaft, um Advanced Systems Engineering zum neuen Leitbild industrieller Entwicklung zu machen.



Projekt

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie KIT

Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, IPEK - Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Christiane Benner, IG Metall
- Dr.-Ing. Peter Börsting, Dematic GmbH
- Prof. Dr. Manfred Broy, Technische Universität München
- Prof. Dr.-Ing. Nikola Bursac, ISEM Institut für smarte Entwicklung und Maschinenelemente, Technische Universität Hamburg (TUHH)
- Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM
- Prof. Dr. Wolfgang Ecker, Infineon Technologies AG
- Patrik Krause, 3DSE Management Consultants GmbH
- Thomas Kriegel, Volkswagen AG
- Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer, Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE
- Sebastian Märkl, Manager, 3DSE Management Consultants GmbH
- Dr. Ottmar Müller, VAT Vakuumventile AG
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel, Department für Informatik, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Prof. Dr. Sabine Pfeiffer, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
- Dr. Stefan Sauer, Institut für Soziologie, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
- Franz-Josef Schuermann, itemis Inc.
- Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, Technische Universität Berlin
- Dr.-Ing. Daniel Steffen, UNITY AG
- Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser, Technische Universität München

Mitwirkende

- Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn/acatech Vizepräsident a. D.

Projektgruppe Advanced Systems Engineering

- Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers, IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Christiane Benner, IG Metall
- Prof. Dr.-Ing. Roman Dumitrescu, Fraunhofer-Institut für Entwurfstechnik Mechatronik IEM
- Prof. Dr. Wolfgang Ecker, Infineon Technologies AG
- Thomas Kriegel, Volkswagen AG
- Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, wbk Institut für Produktionstechnik, Karlsruher Institut für Technologie KIT
- Prof. Dr.-Ing. Peter Liggesmeyer, Fraunhofer-Institut für Experimentelles Software Engineering IESE
- Dr. Ottmar Müller, VAT Vakuumventile AG
- Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Nebel, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
- Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel, Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO
- Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark, Technische Universität Berlin
- Dr.-Ing. Daniel Steffen, UNITY AG
- Prof. Dr.-Ing. Birgit Vogel-Heuser, Technische Universität München

Interviews, Recherchen und Koordinierung

- David Gierscher, acatech Geschäftsstelle
- Marco Mitrovic, acatech Geschäftsstelle

Mit Unterstützung durch

- Dr. Steffen Steglich, acatech Geschäftsstelle
- Christina Müller-Markus, acatech Geschäftsstelle

Die Festlegung der Inhalte und die Arbeit am Text erfolgten durch die Projektgruppe. acatech hat für diese Publikation Fachinterviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft geführt. Die Gespräche fanden zwischen November 2020 und November 2021 statt. Einige Kerngedanken der Befragten sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.

1 Was ist Advanced Systems Engineering?

Die technischen Systeme, die uns umgeben, werden immer komplexer. Fertigungslinien bestellen von allein Ersatzteile, wenn diese zur Neige gehen. Medizinische Diagnosesysteme suchen in radiologischen Bildern selbstständig nach Tumoren und machen Ärztinnen und Ärzten Vorschläge für Krebstherapien, und bereits in wenigen Jahren sollen Autos von ganz allein über die Autobahnen steuern. Möglich wird all das durch immer leistungsfähigere mechanische Komponenten, Mikroprozessoren und intelligente Software – und weil heute viele Maschinen und Geräte über das Internet und den Mobilfunk miteinander und mit Servicediensten und Steuerzentralen verbunden sind. Diese komplexen technischen Systeme bergen große Chancen. Doch mit der wachsenden Komplexität wird es für die Entwicklerinnen und Entwickler immer schwieriger, Lösungen für Maschinen und Geräte zu konzipieren und zu gestalten, weil diese auf kaum noch überschaubare Weise miteinander verwoben sind. Das Problem besteht darin, dass in die Entwicklung der immer komplexeren Systeme immer mehr Fachleute aus verschiedenen Disziplinen involviert sind, die miteinander kommunizieren müssen. Bislang fehlt es dafür aber an einer gemeinsamen „technischen Sprache“, die alle Disziplinen miteinander verbindet. Das Advanced Systems Engineering (ASE) hat das Ziel, eine solche gemeinsame Sprache zu entwickeln, die es trotz zunehmender Komplexität auch künftig möglich macht, sichere und verlässliche technische Systeme in überschaubarer Zeit zu entwickeln.

1.1 Komplexität als Herausforderung

Die enorme Komplexität künftiger technischer Systeme lässt sich gut am Beispiel des „vollautomatisierten Fahrens“ verdeutlichen, mit dem in Zukunft etwa fahrerlose Taxis autonom durch die Städte navigieren sollen. Das vollautomatisierte Fahren zeigt, wie stark verschiedene Technologien interagieren: Autonome Taxis sollen in der Lage sein, von allein den Weg zum Ziel zu finden und Kollisionen zu vermeiden. Darüber hinaus sollen sie permanent Verkehrsdaten abrufen und sich so in die Lage versetzen, Staus zu umfahren und pünktlich am Ziel einzutreffen. Idealerweise kennen sie auch die Fahrpläne von Bussen und Bahnen, damit die Fahrgäste ihren Anschluss erreichen. Denkbar wäre es auch, Fahrgäste mit einem Entertainment-Programm zu unterhalten.

Und natürlich muss ein autonomes Taxi auch mit Bezahlssystemen kommunizieren, damit die Gäste ihre Fahrt schnell und einfach abrechnen können. In künftigen Dienstleistungen wie dem „autonomen Taxi“ werden also mehr und mehr Technologien und einzelne Systeme immer stärker miteinander verschmelzen.

Solche komplexen Dienstleistungen und technischen Lösungen kann kein Mensch mehr allein entwickeln. Vielmehr werden an der Entwicklung künftiger Technologien wie des autonomen Fahrens Fachleute aus vielen verschiedenen Disziplinen zusammenarbeiten – Maschinenbau- und Elektronikingenieurinnen und -ingenieure, Softwareentwicklerinnen und -entwickler, Ökonomeninnen und Ökonomen oder auch Verkehrsplanerinnen und -planer sowie Verkehrspsychologinnen und -psychologen. Das bringt zwei Herausforderungen mit sich: Zum einen sprechen Expertinnen und Experten aus verschiedenen Fachgebieten unterschiedliche Fachsprachen. Aus dem Alltag kennt man dergleichen vom Besuch der Praxis einer Ärztin oder eines Arztes, deren Fachsprache man oftmals nicht versteht. Die Kooperationspartner müssen zunächst eine gemeinsame Fachsprache finden, um in überschaubarer Zeit funktionierende und sichere Lösungen entwickeln zu können. Zum anderen muss der komplexe Entwicklungsprozess über alle Disziplinen hinweg transparent gestaltet und kommuniziert werden, damit sich trotz der Komplexität und der vielen Beteiligten keine Fehler einschleichen und jeder Entwicklungsschritt nachvollziehbar bleibt.

1.2 Herausforderungen gemeinsam angehen mit Advanced Systems Engineering

Für die Entwicklung hochkomplexer technischer Systeme existiert bis heute jedoch keine gemeinsame technische Sprache, die alle Disziplinen verbindet. Damit ist nicht die Kommunikation im gesprochenen Wort gemeint – da ist Englisch bereits als Weltsprache etabliert. Gemeint ist eine Modellsprache zur Beschreibung komplexer technischer Zusammenhänge, die für alle Disziplinen nutzbar ist und diese auf einer überlagerten Kommunikationsebene vernetzt. Angesichts der zunehmenden Komplexität muss diese in den kommenden Jahren schnellstmöglich entwickelt werden. Das theoretische Konzept dafür gibt es bereits – das „Advanced Systems Engineering“, die „fortgeschrittene Gestaltung von Systemen“. Das Advanced Systems Engineering erweitert das klassische „Systems Engineering“ (SE).



Wir können nicht mit den Methoden des 20. Jahrhunderts die Herausforderungen in der Produktentwicklung und Produktion des 21. Jahrhunderts angehen.

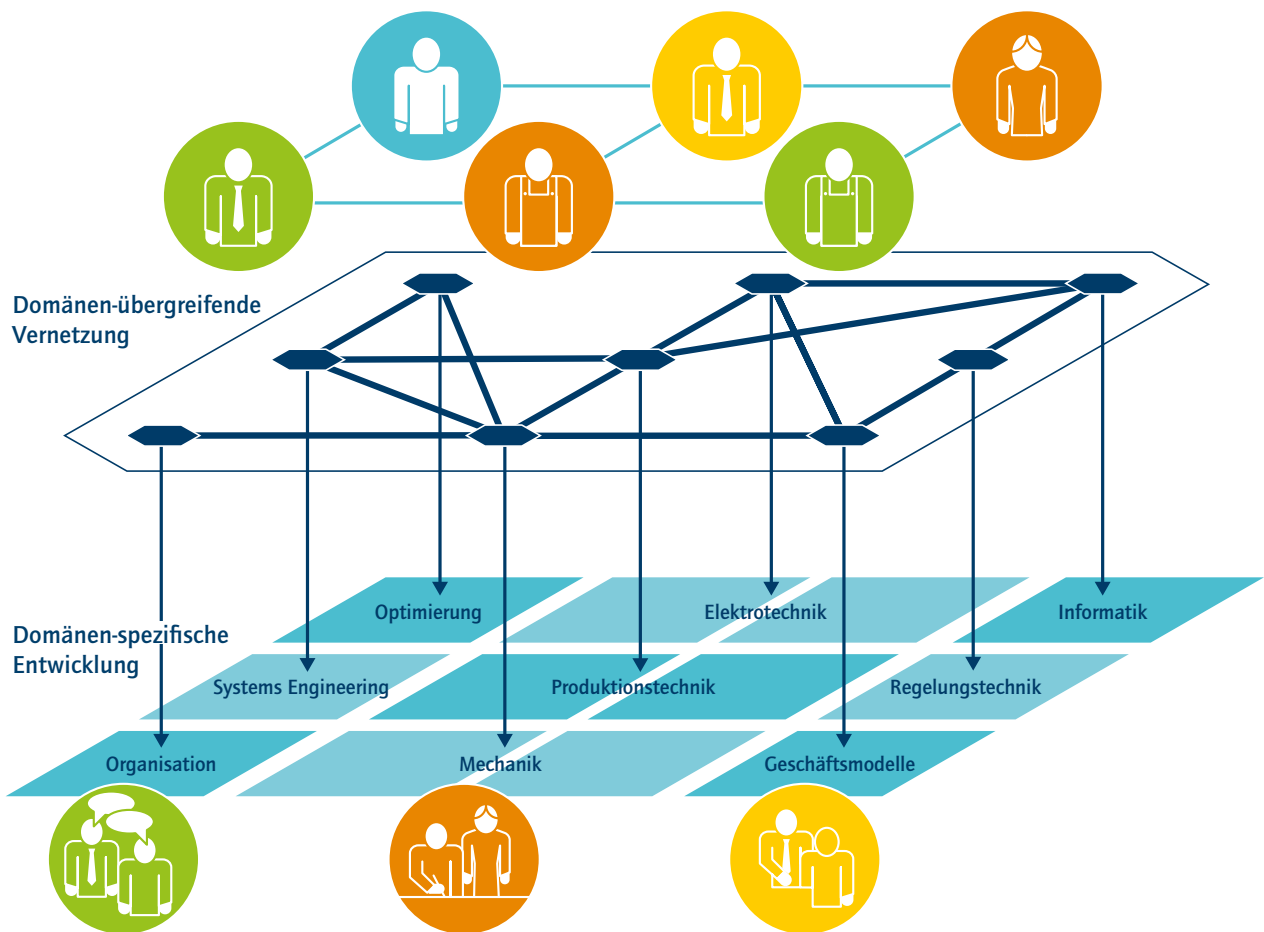


Abbildung 1: Kontinuierliches Wechselspiel zwischen Domänen-spezifischer Entwicklung und Domänen-übergreifender Vernetzung im Advanced Systems Engineering (Quelle: eigene Darstellung nach Albers et al. 2021)

Dieses wurde erdacht, um technische Systeme in großen Projekten zu entwickeln – beispielsweise große Flugzeuge. Ihm fehlt aber die gemeinsame Sprache, die verschiedene Fachgebiete verbindet. Für die noch komplexeren Systeme der Zukunft reicht der SE-Ansatz daher nicht mehr aus. Diese Komplexität lässt sich nur mit dem Advanced Systems Engineering erfassen.¹

Menschen sind konkurrenzlos gut darin, kreativ zu arbeiten und neue Lösungen zu erdenken. Die zunehmende Komplexität technischer Systeme wie etwa des autonomen Fahrens macht es aber immer schwerer, alles zu überblicken und eine passgenaue Lösung zu entwerfen. Vergisst man bei der Entwicklung eines Kommunikationssystems für autonome Taxis beispielsweise eine Schnittstelle für die Bezahlssysteme, kann das später die ganze Entwicklung verzögern oder gar zurückwerfen. Das Advanced Systems Engineering soll die Entwicklerinnen und Entwickler bei ihrer Arbeit unterstützen, indem es die Komplexität beherrschbar macht und für Transparenz zwischen den verschiedenen Disziplinen sorgt. Maschinenbauingenieurinnen und -ingenieure verständigen sich über technische Zeichnungen, Softwareentwicklerinnen und -entwickler über Programmcodes und Programmiersprachen. Das Advanced Systems Engineering soll eine höhere Kommunikationsebene liefern. So kann dann beispielsweise der Inhalt eines Anforderungskatalogs oder einer technischen Zeichnung durch einheitliche Beschreibungen und insbesondere Diagramme für alle verständlich und nachvollziehbar dargestellt werden.²

Die Entwicklung eines neuen Produktes läuft in Zyklen ab, in denen Synthese und Analyse aufeinanderfolgen. Der Prozess beginnt mit der Synthese, der kreativen Entwicklungsarbeit. Darauf folgt die Analyse, in der untersucht wird, ob die erdachte Lösung alle gewünschten Eigenschaften des zu gestaltenden Produktes erfüllt. Ist dies nicht der Fall, muss die Lösung im nächsten Syntheseschritt weiterentwickelt werden. Das Advanced Systems Engineering ist deshalb so wichtig, weil bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme wie des autonomen Fahrens kein Entwickler mehr allein alle Produkteigenschaften und Zielgrößen überblicken kann. Dank Advanced Systems Engineering, der gemeinsamen Sprache, der darauf aufbauenden Computerprogramme und Datenbanken aber können alle Beteiligten zugleich den Entwicklungsstand einsehen und rechtzeitig Korrekturen vornehmen. Zudem wird jeder Entwicklungsschritt für alle verständlich protokolliert. Sollten im Lauf des Entwicklungsprozesses Fehler oder Ungereimtheiten auftreten, können die

Beteiligten erkennen, an welcher Stelle des Synthese-Analyse-Zyklus etwas falsch gelaufen ist.

