

# CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

BETREUT VOM



**PTKA**  
Projektträger Karlsruhe  
Karlsruher Institut für Technologie

Die moderne Systementwicklung steht vor den Herausforderungen eines steigenden Softwareanteils, zunehmender Vernetzung von Systemen und verkürzter Produktlebenszyklen. Advanced Systems Engineering (ASE) hat sich als Antwort auf diese Dynamik etabliert und erfordert eine integrative Betrachtung der Aspekte Mensch, Technik und Organisation für moderne Produktentwicklungsprozesse. Das Verbundprojekt CyberTech erforscht die Vision von ASE im soziotechnischen Kontext und erarbeitet Bausteine für Schlüsseltechnologien, Befähigungskonzepte und Einführungsstrategien. Dieser Beitrag skizziert das Leitbild einer ganzheitlichen ASE-Strategie für die Säulen Mensch, Technik und Organisation.

## 1. Herausforderung und Problemstellung

Der technische Fortschritt und der globale Wettbewerb treiben die Produktentwicklung stetig voran, angefangen bei mechanischen Systemen über mechatronische Systeme bis hin zu Cyber-Physical Systems (CPS) und zukünftigen Advanced Systems (AS). Jede dieser Entwicklungsstufen führt zu einer kontinuierlichen Zunahme der Systemkomplexität. Die spezifische Ausprägung von AS kann in Abhängigkeit von Kontext und Branche variieren. In der Regel umfasst der Begriff hochentwickelte und komplexe Systeme, die moderne Technologien, darunter künstliche Intelligenz, einsetzen, um fortschrittliche, teilweise vernetzte Funktionen zu realisieren [1]. Bei der Entwicklung von AS können disziplinspezifische Methoden nicht mit der technologischen, organisatorischen und menschenbezogenen Entwicklungskomplexität Schritt halten. Infolgedessen besteht die Notwendigkeit einen integrativen, soziotechnischen Ansatz zur Entwicklung innovativer AS zu erarbeiten und somit Advanced Systems Engineering (ASE) zu etablieren.

Abbildung 1: Säulen des integrativen Leitbilds für Advanced Systems Engineering im Forschungsprojekt CyberTech mit Darstellung der Querschnittsthemen

Zur Umsetzung wurde im Kontext des F&E-Projekts CyberTech\* im Rahmen der Fördermaßnahme „Beherrschung der Komplexität soziotechnischer Systeme – Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering für die Wertschöpfung von morgen (PDA\_ASE)“ ein MTO-Ansatz (Mensch-Technik-Organisation) verfolgt. Die Einführung von ASE nach dem MTO-Ansatz bietet folgende Nutzenpotenziale für Großunternehmen und insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMUs) in der Produktentwicklung:

- Integration modellbasierter Risiko- und Sicherheitsanalysen
- Verbesserung der Kommunikation bei kollaborativer Entwicklung
- Identifikation von Inkompatibilitäten bei Hard- und Softwareschnittstellen
- Nachverfolgbarkeit von Anforderungsänderungen im Entwicklungsprozess
- Berücksichtigung organisatorischer Anpassungen sowie des Change Managements
- Nachhaltiger Kompetenzaufbau bei Mitarbeitenden für eine agile Arbeitsumgebung

Erforderliche Handlungsfelder für die Einführung von ASE nach dem MTO-Ansatz wurden in CyberTech zu einem Leitbild verdichtet. Abbildung 1 zeigt die drei Säulen des Leitbilds mit den Kernaspekten sowie Querschnittsthemen. Im Nachfolgenden findet eine kurze Beschreibung der ersten Detaillierungsstufe des Leitbilds statt. Die ausführliche Darstellung des vollständigen Leitbilds ist der Abschlussveröffentlichung des CyberTech-Verbundprojekts zu entnehmen [2].



\* gefördert durch das BMBF unter Förderkennzeichen 02J19B010 und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut

## 2. Säulen des Leitbilds

### 2.1 Mensch

Der Einsatz neuer Produktentwicklungsansätze wie ASE geht mit weitreichenden Veränderungen für die Organisation sowie den Menschen einher und erfordert eine moderne kollaborative Arbeitskultur. Unternehmen müssen in herausfordernden Zeiten dynamisch und flexibel agieren, um sich an Kunden, neue Gegebenheiten und an die Unterschiedlichkeit der Absatzmärkte anzupassen. Agilität ist hierbei ein wichtiger Schlüssel zum Erfolg [3]. Wie kann aber Agilität konkret umgesetzt werden? Dabei werden drei Kernaspekte relevant: ein auf ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement, der Einsatz moderner Lernformate sowie die Entwicklung einer gelebten agilen Lernkultur.

Um in der Produktentwicklung agile Arbeitsweisen zu realisieren, ist ein **ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement** notwendig. In dessen Zentrum steht der Mensch sowie die Förderung und Stärkung seiner Softskills [4]. Grundlegend für das Arbeiten in ASE ist das Erlernen agiler Arbeitsmethoden durch **moderne Lernformate**, die sich vor allem auf die menschbezogene Kompetenzförderung fokussieren. Agile Arbeitsweisen setzen ein hohes Maß an offener und direkter Kommunikation voraus, wofür ein Kulturwandel quer durch die Organisationseinheiten eines Unternehmens zwingend notwendig ist. Eine organisationsweit gelebte **agile Lernkultur** bildet hierfür die Basis [5]. So werden nicht nur agile Werte,



**Abbildung 2:** Kernaspekte und Querschnittsthema der Säule Mensch des Leitbilds des Verbundprojekts CyberTech

Kompetenzen und Führungsprinzipien auf individueller Ebene, sondern darüber hinaus Kreativität, digitale Kollaboration und Innovationsfähigkeit auf organisationaler Ebene stetig gefördert. In solch einer dynamischen Arbeitsorganisation, die beispielsweise durch Einführung flacher Hierarchien oder cross-funktionaler und selbstorganisierter Entwicklungsteams gekennzeichnet ist, können ASE-zugeschnittene Rollen zur Anwendung kommen. Die Säule „neue, kollaborative Arbeitskultur in der Entwicklung und Produktion“ rückt die mit ASE einhergehenden Veränderungen für den Menschen in den Fokus und betont den tiefgreifenden Wandel im Engineering, der alle Ebenen (Mensch, Technik und Organisation) im soziotechnischen Gesamtsystem betrifft.

### 2.2 Technik

Aus der Perspektive der Technik stellt der Digitale Zwilling (DZ) in Verbindung mit dem physischen Produkt