Die Welt als „System“ begreifen

Grundsätzlich besteht ein „System“ aus mehreren Elementen, die eine übergeordnete Einheit bilden. Ein solches System kann ein Auto mitsamt seinen vielen Tausend Teilen und der Antriebstechnik sein. Den Menschen wiederum kann man als System aus Körperzellen betrachten, in denen ganz verschiedene Stoffwechselprozesse ablaufen. Bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts begannen Wissenschaftler damit, sich mit dem Begriff des „Systems“ zu befassen. Als Begründer der allgemeinen Systemtheorie gilt der Österreicher Karl Ludwig von Bertalanffy, der sich seit den dreißiger Jahren insbesondere mit den Gesetzmäßigkeiten lebender und physikalischer Systeme befasste. Er prägte den Begriff des Fließgleichgewichts. Demnach befindet sich zum Beispiel der Körper eines gesunden Menschen in einem Fließgleichgewicht – der Homöostase. In den folgenden Jahrzehnten wurde der Systembegriff in den Ingenieurwissenschaften populär. Von Interesse war zunächst die grundsätzliche Frage, wie sich technische Systeme regeln und steuern lassen. Einen Schub bekam die Systemforschung durch das Apollo-Programm der US-Weltraumbehörde NASA in den sechziger Jahren, die damals die Mondlandung vorbereitete. Das Apollo-Programm war eines der komplexesten technischen Vorhaben seiner Zeit. Es galt eine Raumfähre und ein Mondlandefahrzeug zu entwickeln, die bei extrem tiefen Temperaturen und insbesondere in der Schwerelosigkeit funktionieren sollten. Hinzu kam das ‚System Mensch‘, dessen Lebensfähigkeit unter diesen harschen Bedingungen keine Beeinträchtigung erfahren durfte.

Angesichts der Komplexität des Apollo-Programms wurde damals der Begriff des „System Engineering“ geprägt. Das System Engineering ist ein Ansatz, um komplexe technische Systeme in großen Projekten zu entwickeln. Dabei orientieren sich die Entwicklerinnen und Entwickler zunächst daran, wie das Endprodukt idealerweise aussieht. Diesem Ziel nähert man sich in

1 | Vgl. Dumitrescu et al. 2021.

2 | Vgl. Haberfellner et al. 2012 sowie Ulrich und Probst 1995.



mehreren Prozessschritten an: Zunächst wird das System auf die verschiedenen Funktionen, die es erfüllen muss, heruntergebrochen. Damit lässt sich das System in Subsysteme aufteilen, die getrennt voneinander entwickelt werden – von der Software bis zum Motor. Anschließend wird in mehreren Zyklen überprüft, ob alle Subsysteme korrekt zusammenarbeiten, bis schließlich alle gewünschten Anforderungen erfüllt sind. In der Regel ist das System Engineering ein interdisziplinärer Prozess, weil in die großen Projekte Fachleute aus verschiedenen Fachrichtungen eingebunden sind.

Viele technische Systeme wirken in den Alltag des Menschen hinein. In diesem Fall spricht man von sozio-technischen Systemen. Ein einfaches Beispiel ist das Autofahren: Das System Auto wird vom ‚System Mensch‘ gelenkt. Beide wiederum sind in ein dynamisches System aus vielen anderen Verkehrsteilnehmenden eingebettet – ein umfassendes Mobilitätssystem.

Wir haben es in der Produktgestaltung zunehmend mit noch nie dagewesener Komplexität zu tun.

1.3 Wenn viele Systeme zusammenwirken – System of Systems (SoS)

Die Entwicklung technischer Lösungen und Produkte wird künftig vor allem deshalb immer komplizierter, weil wir es im Alltag nicht mehr mit einzelnen Systemen zu tun haben, sondern mit immer mehr Systemen, die sich gegenseitig beeinflussen. Fachleute sprechen dabei von einem „System of Systems“ (SoS). Zwar kann jedes einzelne System für sich allein autark agieren. Durch das Zusammenwirken im System-of-System-Verbund aber lassen sich ganz neue Ziele erreichen. Ein Beispiel ist das Stromnetz der Zukunft. Früher wurde der elektrische Strom in großen Kraftwerken erzeugt und durch Stromleitungen über das Land bis in die Städte und Dörfer zu den Häusern transportiert. Dieses klassische Netz wird heute auf den Kopf gestellt. Mit Biogasanlagen auf dem Land, Solaranlagen auf Hausdächern und Windparks entlang der Küste und auf dem Meer gibt es Tausende kleinerer oder größerer Erzeuger, die über das Stromnetz verteilt ihren Strom einspeisen. Manche Haushalte sind nicht mehr nur Verbraucher, sondern

können, sofern eine Photovoltaikanlage auf dem Dach sitzt, Strom erzeugen und einspeisen. Seit einiger Zeit werden bundesweit in Haushalten sogenannte Smartmeter installiert, intelligente Stromzähler, die über einen Router mit dem Stromnetz kommunizieren. Damit wird es künftig beispielsweise möglich, das Elektroauto an der heimischen Wallbox zu laden, wenn der Strompreis an den Energiebörsen niedrig ist. Umgekehrt kann das Elektroauto als Stromspeicher dienen und Strom ins Netz einspeisen, wenn er sich zu einem guten Preis verkaufen lässt. So wandelt sich das klassische Stromnetz langsam zu einem intelligenten Stromnetz, das Raum für viele neue Geschäftsideen bietet. Künftig könnte Strom zum Beispiel in einer Stadt oder einem Stadtteil direkt zwischen Nachbarn gehandelt werden – quasi auf dem kleinen Dienstweg. Eine Privatperson mit einer Photovoltaikanlage könnte Nachbarn mitversorgen, die Strom benötigen. Peer-to-peer-Handel nennen Fachleute diesen direkten Stromtransport von Tür zu Tür. Viele für sich automatisch entscheidende Systeme wechselwirken in diesem Stromnetz der Zukunft auf komplexe und dynamische Weise – ein typisches System of Systems.

Das intelligente Stromnetz der Zukunft verdeutlicht, wie viele Systeme heutzutage interagieren können – der Windpark als Stromerzeuger, das Elektroauto als Stromspeicher, Privatleute, die zu Stromhändlerinnen und -händlern werden und viele mehr. Bei allem muss sichergestellt sein, dass das Stromnetz stabil bleibt und die Kundschaft sicher versorgt wird. Damit berührt das System of Systems eine Vielzahl an technischen, gesellschaftlichen und ökonomischen Aspekten. Hinzu kommt, dass in diesem System of Systems viele dynamische Vorgänge ablaufen, was es sehr komplex macht. Im Tagesverlauf schwankt der Strombedarf. Die Leistung von Photovoltaikanlagen und Windrädern verändert sich mit dem Wetter, und vom Strompreis hängt ab, ob Strom eher eingespeist oder verbraucht wird. Das System of Systems muss sich folglich permanent an die Umwelt anpassen. Mit dem klassischen System Engineering (SE) lässt sich diese Komplexität nicht mehr fassen. Vor allem scheitert das SE, wenn die Systeme oder Teile der Systeme, die Software, die Hardware sowie externe Faktoren anfangen, sich gegenseitig dynamisch zu beeinflussen und mit der Umwelt zu interagieren. Diese Dynamik beherrscht das Systems Engineering nicht mehr. Die Lösung ist das interdisziplinäre Advanced System Engineering, das eine gemeinsame Sprache über alle Disziplinen und Systembestandteile hinweg bietet. Für die Entwicklerinnen und Entwickler wird es dadurch möglich, Systeme wie das Stromnetz oder das autonome Fahrzeug ganzheitlich zu gestalten und alle Aspekte des System of Systems zu berücksichtigen. Tatsache ist, dass es bis heute noch

keine technische Unterstützung gibt, um ein System of Systems zuverlässig zu entwickeln. Das Advanced Systems Engineering bietet diese Unterstützung, sodass es künftig möglich wird, optimale und sichere Systems of Systems zu gestalten.

Zu der Technik kommt ein kognitiver Aspekt hinzu: Das System muss sich in Echtzeit an die Umwelt anpassen, neu lernen und sich ständig selbst optimieren.

1.4 Die Methoden von morgen

Zwar gibt es bislang noch kein fertiges ganzheitliches ASE-Konzept und erst recht keine durchgängigen ASE-Entwicklungswerkzeuge für das Design der Systems of Systems. Doch existieren bereits Ansätze, die man als wichtige Bausteine des Advanced Systems Engineering betrachten kann. Dazu zählt unter anderem das Modellbasierte Systems Engineering (MBSE). Beim MBSE werden Informationen über ein technisches System, das man entwickeln will, nicht mehr ausschließlich in Form von Textdokumenten, technischen Zeichnungen oder Computergrafiken (Computer Aided Design, CAD) dargestellt, sondern mithilfe zentraler, vernetzter Modelle auf der Grundlage von grafischen Elementen. Dafür gibt es heute bereits international einheitliche Modellierungssprachen wie die Systems Modeling Language (SysML), mit deren Hilfe zum Beispiel Produkteigenschaften, Anforderungen oder Systemfunktionen bildhaft dargestellt sowie verknüpft und damit für verschiedene Anwendungsfälle in der Entwicklung und bei der Analyse von technischen Systemen verwendet werden können.

Das MBSE hat mehrere Vorteile: Getreu dem Motto „Ein Bild sagt mehr als 1000 Worte“ können Inhalte besser visualisiert und erfasst werden als in Textdokumenten oder Anforderungskatalogen. Hinzu kommt, dass die Wechselwirkungen zwischen den grafischen Elementen und somit den verschiedenen Teilen eines Systems modelliert und sichtbar gemacht werden. Je nachdem, welche Personen an einem Entwicklungsschritt beteiligt sind, können relevante Inhalte hervorgehoben und weniger relevante ausgeblendet werden. Ferner ist die bildliche Darstellung eindeutiger als Sprache, weil das Sprachverständnis abhängig von Kultur, Herkunft, Ausbildung und Hintergrund variieren kann. Bislang aber zögern viele Unternehmen, das MBSE einzuführen, weil dies zunächst mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden ist. Denn über das gängige Entwicklungsprozedere hinaus sehen sie sich

vor die Herausforderung gestellt, Informationen aus technischen Zeichnungen und CAD-Modellen oder Ergebnisse von Simulationen und Versuchen in das MBSE-Modell zu implementieren. Dieser Aufwand stellt aber eine gute Investition dar! Denn neben den schnellen Erfolgen wie der frühzeitigen Identifikation von Fehlern bietet insbesondere die Wiederverwendung der erstellten Modelle über Produktgenerationen hinweg ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung im Entwicklungsprozess.

Zu den Vorstufen des Advanced Systems Engineering kann man auch neue Ansätze zur Produktentwicklung zählen, die sich langsam in den Unternehmen etablieren – etwa das Konzept der Produktgenerationsentwicklung (PGE-Modell). Die Idee besteht darin, bei der Entwicklung einer technischen Lösung nicht nur die nächste Produktgeneration im Blick zu haben, sondern auch künftige Generationen. In der Regel setzt jedes neue Produkt, etwa ein neues Automodell, auf einem Vorgänger und einer früheren Generation auf. Je komplexer technische Systeme werden, desto größer ist der Entwicklungsaufwand für das Modell der neuen Produktgeneration und desto mehr lohnt es sich, weiter in die Zukunft zu schauen, um eine technische Lösung zu entwickeln, die langfristig nutzbar ist. Erste Automobilhersteller setzen bereits auf die Produktgenerationsentwicklung. So werden heute bereits Fahrzeuge vorgedacht, die erst in etwa zwölf Jahren auf den Markt kommen werden. Dieser Ansatz ist – ganz im Sinne des Advanced Systems Engineering – interdisziplinär. So braucht es Expertinnen und Experten, die zuverlässig abschätzen können, wie sich die Gesellschaft verändert und welche Bedarfe die Nutzerinnen und Nutzer künftig haben werden. Zudem braucht es Fachleute, die die künftige Entwicklung von neuen Materialien und Produktionsverfahren einschätzen können. Die Entwicklung von Technologien, Märkten und Geschäftsumfeldern im Rahmen der strategischen Produktplanung muss auf diese Weise vorgedacht und antizipiert werden. Dies wird im PGE-Modell abgebildet und so kontinuierlich nutzbar gemacht. Und dann braucht man die Gestalter der Produktgenerationen, die im Rahmen eines einheitlichen Modells – der PGE – all die voneinander abhängigen Randbedingungen und Anforderungen in Produktlösungen umsetzen.

Auch das Konzept des Produkt-Produktions-Co-Designs (PPCD) weist den Weg zum künftigen Advanced Systems Engineering. Bisher läuft der Prozess von der Entwicklung bis zur Herstellung eines Produktes in getrennten Schritten ab. Zunächst wird das Produkt in mehreren Synthese- und Analysezyklen entwickelt. Anschließend werden die dafür benötigten Anlagen und Werkzeuge konzipiert



und die Fertigungslinie entworfen. Das Problem: Oftmals stellt sich hinterher heraus, dass eine Optimierung der Produktion möglich gewesen wäre, wenn man das Produkt während des Entwicklungsprozesses minimal verändert hätte. Nur ist es dann bereits zu spät. Das PPCD geht einen anderen Weg. So wird bereits bei der Entwicklung des Produktes die spätere Produktion mitbedacht. Das künftige Produktionssystem wird während der Produktentwicklung mitkonzipiert und gleichzeitig werden Anforderungen des entstehenden Produktionssystems an das Produkt kontinuierlich kommuniziert und in der Produktgestaltung direkt berücksichtigt. So ist am Ende die eigentliche Produktion sowohl kosten- und energiesparender als auch nachhaltiger.

Ein weiteres neues methodisches Element ist der sogenannte Digitale Zwilling eines Produktes. Ein Digitaler Zwilling ist eine

digitale Darstellung eines realen Produktes oder Prozesses. Es handelt sich dabei um eine virtuelle Kopie, die in Echtzeit aktualisiert wird und Informationen darüber enthält, wie das reale Objekt funktioniert und wie es sich verhält. Ein Digitaler Zwilling kann im Entwicklungsprozess genutzt werden, um virtuelle Tests durchzuführen, bevor ein physisches Produkt hergestellt wird. Damit kann man in der sehr frühen Phase der Entwicklung bereits erste Erkenntnisse über die Qualität des künftigen Produktentwurfs gewinnen und diesen dann bei Bedarf weiter optimieren. Im Kontext der Systems of Systems kann der Digitale Zwilling auch bei der Nutzung des Produktes wertvolle Beiträge leisten – etwa um die Leistung eines Produkts oder einer Anlage in der Produktion zu optimieren oder um eine vorausschauende Wartung durchzuführen. Bei einem autonomen Fahrzeug wiederum kann der Digitale Zwilling in Echtzeit das Verhalten erfassen und durch

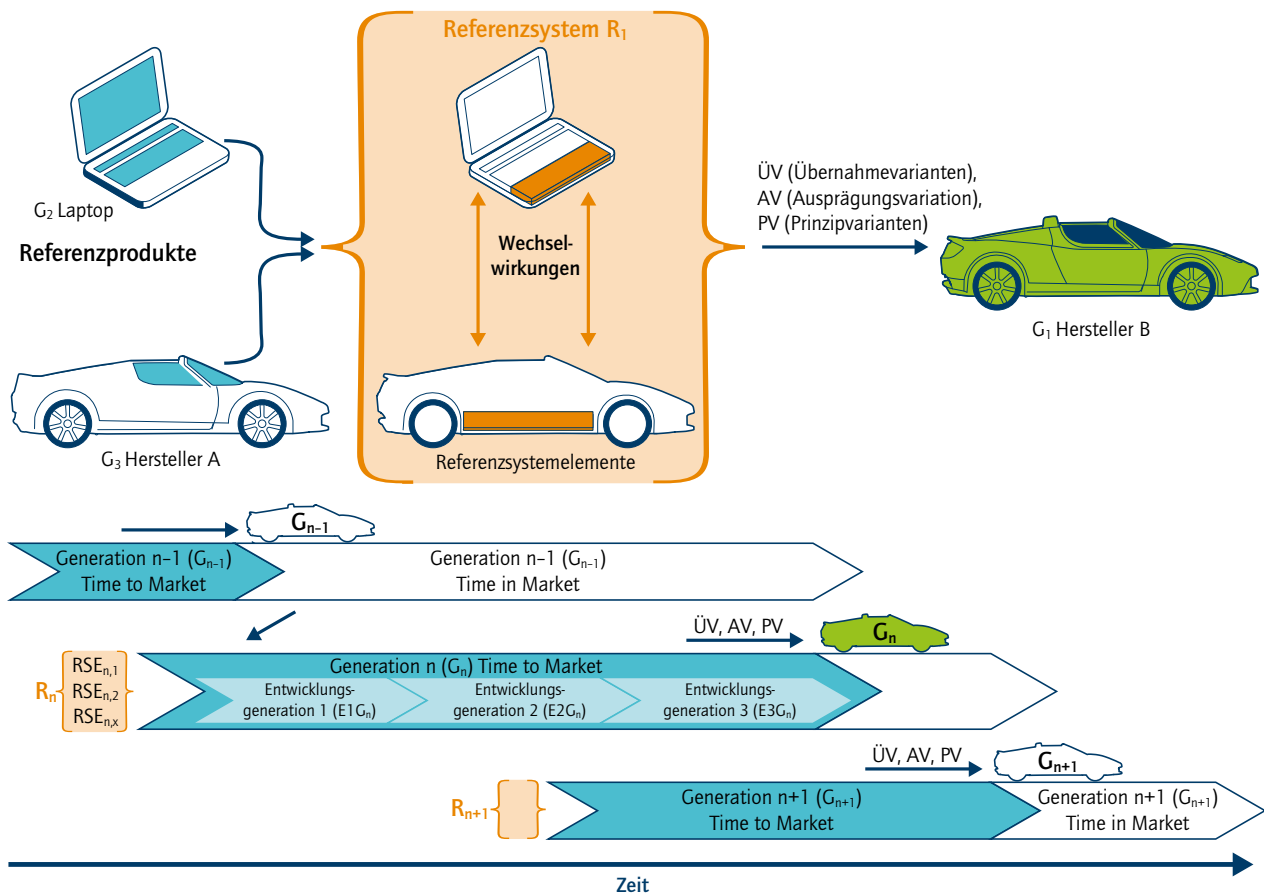


Abbildung 2: Das PGE-Modell der Produktgenerationsentwicklung beschreibt mehrere Generationen von Produkten und deren Zusammenhänge als eine Basis für ASE (Quelle: eigene Darstellung).

einen Eingriff optimieren. In Anbetracht der Möglichkeit, dass in Zukunft für jedes Auto auf der Straße, jede Waschmaschine im Haushalt und jede Anlage in den Unternehmen ein Digitaler Zwilling in der Cloud mitläuft, zeichnet sich schon jetzt deutlich ab, dass die damit einhergehende Zunahme von Komplexität ohne Advanced Systems Engineering nicht mehr beherrschbar sein wird.

Zwar sind die Produktgenerationsentwicklung (PGE) und das Produkt-Produktions-Co-Design (PPCD) noch nicht so allumfassend wie die künftigen ASE-Lösungen. Dennoch zeigen sie beispielhaft, wie Entwicklungsprozesse später einmal ablaufen könnten und stellen somit Ansätze für das ganzheitliche Advanced Systems Engineering dar.

Advanced Systems Engineering wird benötigt, um die nächste Generation der Waschmaschine und die übernächste Generation von Automobilen besser, sicherer, nachhaltiger und ganzheitlicher zu entwickeln – also auch für ganz normale Unternehmens-tätigkeiten, nicht nur für Fancy Things. Das Konzept hilft, Probleme anzugehen, die heute noch nicht gelöst sind.

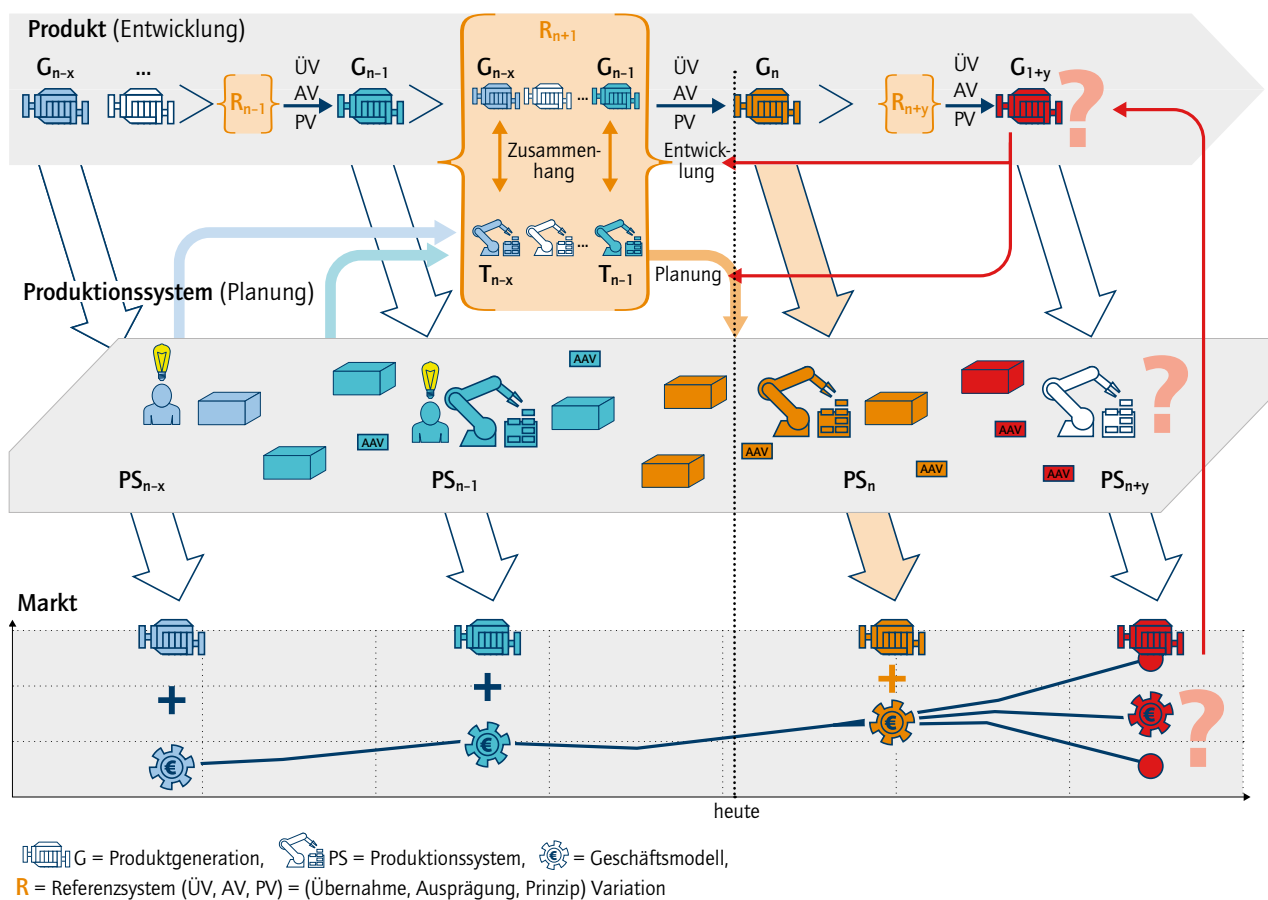


Abbildung 3: Produkt-Produktions-CoDesign – ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg (Quelle: eigene Darstellung nach Albers et al. 2022)



2 ASE-Anwendungsszenarien – heute und in Zukunft

Die ganze Komplexität der Systems of Systems lässt sich am besten an konkreten Anwendungsszenarien erläutern. Diese verdeutlichen, wie viele technische und gesellschaftliche Aspekte künftig von diesen Systemen berührt werden. Die folgenden Beispiele machen auch klar, dass letztlich nur das Advanced Systems Engineering in der Lage ist, die vielen Aspekte und Fachdisziplinen zusammenzuführen, um ganzheitliche nachhaltige und leistungsstarke Lösungen für die ganze Gesellschaft zu entwickeln.

2.1 Das schlaue Haus

Die Systems of Systems der Zukunft sind keine abstrakte Sache. Im Gegenteil: Viele Systems of Systems werden unseren Alltag stark beeinflussen. Das fängt bereits in unserem Zuhause an. Seit einiger Zeit werden Technologien für das schlaue Haus, das Smarthome, immer beliebter. Längst kann man per Smartphone das Licht im Wohnzimmer dimmen oder im Urlaub schnell mal einen Blick durch die Überwachungskamera in den heimischen Garten werfen. Solche Funktionen sind bereits für wenig Geld zu haben. Denn seit einiger Zeit bieten sogar Discounter und die großen Möbelhausketten die Ausrüstung für das Smarthome an. Per Tastendruck aufs Handy lässt sich die Markise ausfahren oder der Rasensprenger einschalten. Kombiniert man die Technik zusätzlich mit einem intelligenten Lautsprecher, lässt sich alles mit einem Sprachbefehl an- und abschalten. Das Smarthome der Zukunft soll noch viel mehr können und zum Beispiel über einen intelligenten Stromzähler, den Smartmeter, mit dem Stromnetz interagieren.

Was in Zukunft alles möglich sein wird, lässt sich am Beispiel der Waschmaschine zeigen. Schon heute gibt es Waschmaschinen, die sich per Smartphone-App steuern lassen. Künftig wäre es denkbar, dass eine Waschmaschine anhand der Waschzyklen errechnet, wie viel Waschmittel sie verbraucht hat. Bei Bedarf kann sie selbstständig Nachschub bestellen. Im Smarthome der Zukunft sollen alle Geräte über das Smartmeter miteinander verbunden

sein. Das hätte den Vorteil, dass man an jedem Gerät den Zustand der anderen ablesen könnte. Wer gerade in der Küche arbeitet, könnte dann am Backofen-Display nachschauen, wie weit die Wäsche im Keller ist. Auch sollen künftig alle Hausgeräte miteinander kommunizieren können. Die Waschmaschine könnte dem Trockner zum Beispiel Informationen über die aktuelle Waschladung schicken, damit der seine Programme entsprechend voreinstellt – „pflegeleicht“ oder „Synthetik“. Smartmeter und Smarthome machen zudem die Kommunikation mit dem Stromnetz möglich. Damit lassen sich die Waschmaschine oder auch die Spülmaschine nach dem aktuellen Strompreis steuern. Ist der Preis niedrig, schalten sie sich automatisch ein. Und sofern auf dem Dach eine Photovoltaikanlage installiert ist, kann das Smartmeter die Geräte anschalten, wenn die Sonne scheint.

Das Beispiel der Waschmaschine macht klar, wie viele Systeme in einigen Jahren selbst bei einer scheinbar simplen Alltagsanwendung zusammenwirken werden. Künftig dürften noch viele weitere Funktionalitäten hinzukommen. Das Smarthome und das Smartmeter machen die eigenen vier Wände zu einem System of Systems, in dem Gerätetechnik, Kommunikationssysteme und das Stromnetz dynamisch interagieren. Die erfolgreiche Entwicklung entsprechender technischer Lösungen wird daher künftig das Advanced Systems Engineering zwingend erfordern.

Erschwerend kommt hinzu, dass Technologien heute sehr dynamisch neu- und weiterentwickelt werden. Es wäre teuer und nicht nachhaltig, Elektrogeräte wie zum Beispiel eine Waschmaschine nach wenigen Jahren wegzuwerfen und durch neue zu ersetzen, die dem neuesten Smarthome-Standard entsprechen. Die Hersteller müssen also dafür sorgen, dass man eine Waschmaschine über viele Jahre auf dem neuesten Stand halten kann – etwa indem von vornherein Schnittstellen für neue Funktionalitäten oder neue Software-Standards vorgesehen werden. Durch das Advanced Systems Engineering lassen sich die künftigen Bedarfe und die benötigten Technologien sicher abschätzen, weil es ein Produkt von Anfang an als holistisches Gesamtsystem betrachtet. Hilfreich sind hier Methoden wie die Produktgenerationsentwicklung, die bei der Entwicklung einer technischen Lösung nicht nur die nächste Produktgeneration im Blick hat, sondern auch künftige Generationen. Angesichts der schnellen Entwicklung beim Smarthome sollten Hersteller solche Aspekte künftig stärker berücksichtigen, wenn sie ihrer Kundenschaft auch weiterhin langlebige Produkte verkaufen möchten.

Advanced Systems Engineering ist die Methodik, Systeme so zu entwerfen, dass sie miteinander kommunizieren können.

Das schlaue Haus von morgen

Im Smarthome der Zukunft sollen alle Geräte über das Smartmeter miteinander verbunden sein. Alle Hausgeräte sollen miteinander kommunizieren können. Das Smarthome und das Smartmeter machen die eigenen vier Wände zu einem System of Systems, in dem Gerätetechnik, Kommunikationssysteme und das Stromnetz dynamisch interagieren. Die Entwicklung entsprechender technischer Lösungen wird daher künftig nur mehr mit ASE möglich sein.

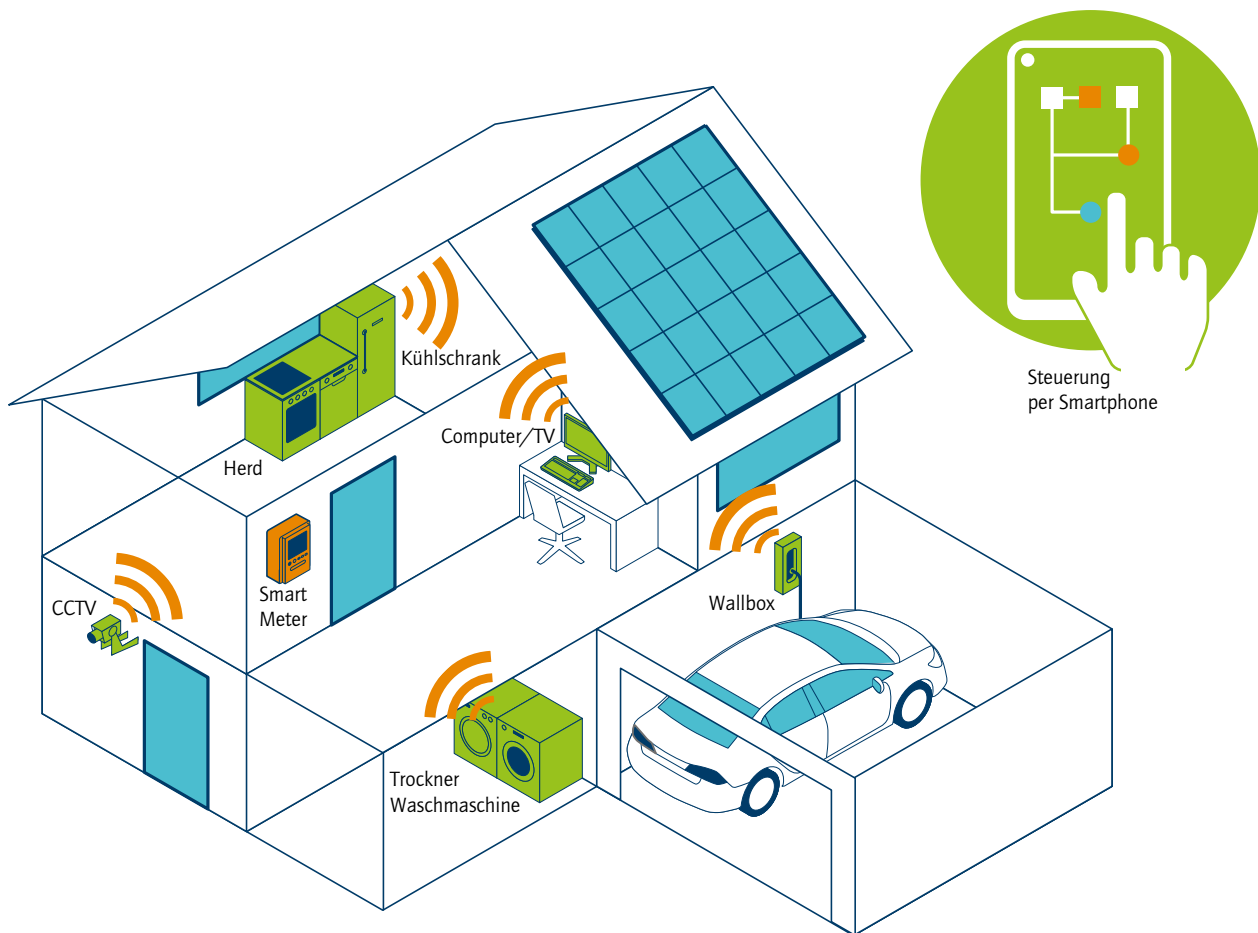


Abbildung 4: Beispielhafte Darstellung eines Smarthome mit mehreren miteinander vernetzten Geräten (Quelle: eigene Darstellung)



2.2 Autonomes Fahren mit Advanced Systems Engineering

Deutschland im Jahr 2050: Autos, Lastwagen und Busse fahren überwiegend elektrisch und autonom. Die Fahrzeuge sind mit Kameras, Sensoren und intelligenter Software ausgestattet, mit denen sie in Bruchteilen von Sekunden Hindernisse erkennen und entsprechend reagieren und ausweichen können. Außerdem kommunizieren die Fahrzeuge über spontan geknüpfte Kommunikationsnetze miteinander – so genannte Ad-hoc-Netzwerke, die sich dynamisch zwischen Fahrzeugen bilden. So können sich die Autos gegenseitig vor Unfällen warnen, die unsichtbar hinter einer Kurve oder im Nebel liegen. Auch können sich Lastwagen auf der Autobahn dynamisch zu Konvois zusammenschließen und dann ähnlich wie die Bahn in einem „Zug“ energiesparend hintereinander herfahren. Zudem könnte sich der Konvoi abstimmen, um andere Autofahrer sicher ein- und ausscheren zu lassen. Natürlich haben die Fahrzeuge über Mobilfunk auch Kontakt zu digitalen Verkehrszeichen und den Verkehrszentralen, die permanent Informationen liefern – zum Beispiel über plötzlich auftretende Stockungen und Staus oder Geschwindigkeitsbeschränkungen. So werden Unfälle vermieden. Die Sicherheit im Verkehr nimmt drastisch zu.

Das Beispiel des autonomen Fahrens verdeutlicht einmal mehr, wie verschiedene Systeme ineinandergreifen und auch, dass die künftigen Systeme in der Lage sein müssen, dynamisch auf Veränderungen der Umgebung zu reagieren und sich selbst zu optimieren. Natürlich sind Autos bereits seit mehr als zwanzig Jahren mit Systemen ausgestattet, die dynamisch auf Veränderungen reagieren können – etwa mit dem Elektronischen Stabilitätsprogramm (ESP), das das Schlingern des Fahrzeugs

verhindert. Doch handelt es sich hier um einzelne Systeme, die für sich allein das Fahrverhalten beeinflussen. Beim autonomen Fahren hat man es jedoch mit einem soziotechnischen System of Systems zu tun, das Mensch und Technik auf besonders komplexe Weise verbindet. Bei einem Gewitterschauer zum Beispiel muss ein solcher „Autopilot“ noch deutlich mehr Aspekte berücksichtigen als beim normalen Fahren: Er muss die Geschwindigkeit und das Bremsen der nassen Fahrbahn anpassen. Er muss mit Aquaplaning rechnen. Er muss beim Überholen umsichtiger sein. Vor allem aber muss er sich bewusst sein, dass sich das Verhalten der anderen Verkehrsteilnehmenden plötzlich ändert. Eine technische Herausforderung ist hier vor allem, das Verhalten der nicht automatisierten Verkehrsteilnehmenden einzuschätzen – also von Fußgängerinnen und Fußgängern oder Radfahrerinnen und Radfahrern, aber auch von Fahrzeugen, die noch von Menschen gefahren werden. Fachleute gehen davon aus, dass Fahrzeuge auf den Autobahnen schon in wenigen Jahren auf übersichtlichen Strecken das Steuern übernehmen werden. In unübersichtlichen Bereichen wie etwa Baustellen und vor allem im normalen Straßenverkehr werden Autos aber voraussichtlich erst in einigen Jahrzehnten automatisiert navigieren können. Das liegt auch daran, dass man die Komplexität dieser Systems of Systems mit den heutigen Entwicklungswerkzeugen nicht erfassen kann. Dafür bedarf es des Advanced Systems Engineering. Um Unfälle zu vermeiden, muss das autonome Fahren extrem sicher und widerstandsfähig gegen Störungen sein. Eine Voraussetzung dafür ist, dass die Fahrzeuge einander verstehen und aufeinander reagieren. Zudem müssen auch Fußgänger und Radfahrer sowie nicht autonome Fahrzeuge berücksichtigt und in den Systemen technisch beschrieben werden. Mit den künftigen Methoden des Advanced Systems Engineering werden sich diese Ziele von den Menschen in der Produkt- und Produktionssystementwicklung deutlich besser realisieren lassen.

Autonomes Fahren mit Advanced Systems Engineering

Privattaxis und Minibusse werden in Großstädten immer beliebter, weil sie flexibler als Stadtbusse, Straßen- und U-Bahnen sind. Man kann sie an die eigene Haustür bestellen und sich direkt ans Ziel fahren lassen. Künftig sollen Privattaxis und Minibusse autonom durch die Innenstädte fahren. Das Konzept des autonomen, städtischen Privattaxis oder Minibusses ist ein System of Systems (SoS), in dem viele Technologien zusammenwirken. Die Menschen werden dieses System nur nutzen, wenn sie ihm vertrauen. Auch hier bietet das ASE die Chance, durch seinen holistischen Ansatz und die gemeinsame Sprache von Technikerinnen und Technikern und beispielsweise Juristinnen und Juristen schneller zu einer sicheren Lösung und einem sicheren SoS zu kommen.



Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung eines vernetzten Verkehrssystems (Quelle: eigene Darstellung)



Sicher unterwegs mit Advanced Systems Engineering

Privattaxis und Minibusse werden in Großstädten immer beliebter, weil sie flexibler als Stadtbusse, Straßen- und U-Bahnen sind. Man kann sie an die eigene Haustür bestellen und sich direkt ans Ziel fahren lassen. Künftig sollen Privattaxis und Minibusse autonom durch die Innenstädte fahren. In einigen deutschen Städten werden bereits in beschränktem Rahmen fahrerlose Kleinbusse getestet, die künftig das Bus- und Bahnangebot ergänzen sollen. Wie beschrieben ist auch das Konzept des autonomen, städtischen Privattaxis oder Minibusses ein System of Systems, in dem viele Technologien zusammenwirken. Die Menschen werden dieses System nur nutzen, wenn sie ihm vertrauen. Dabei hat der Aspekt Sicherheit mehrere Facetten, die bei der Entwicklung des System of Systems berücksichtigt werden müssen. So stellt sich beispielsweise die Frage, wer haftet, wenn ein Unfall geschieht – der Hersteller des Fahrzeugs, das Taxiunternehmen oder der Zulieferer, der das Abstandsradar geliefert hat? Diese juristischen Aspekte müssen bei der Entwicklung des System of Systems bedacht sein. Das Advanced Systems Engineering erlaubt es, all diese Dinge zu berücksichtigen und in den technischen Modellen zu beschreiben.³

Für die Entwicklerinnen und Entwickler besteht eine besondere Herausforderung darin, ein System so sicher zu machen, dass es in jeder Situation richtig reagiert. Ein Unfall oder ein Ausfall müssen unbedingt vermieden werden, wenn die Kundinnen und Kunden dem System vertrauen sollen. Aus diesem Grund werden technische Systeme heutzutage bei der Entwicklung regelmäßig validiert und verifiziert. Im Zuge der Validierung wird

überprüft, ob das Produkt tatsächlich die Erwartungen der Kundschaft erfüllt. Für ein autonomes Taxi hieße das: Dieses muss eine Person tatsächlich sicher und komfortabel von A nach B transportieren. Bei der Verifikation wiederum wird getestet, ob das Fahrzeug so konstruiert wurde, dass es bestimmte Randbedingungen erfüllt: Arbeitet zum Beispiel die Software, die den Airbag-Sensor steuert, schnell genug? Das Problem besteht darin, dass es nicht möglich ist, alle denkbaren Alltagszenarien im menschengeprägten Straßenverkehr durchzuspielen und vorab zu testen. Hier stößt das herkömmliche System Engineering an seine Grenzen. Und auch hier bietet das Advanced Systems Engineering die Chance, durch seinen holistischen Ansatz und die gemeinsame Sprache von Technikerinnen und Technikern oder auch Juristinnen und Juristen schneller zu einer sicheren Lösung und einem sicheren System of Systems zu kommen. Das Vertrauen der Kundinnen und Kunden ist ein entscheidender Faktor, wenn es darum geht, dass sich eine Technik im Markt etabliert. Läuft auch nur eine Kleinigkeit schief, sinkt die Akzeptanz der Kundschaft. Insofern werden sich autonome Systeme nur durchsetzen, wenn die meisten Menschen die Technologie akzeptieren. Nur wenn alle beteiligten Entwickler perfekt miteinander kommunizieren, wird es gelingen, den Kundinnen und Kunden ein Gefühl von Sicherheit zu vermitteln. Advanced Systems Engineering kann erheblich dazu beitragen. Ein Kernelement von Advanced Systems Engineering ist, Verlässlichkeit ganzheitlich umzusetzen, wenn es um die Gestaltung komplexer technischer Systeme geht. Das setzt Eigenschaften wie Sicherheit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Vertrauen voraus, die besonders in der hochvernetzten digitalen Welt der Systems of Systems von zentraler Bedeutung sind.

3 | Vgl. KIT Mobility Systems Center 2017.

2.3 Lieferketten transparent gestalten

Ohne Computerchips geht heute nichts mehr. Sie sind in Autos, Smartphones und Industrierobotern verbaut. Lieferengpässe infolge von Covid-19 haben in den letzten zwei Jahren dazu geführt, dass die Fertigung vielerorts gedrosselt oder sogar gestoppt werden musste, vor allem in der Automobilbranche: So wurden allein im Januar 2021 rund 15 Prozent⁴ weniger Fahrzeuge produziert als im Vorjahr zur gleichen Zeit – bei fast unverändert hoher Nachfrage. Das Beispiel der winzigen Chips zeigt, wie leicht sich das engmaschige, auf Effizienz getrimmte Netz globaler Lieferketten lösen kann.

Im Grunde kann man die globalen Wertschöpfungsketten als riesiges System of Systems betrachten. Fällt ein Glied der Kette aus, sind alle folgenden Glieder betroffen. Ein Smartphone besteht aus vielen verschiedenen Komponenten, die von einer Vielzahl unterschiedlicher Zulieferfirmen aus aller Welt hergestellt werden. Tritt bei einem wichtigen Zulieferer eine Störung auf, funktioniert das ganze Produktionssystem nicht mehr. Um solche Situationen zu vermeiden, ist es für Unternehmen essenziell, ihre ganze Lieferkette im Blick zu haben. Das ist eine Herausforderung, weil der Zulieferer seinerseits von Zulieferern versorgt wird. Um im Bild des Systems zu bleiben: An jedem Kettenglied hängt ein weiteres, autonom agierendes System – ein anderes Unternehmen mit eigener Produktionsweise und eigener Lieferkette. Die globale Wertschöpfungskette wird so schnell zu einem besonders unübersichtlichen System of Systems (SoS).

Ein Autohersteller muss möglicherweise nicht nur den Mikrochipmarkt im Blick behalten, sondern auch dessen Lieferkette, die bis zu den Rohstoffen reicht. Jeder blinde Fleck in der Lieferkette birgt die Gefahr, dass die Kette hier unerwartet reißt. Advanced Systems Engineering kann dabei helfen, die blinden Flecken zu identifizieren. Dank des holistischen Ansatzes lassen sich die vielen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Wertschöpfungsstufen beschreiben und in einem allgemeinverständlichen Modell darstellen. An der global vernetzten Produktion und dem Warentransport sind viele Akteure beteiligt. Die gemeinsame Sprache bietet erstmals die

Transparenz, die es braucht, um das globale Netz in seiner ganzen Komplexität zu erfassen. Letztlich wird es dadurch möglich, an jedem Glied der Lieferkette alle wichtigen Informationen zu sammeln und sich darüber auszutauschen – über alle Glieder der Kette hinweg, sowohl unternehmensintern als auch -extern, zwischen Partnerinnen und Partnern, Fachkolleginnen und Fachkollegen, aber auch Expertinnen und Experten verschiedener Fachgebiete, zwischen Juristinnen und Juristen, Ethikerinnen und Ethikern, Controllerinnen und Controllern, Logistikerinnen und Logistikern, Risikomanagerinnen und Risikomanagern oder Einkäuferinnen und Einkäufern. Alles in allem bietet das Advanced Systems Engineering mit seinen Potenzialen zur transparenten Modellbildung und der interdisziplinären Vernetzung der Menschen in den komplexen Wertschöpfungsprozessen die Chance, jederzeit zu wissen, was wo und wann passiert. Damit kann Advanced Systems Engineering auch dabei helfen, das neue Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz der Bundesregierung umzusetzen.⁵ Laut Gesetz müssen deutsche Unternehmen künftig sicherstellen, dass in allen Zulieferbetrieben entlang der Produktionskette Menschen unter fairen Bedingungen arbeiten.

Safety und Security

Bei technischen und informatorischen Systemen sind mit dem Begriff Sicherheit häufig zwei verschiedene Aspekte gemeint, die im Englischen als Safety und Security bezeichnet werden: Mit Safety ist die Betriebssicherheit gemeint, was bedeutet, dass eine technische Lösung so sicher ist, dass Mensch und Umwelt vor einem Schaden geschützt sind. Der Begriff Security hingegen fokussiert Maßnahmen und Technologien, die eingesetzt werden, um Systeme vor verschiedenen Arten von Bedrohungen und Angriffen zu schützen und die Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit von Daten sicherzustellen. Dazu gehören die Datensicherheit, die Sicherheit von Software und digitaler Infrastrukturen. So ist häufig auch von Cyber-Security die Rede. Die Security nutzt unter anderem Verschlüsselungstechnologien und Authentifizierungsmethoden, um informatische Systeme vor Angriffen zu schützen.

4 | Statistisches Bundesamt 2021.

5 | Vgl. Gesetz über die Unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten 2021.



Lieferketten transparent gestalten

Ohne Computerchips geht heute nichts mehr. Sie sind in Autos, Smartphones und Industrierobotern verbaut. Lieferengpässe führen dazu, dass die Fertigung vielerorts gedrosselt oder sogar gestoppt werden muss. Die globale Wertschöpfungskette kann man als System of Systems betrachten. Jeder Ausfall in der Lieferkette birgt die Gefahr, dass die gesamte Kette reißt. ASE kann hier helfen: Dank des holistischen Ansatzes lassen sich die vielen Abhängigkeiten zwischen den verschiedenen Wertschöpfungsstufen beschreiben und in einem allgemeinverständlichen Modell darstellen.

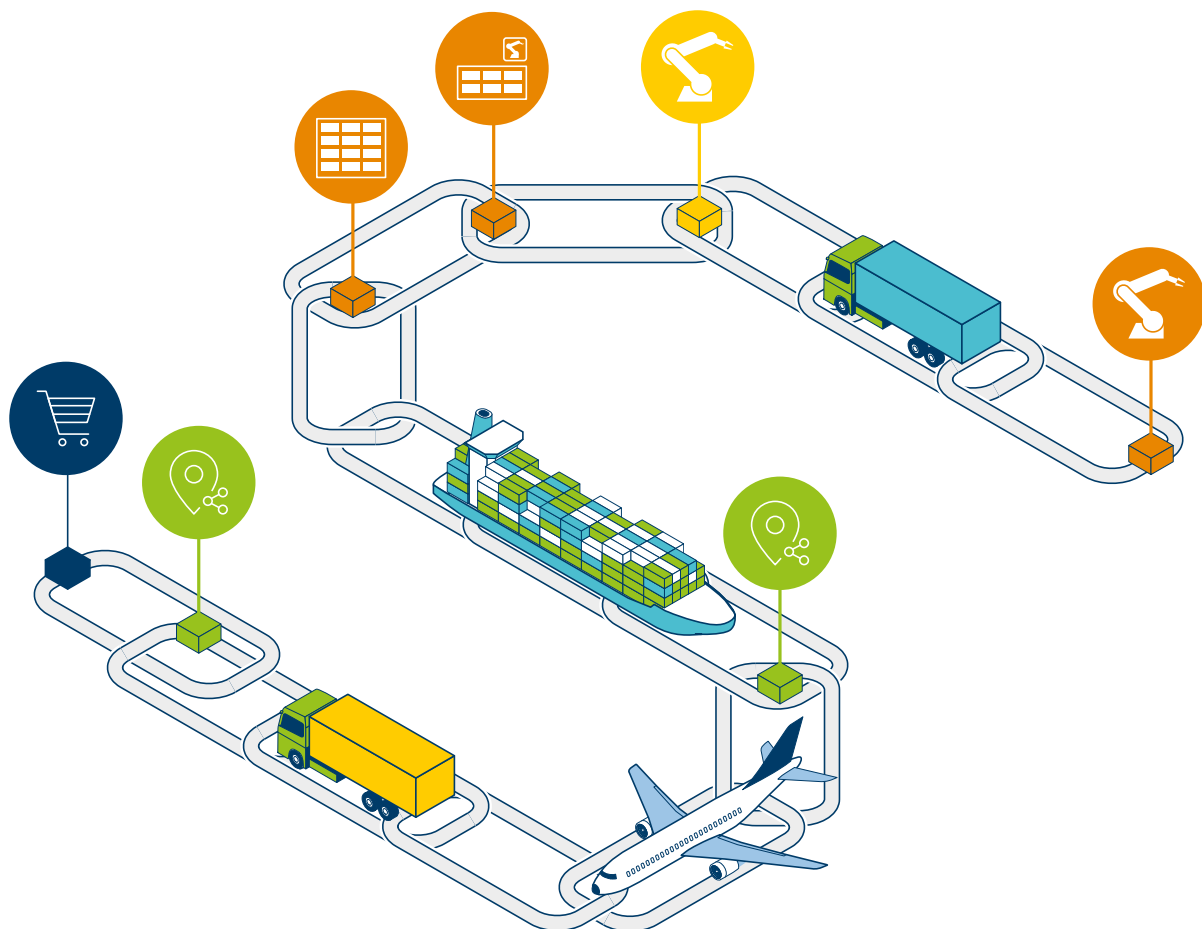


Abbildung 6: Globale Vernetzung über Lieferketten (Quelle: eigene Darstellung)

2.4 Nachhaltige Energieversorgung mit Advanced Systems Engineering

Angesichts des Klimawandels und der zuletzt stark gestiegenen Preise für Erdgas und Erdöl gewinnen die erneuerbaren Energien weiter an Bedeutung. In Deutschland haben die erneuerbaren Energien bereits einen Anteil von mehr als vierzig Prozent⁶ an der Stromproduktion, weil immer mehr Windparks und Photovoltaikanlagen ihren Strom in das Netz einspeisen. Ein wichtiger Grund dafür ist, dass Photovoltaikanlagen in den vergangenen Jahren immer preisgünstiger geworden sind, sodass immer mehr Eigenheimbesitzer eine Anlage finanzieren können. Das bringt Herausforderungen mit sich:

Durch die vielen Haushalte, die Strom aus ihren Solaranlagen einspeisen, und auch durch die wachsende Zahl an Elektroautos, die den Verbrauch einer Wohnsiedlung multiplizieren, kommt in den nächsten Jahren mehr Bewegung denn je ins Stromnetz. Wenn in einer Siedlung künftig viele Leute nach Feierabend ihr Elektroauto an die Steckdose anschließen, werden die kleinen Ortsnetztrafos schnell überlastet. Hinzu kommt, dass sich das Stromangebot mit dem Wetter ständig ändert. An sonnigen Tagen produzieren die Anlagen mehr als benötigt wird. An regnerischen Tagen liefern sie nicht genug Strom. Daher werden Photovoltaikanlagen seit geraumer Zeit mit Stromspeichern kombiniert.

Um Produktion, Verbrauch und Speicherung in Einklang zu bringen, müssen die kleinen Verteilnetze in den Städten und

Stadtteilen intelligenter werden. Das lässt sich nur durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz erreichen, weil die Stromeinspeisung aus etlichen Anlagen, die Speicherung und der Verbrauch aufeinander abgestimmt und mit dem gesamten Stromnetz harmonisiert werden müssen. Das Advanced Systems Engineering kann hier helfen. Ein Beispiel sind regionale Solarstrom-Erzeugergemeinschaften, deren Mitglieder sich gegenseitig Solarstrom und Speicherkapazität zur Verfügung stellen, wenn sie diese selbst nicht brauchen. Darüber hinaus ist die Erzeugergemeinschaft an das Stromnetz angebunden und kann damit überregional aktiv werden. In Summe können die vielen kleinen Photovoltaikanlagen relevante Mengen an Strom bereitstellen. Bei einem Überangebot an Strom im Netz werden hingegen die Speicher genutzt. Die Erzeugergemeinschaft fungiert damit als kleines Kraftwerk. Advanced Systems Engineering ist ein entscheidender Faktor, um künftig solche flexiblen Systems of Systems zu gestalten. Denn damit lassen sich die vielen verschiedenen Elemente eines intelligenten Stromnetzes, des sogenannten Smart Grids, miteinander verknüpfen und in einem Modell beschreiben – die Stromproduktion und -speicherung in vielen kleinen Anlagen, der Handel zwischen den Mitgliedern der Erzeugergemeinschaft und die Kommunikation mit dem überregionalen Stromnetz. Die eigentliche Herausforderung besteht darin, die großen Datenmengen zu bewältigen, die zwischen den vielen Erzeugerinnen und Erzeugern sowie Verbraucherinnen und Verbrauchern ausgetauscht werden müssen. Dazu gehört, einheitliche Schnittstellen zu schaffen, damit die Informationen ungehindert fließen können. Solche Datensysteme sind so komplex, dass ihre Gestaltung und Realisierung künftig ohne Advanced Systems Engineering kaum noch zu bewältigen sein wird.⁷

Wir können die Herausforderungen der Klimakrise nur mit technischen Lösungen meistern. Und diese werden wir zukünftig nachhaltig und verlässlich mit Advanced Systems Engineering gestalten.

6 | Statistisches Bundesamt 2022.

7 | Vgl. Fehrenbach 2019.



System of Systems – das Stromnetz der Zukunft

Das klassische Stromnetz wandelt sich langsam zu einem intelligenten Stromnetz. Viele für sich automatisch entscheidende Systeme wechselwirken in diesem Stromnetz der Zukunft auf komplexe und dynamische Weise – ein typisches „System of Systems“.

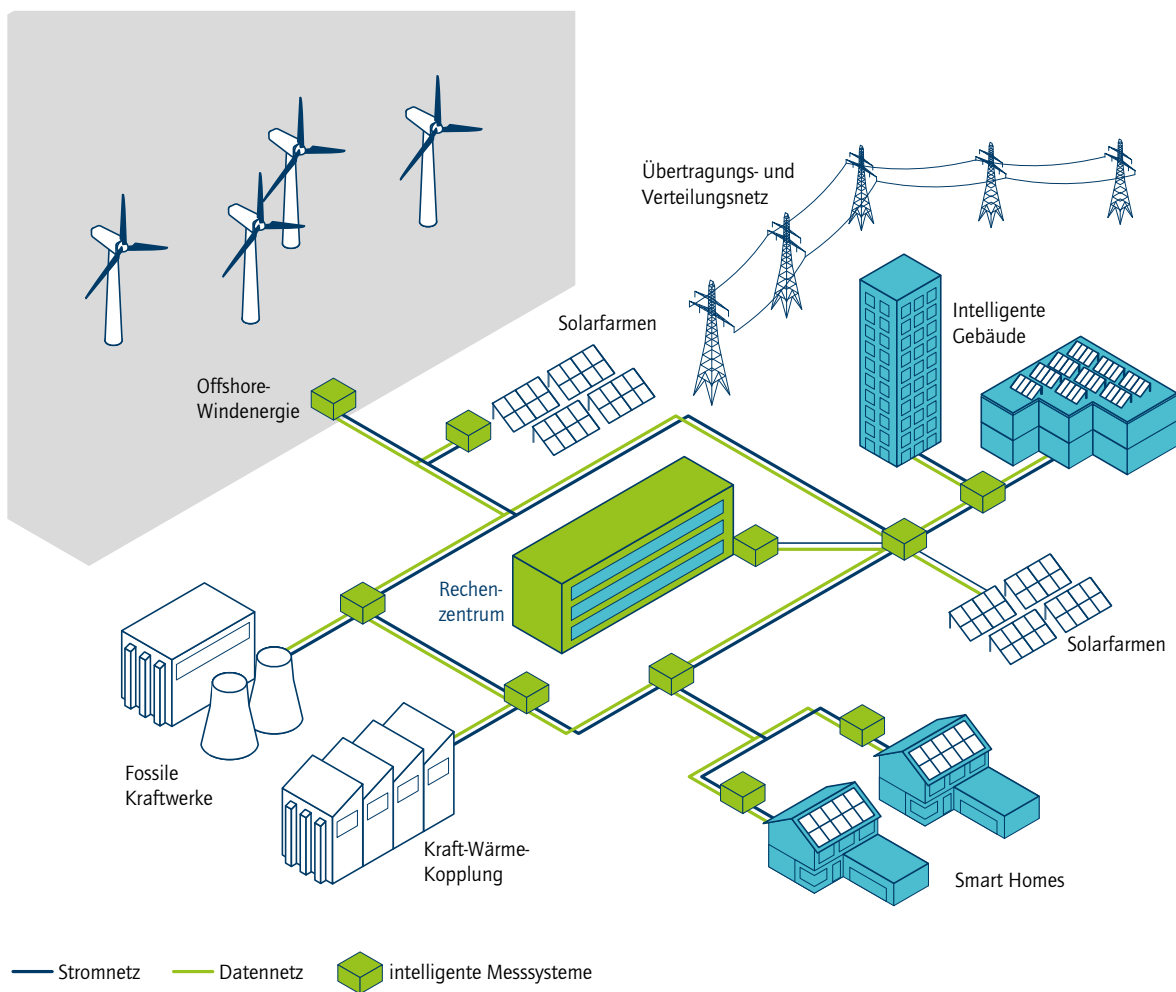


Abbildung 7: Darstellung eines modernen intelligenten Stromnetzes als System of Systems (Quelle: eigene Darstellung)

3 Der globale Blick auf Advanced Systems Engineering

Die Gestaltung von innovativen Produkten und Geschäftsmodellen vor allem in komplexen Systems of Systems wird immer wichtiger. Daher stellt sich die Frage, wie gut Deutschland hier im globalen Wettbewerb aufgestellt ist. Eine Analyse zeigt, dass Deutschland im Vergleich mit anderen Nationen recht gut dasteht, aber auch, dass es teils noch deutlichen Nachholbedarf gibt.⁸

Die Grundlage der deutschen Innovationskraft sind Forschung und Entwicklung. Dank ihnen gehört Deutschland weltweit zu den Innovationsführern. Die einheimischen Unternehmen sind dabei gerade in Deutschland bestens mit der Wissenschaft vernetzt und profitieren von dieser besonderen Art der anwendungsnahen Forschung mit den Hochschulen. Gleichzeitig sind die Unternehmen auch international mit anderen Volkswirtschaften in Lieferantennetzwerken und Entwicklungspartnerschaften vernetzt. Zu den Technologieführern weltweit gehören seit vielen Jahren neben Deutschland die USA, Japan und Großbritannien. Doch diese Situation verändert sich. Mittlerweile sind Länder wie Südkorea, Singapur oder China starke und innovative Wettbewerber. Das macht ihr zunehmender Erfolg bei Technologien wie der Elektromobilität oder der Künstlichen Intelligenz deutlich, die stark durch die Forschung getrieben sind.

Eine große Rolle bei der Entwicklung solcher anspruchsvollen neuen Technologien spielt das Systems Engineering. Die Industrienationen haben das Systems Engineering als Schlüsselkompetenz im Wettlauf um die Zukunft erkannt. Betrachtet man hier die Veröffentlichungszahlen als Kennzahl der Relevanz in der Forschung, dann sind die USA, China und Deutschland die führenden Akteure. Alle drei haben die Forschungsaktivitäten zwischen 2012 und 2018 deutlich intensiviert. Die Wachstumsraten der Veröffentlichungszahlen zeigen, dass Deutschland mit einem jährlichen Zuwachs von acht Prozent die Forschung auf dem Gebiet des Systems Engineering im Vergleich zu den USA mit vier Prozent pro Jahr deutlich schneller ausbaut. China erhöht die Veröffentlichungen jedes Jahr um 33 Prozent – eine beeindruckende Zahl. Allerdings bezieht sich Systems Engineering in China weniger auf den holistischen, systematischen Ansatz, wie er in Deutschland praktiziert

wird, als vielmehr auf einen Teilbereich der Steuerungs- und Automatisierungstechnik. Direkte Vergleiche zwischen China, Deutschland und den USA sind daher schwierig. Fest steht, dass der holistische ASE-Ansatz, wie er hier beschrieben wird, in China noch nicht im Fokus steht, womit sich der Eindruck von der Dominanz des Landes relativiert. Im Hinblick auf Deutschland gilt jedoch das Ziel, mit enormen Anstrengungen im Bereich der ASE-Forschung die Position weiter auszubauen und so ein solides Methodenfundament für unsere Unternehmen zu schaffen, mit dem sie auch in der Zukunft im globalen Wettbewerb erfolgreich sein können.

Auch im europäischen Vergleich ist Deutschland Vorreiter bei der Forschung auf dem Gebiet von Systems Engineering. Die treibende Kraft dafür ist die enge Verknüpfung von Wissenschaft und Industrie in der universitären Forschung und der angewandten Forschung, wie sie zum Beispiel in der Fraunhofer-Gesellschaft vorherrscht. Hinzu kommen Institutionen der Grundlagenforschung wie die Max-Planck-Gesellschaft oder auch die Helmholtz-Gemeinschaft.

Im Bereich der Forschung an Methoden und Prozessen für die Gestaltung komplexer Cyber-Physikalischer Systeme (CPS) wie des autonomen Fahrzeugs oder des vernetzten Roboters aus der Produktion als Kernbestandteil des Advanced Systems Engineering zeigt sich übergreifend, dass die deutsche Forschung bei den Veröffentlichungen zu den Themen Digitaler Zwilling und PLM in absoluten Zahlen gleichauf mit den USA und China liegt. Allerdings fällt die deutsche Forschung bezüglich der Themen Agilität im Engineering, Kreativität im Engineering und Künstliche Intelligenz im Engineering teils deutlich hinter den USA und China zurück.

Eine niedrigere Anzahl von Publikationen zu den Themen Kreativität oder Agilität im Engineering bedeutet natürlich nicht automatisch, dass deutsche Ingenieurinnen und Ingenieure weniger kreativ und agil seien. Ganz im Gegenteil, sie gehören zu den kreativsten Kräften ihrer Berufsgruppe weltweit und meldeten 2021 erneut weltweit die zweitmeisten Patente an. Die Zahlen sprechen jedoch auch für einen äußerst starken Fokus der USA und China auf die Themenbereiche Agilität, Künstliche Intelligenz und Kreativität im Engineering. Hier muss unbedingt durch eine gesteigerte Forschung und deren Umsetzung in der Praxis in Deutschland ein Beitrag zur zukünftigen Sicherung unserer Wettbewerbsfähigkeit geleistet werden.

8 | Vgl. Dumitrescu et al. 2021.



Advanced Systems Engineering wird die heutigen Lösungsansätze noch deutlich weitertreiben. Die Lektion aus dem internationalen Vergleich lautet, dass vor allem in Sachen Künstliche Intelligenz und Agilität Innovations- und Nachholungsbedarf besteht. Auch wenn Advanced Systems Engineering eine technologische Herausforderung darstellt, birgt es zugleich eine enorme Chance für Deutschland, das ja schon früh die strategische Bedeutung einer systemischen ganzheitlichen Betrachtung erkannt hat. Um die technologische Führungsrolle und die Positionen unserer Wirtschaft auf den globalen Märkten der Zukunft zu sichern oder sogar auszubauen und so auch Arbeitsplätze zu erhalten, sind weitere Investitionen in Forschung und Entwicklung im Bereich Advanced Systems Engineering zwingend notwendig. Nur so kann Advanced Systems Engineering zum Rückgrat zukünftiger Wertschöpfung werden.

Wie die wachsende Publikations- und Forschungsintensität in den anderen Ländern zeigen, ist das Zeitfenster hierfür allerdings eng. Inzwischen haben auch unsere globalen Wettbewerber die Bedeutung der ganzheitlichen Gestaltung komplexer technischer Systeme für ihre zukünftige Wertschöpfung erkannt. Längst haben sie ihre Forschung auf diesem Gebiet stark intensiviert. Deutschland befindet sich aufgrund der intensiven, weltweit führenden Vernetzung von Wissenschaft und Industrie sowie der frühen Fokussierung auf die Herausforderungen der Gestaltung komplexer Cyber-Physikalischer Systeme in einer hervorragenden Ausgangsposition. Jetzt ist es aber an der Zeit, zu handeln, zu forschen und in Advanced Systems Engineering zu investieren.

4 Der Weg in die ASE-Welt

Wie erwähnt gibt es heute noch keinen fertigen Werkzeugkasten an ASE-Methoden und -Anwendungen. Insofern stellt sich die Frage, was es braucht, damit aus der Theorie Praxis wird. Da Advanced Systems Engineering auf einem interdisziplinären Ansatz basiert, liegt es auf der Hand, dass Advanced Systems Engineering nur als großes nationales Gemeinschaftsprojekt ausgewiesener Forschungsinstitutionen auf allen relevanten Gebieten zusammen mit den Unternehmen gelingen kann. Der Weg in die ASE-Welt beruht auf einer Strategie, die in sechs Handlungsbedarfe mündet.⁹ Hier muss der Hebel angesetzt werden, um die Zukunft unserer Arbeitsplätze, aber auch unseres Wohlstandes zu sichern.

1. **Strategiekompetenz stärken.** Unternehmen müssen in der Lage sein, ihr Geschäftsmodell von der Entwicklung bis zum Einsatz bei der Kundin oder dem Kunden strategisch zu planen. Hier fehlt es vor allem kleinen und mittelständischen Unternehmen oft an Know-how. Das bedeutet zum einen, den Blick nach außen zu richten, Entwicklungen im Umfeld frühzeitig zu erkennen und diese in Bezug auf das eigene Geschäftsmodell einzuordnen. Zum anderen bedeutet es, den Blick nach innen zu richten, um die eigenen Kompetenzen und Defizite realistisch einzuschätzen und Mängel zu beseitigen. Das ist die Grundlage für strategische Planung.
2. **ASE-Plattform – die Vielfalt der Aktivitäten orchestrieren.** Advanced Systems Engineering ist eine Gemeinschaftsaufgabe. Diese gelingt nur, wenn alle Beteiligten aus den verschiedenen Fachgebieten ihre Maßnahmen koordinieren. Dafür sollte eine nationale ASE-Plattform geschaffen werden, die alle Beteiligten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Zivilgesellschaft zusammenbringt. Das Ziel muss sein, unter dem Schlagwort „German Engineering“ das Advanced Systems Engineering als weltweit anerkannten Standard bei der Ingenieurausbildung, in der Systemsprache der Gestaltung von CPS und bei der Entwicklung von Methoden zu etablieren. Aufgabe der nationalen Plattform ist es auch, die globale Entwicklung im Blick zu haben und zu antizipieren.
3. **Methodeninnovationen voranbringen.** Getreu dem ASE-Ansatz müssen Systeme und Systems of Systems künftig methodisch grundlegend anders geplant werden. Das

bedeutet, Hardware, Software und das Umfeld immer als Einheit zu betrachten. Die Systeme und insbesondere die Software sind so zu planen, dass sie sich jederzeit an neue Anforderungen und technische Entwicklungen anpassen lassen und auch weiterhin korrekt funktionieren. Nur so lassen sich Systeme entwickeln, die den Ansprüchen der Nachhaltigkeit und Verlässlichkeit gerecht werden. Je länger Produkte oder Systeme nutzbar sind, desto nachhaltiger sind sie.

4. **Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft weiter intensivieren.** Neben der Forschung und der Lehre muss der Wissenstransfer als dritte Säule stärker im Hochschulsystem verankert werden. Auch die in Deutschland einzigartige Zusammenarbeit zwischen Industrieforschung und Hochschulforschung muss für die Zukunft weiterentwickelt werden. Als Alleinstellungsmerkmal des Industriestandorts Deutschland ist diese Zusammenarbeit entscheidend für künftige Erfolge. Neue regionale und nationale Spitzencluster können dabei helfen, die Kompetenzen aus der Industrie und den Hochschulen zu bündeln.
5. **Aus- und Weiterbildung stärken.** Die im Vergleich mit den führenden Industrienationen unzureichende Fachkräftebasis in Deutschland ist die Achillesferse im Wettlauf um die Führung bei der Gestaltung künftiger innovativer technischer Lösungen. Zwar gibt es bundesweit durchaus einzelne Initiativen, um junge Menschen für den MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) zu begeistern, an groß angelegten Kampagnen aber fehlt es bislang. Daher bedarf es erheblicher Aus- und Weiterbildungsanstrengungen, um die Chancen Deutschlands im globalen Innovationswettbewerb zu steigern. Dafür muss man auch neue Wege einschlagen. Eine hohe Hebelwirkung auf die Stärkung der Fachkräftebasis haben unter anderem Unternehmenspraktika für Schülerinnen, Schüler und Studierende sowie interdisziplinäre Studiengänge zu ASE-Methoden und -Prozessen. Auch praxisorientierte Projektarbeiten und eine Weiterbildungsoffensive können wesentlich dazu beitragen, dem Fachkräftemangel zu begegnen. Da Advanced Systems Engineering eine Reihe neuer Methoden und neue Denkweisen mit sich bringt, sollten auch die Jahrgänge „fünfzig plus“ bedacht und mobilisiert werden. Advanced Systems Engineering wird sich kontinuierlich dynamisch weiterentwickeln. Dafür ist ein individuelles, lebenslanges Lernen erforderlich, damit Arbeitskräfte auf Dauer fit für die neuen Herausforderungen sind.

9 | Vgl. Gausemeier et al. 2022.



Förderung wichtiger Kompetenzen der Ingenieurinnen und Ingenieure von morgen

Cross-funktionales Denken und Arbeiten stärken

Das System in Advanced Systems Engineering ist ein Synonym für Heterogenität und Komplexität. Verschiedene Disziplinen müssen zusammenarbeiten und nur große Teams werden letztlich Produkte wie Autos oder Flugzeuge bauen können. Cross-funktionales Denken und Arbeiten muss Einzug in die Curricula der Universitäten halten. Dabei ist es nicht sinnvoll, ein „Ingenieursstudium generale“ als allgemeines Ziel vorzugeben – wer von allem etwas weiß, weiß am Ende gar nichts! Zentral ist aber zu vermitteln, dass für eine Domäne eingeführte Konzepte auch in eine andere Domäne übertragbar sein können und dass mit Advanced Systems Engineering genau die Basis gelegt wird, um ein zukünftiges cross-funktionales Denken zu unterstützen. Damit muss ASE-Kompetenz in allen Disziplinen der Technikwissenschaften zur Selbstverständlichkeit werden! Um nur ein Beispiel zu nennen: Gemeinsame interdisziplinäre Projekte, bei denen 3D-Drucker für die Mechanik, FPGAs für die Elektronik und darauf befindliche Prozessoren für die Software einer Systemlösung eingesetzt werden, wären als Praktika mit vertretbarem Aufwand pragmatisch umsetzbar. Das ermöglicht es dann den Studierenden unterschiedlicher Domänen, Advanced Systems Engineering gemeinsam zu lernen, zu praktizieren und zu erleben!

Modellbildungskompetenz als zentrale Grundlage der Systemgestaltung stärken

Das Modell ist das heutige Arbeitstier der Wissenschaft und des Entwickelns technischer Systeme. Dabei, so George Box, sind alle Modelle falsch und nur einige nützlich. Diese grundlegende Erkenntnis, ursprünglich für statistische Modelle formuliert, gilt allgemein für die Wissenschaft. Die Newtonsche Mechanik oder das Bohrsche Atommodell erlauben es, eine Menge von Effekten zu verstehen und darauf aufbauend Systeme zu gestalten. Sie haben aber ihre Grenzen nahe der Lichtgeschwindigkeit und bei Betrachtungen der Atome. Die Modellbildung, die Möglichkeiten und Beschränktheit von Modellen sowie der Zusammenhang mit Statistik und Abstraktion müssen zum Teil der Ausbildung schon in der Schule werden. Sie sollten dann einen zentralen Inhalt des Studiums bilden beziehungsweise an prominenter Stelle in den Lehrplänen platziert sein. Das Wissen über Möglichkeiten und Beschränktheit von Modellen hätte übrigens auch viele Maßnahmen in der Covid-19-Pandemie greifbarer gemacht. Dieses Grundverständnis ist damit nicht nur für Advanced Systems Engineering unverzichtbar, sondern allgemein von gesellschaftlicher Relevanz.

- 6. Neue Arbeitsweisen auf breiter Front einführen.** Advanced Systems Engineering kann nur gelingen, wenn die Beteiligten neue Arbeitsweisen erlernen und praktizieren. Dazu gehören Aspekte wie das agile Arbeiten in flachen Hierarchien und flexiblen, projektorientierten Strukturen. Auf diese Weise können auch neue Geschäftsmodelle in der Plattformökonomie entstehen. Auch auf europäischer Ebene braucht es mehr Kooperation, um gemeinsam die Standards für neue Engineering-Tools zu setzen und global wettbewerbsfähig zu bleiben. Nicht zuletzt gilt es, die digitale Souveränität im Blick zu behalten und europäische Standards im Datenschutz zu setzen.

Deutschland soll auch in Zukunft international eine Spitzenstellung im Engineering von technischen und soziotechnischen Systemen einnehmen. Damit wollen wir den zentralen Herausforderungen unserer Zeit wie Digitalisierung, Energieversorgung, Mobilität und Nachhaltigkeit begegnen und aus dem sich abzeichnenden Umbruch als Gewinner hervorgehen.

Ein Leitbild für Advanced Systems Engineering

Da ASE auf einem interdisziplinären Ansatz basiert, liegt es auf der Hand, dass ASE nur als großes nationales Gemeinschaftsprojekt ausgewiesener Forschungsinstitutionen auf allen relevanten Gebieten eng vernetzt mit den umsetzenden Unternehmen gelingen kann.



Abbildung 8: Leitbild für Advanced Systems Engineering (Quelle: eigene Darstellung)



Den Nachwuchs im MINT-Bereich fördern¹⁰

Der Fachkräftemangel in Deutschland macht sich heute vor allem auch in den technischen Berufen bemerkbar. Daher ist es wichtig, Mädchen und Jungen schon früh an die Technik heranzuführen. Da Frauen in den technischen Berufen bislang unterrepräsentiert sind, kommt es vor allem auch darauf an, Mädchen schon frühzeitig gezielt anzusprechen und für den MINT-Bereich zu begeistern. So hat sich laut dem aktuellen MINT-Nachwuchsbarometer die Fächerwahl bei Jungen und Mädchen in den vergangenen Jahren kaum verändert: „In Physik oder Technik dominieren Jungen. Physik wird als Leistungskurs nur zu 25 Prozent von Mädchen angewählt, eine

MINT-Ausbildung nehmen nur zu 11 Prozent junge Frauen auf, und ein ingenieurwissenschaftliches Studium beginnen nur zu 25 Prozent Studentinnen.“ Diese Unterrepräsentanz von Mädchen und Frauen im MINT-Bereich zieht sich also von der frühkindlichen Bildung über das Studium oder die Ausbildung bis zur Berufswahl durch. Um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken, muss die Aus- und Weiterbildung im MINT-Bereich für Mädchen und Frauen attraktiver gemacht werden. Zudem gilt es, grundsätzlich mehr Menschen für den MINT-Bereich zu begeistern – auch ältere Arbeitnehmer aus anderen Berufen und natürlich auch talentierte Menschen aus anderen Ländern und Regionen. Neben den neuen technischen Ansätzen und Methoden sind dies wichtige Aspekte, um das Advanced Systems Engineering zu fördern.

10 | Vgl. acatech/Körber-Stiftung 2021.

Literatur

Albers et al. 2022

Albers, A. et al.: „Produkt-Produktions-CoDesign – Ein Ansatz zur integrierten Produkt- und Produktionssystementwicklung über Generationen und Lebenszyklen hinweg“. In: *WiGeP-News* (1-2022), 2022. URL: <https://wige.de/wige-news-ausgabe-1-2022/> [Stand: 11.04.2023].

Albers 2021

Albers, A. et al.: *IPEK-INSIDE*, 2021. URL: https://www.ipek.kit.edu/downloads/IPEK_inside_2021.pdf [Stand: 11.04.2023].

acatech/Körper-Stiftung 2021

acatech/Körper-Stiftung: *MINT Nachwuchsbarometer 2021*, München/Hamburg 2021.

Dumitrescu et al. 2021

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

Fehrenbach 2019

Fehrenbach, A.: „Wer braucht schon konventionelle Kraftwerke, wenn er Sonnenenergie und vernetzte Heimspeicher hat?“ In: *1E9*, 2019. URL: <https://1e9.community/t/wer-braucht-konventionelle-kraftwerke-wenn-er-sonnenenergie-und-vernetzte-heimspeicher-hat/2208> [Stand: 28.04.2023].

Gausemeier et al. 2022

Gausemeier, J./Meyer, M./Steglich, S.: *Die Advanced Systems Engineering Strategie. Eine Leitinitiative zur Zukunft des Engineering- und Innovationsstandorts Deutschland*, Paderborn/München 2022.

Bundesgesetzblatt 2021

Bundesgesetzblatt: *Gesetz über die Unternehmerischen Sorgfaltspflichten in Lieferketten* (Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 46 vom 22.07.2021). URL: https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*/%5B@attr_id=%27bgbl121s2959.pdf%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s2959.pdf%27%5D__1646391582861 [Stand: 11.04.2023].

KIT Mobility Systems Center 2017

KIT Mobility Systems Center: *Facing the Challenge of individual Mobility*, 2017. URL: <https://www.mobilitaetssysteme.kit.edu/275.php> [Stand: 11.04.2023].

Statistisches Bundesamt 2021

Statistisches Bundesamt: „Konjunktur zu Jahresanfang 2021: Produktion im zweiten Lockdown bislang robust“ (Pressemitteilung Nr. 130 vom 16.03.2021). URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/03/PD21_130_811.html [Stand: 11.04.2023].

Statistisches Bundesamt 2022

Statistisches Bundesamt: „Stromerzeugung 2021: Anteil konventioneller Energieträger deutlich gestiegen“ (Pressemitteilung Nr. 116 vom 17.03.2022). URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/03/PD22_116_43312.html [Stand: 11.04.2023].



Über acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de.



Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstraße 12
76131 Karlsruhe

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2023

Geschäftsstelle	Hauptstadtbüro	Brüssel-Büro
Karolinenplatz 4	Pariser Platz 4a	Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
80333 München	10117 Berlin	1000 Brüssel Belgien
T +49 (0)89/52 03 09-0	T +49 (0)30/2 06 30 96-0	T +32 (0)2/2 13 81-80
F +49 (0)89/52 03 09-900	F +49 (0)30/2 06 30 96-11	F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de
www.acatech.de

Geschäftsführendes Gremium des Präsidiums: Prof. Dr. Ann-Kristin Achleitner, Prof. Dr. Ursula Gather, Dr. Stefan Oschmann, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Christoph M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Johann-Dietrich Wörner, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier

Empfohlene Zitierweise:

Albers, A. (Hrsg.): *Engineering neu denken und gestalten. Herausforderungen, Anwendungsszenarien und das neue Leitbild Advanced Systems Engineering* (acatech IMPULS), München 2023. DOI: https://doi.org/10.48669/aca_2023-7

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

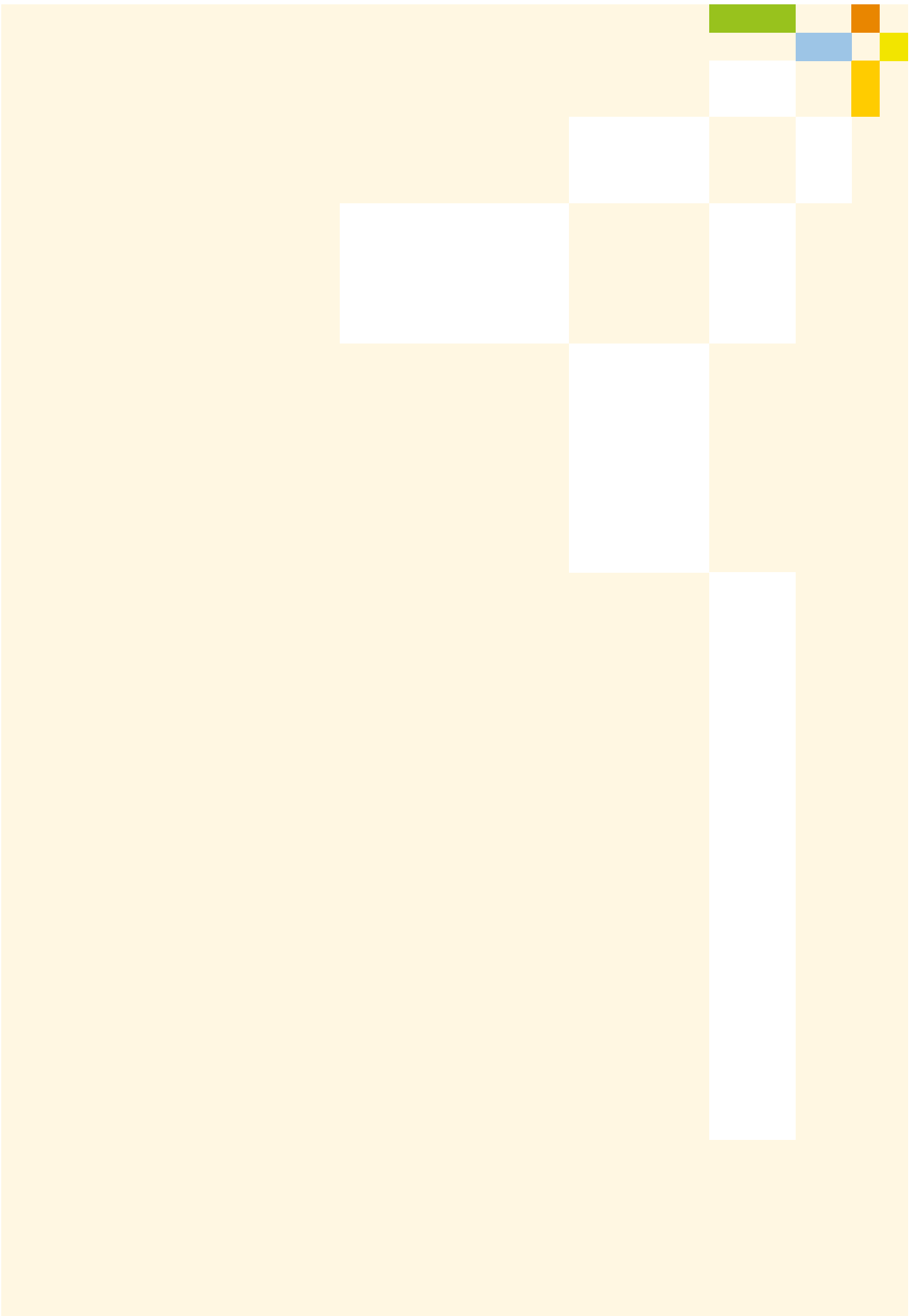
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

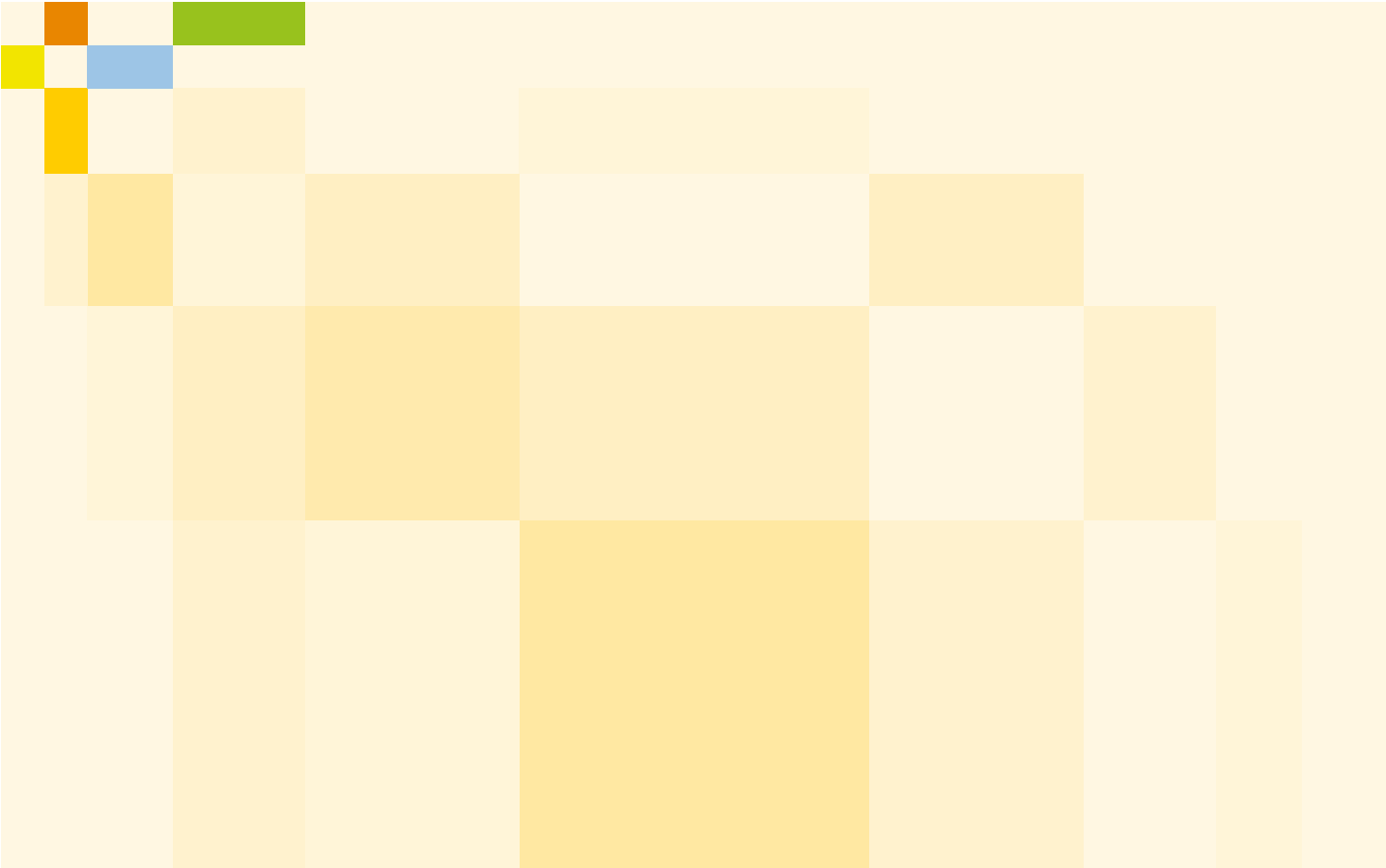
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2023

Koordination: Christina Müller-Markus, Marco Mitrovic
Redaktion: Tim Schröder
Lektorat: Lektorat Berlin
Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg
Titelfoto: ©iStock/gorodenkoff
Konvertierung und Satz: Heilmeyer und Sernau Gestaltung

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.acatech.de.





Autonome Autos, die den Straßen- und Personenverkehr im Blick haben müssen, oder Stromsysteme, in denen sich Tausende von Solaranlagen, Windrädern und Elektroautos miteinander abstimmen – die technische Welt, die uns umgibt, wird immer komplexer und vernetzter. Möglich wird das durch immer leistungsfähigere mechanische Komponenten, Mikroprozessoren und intelligente Software, die über das Internet miteinander und mit Steuerzentralen verbunden sind. Für die Entwicklung derart komplexer Systeme werden künftig immer mehr Expertinnen und Experten aus verschiedenen Disziplinen zusammenarbeiten müssen.

Doch bislang fehlt es dafür an einer gemeinsamen „technischen Sprache“, die alle Disziplinen miteinander verbindet. Das erschwert und verlangsamt die Entwicklung neuer Technologien. Eine Lösung bietet künftig das Advanced Systems Engineering (ASE), dessen Ziel es ist, eine solche gemeinsame Sprache zu entwickeln. Trotz zunehmender Komplexität wird Advanced Systems Engineering künftig für eine klare Kommunikation zwischen Fachleuten verschiedener Disziplinen sorgen – damit sie auch in Zukunft sichere und verlässliche technische Systeme in überschaubarer Zeit entwickeln können.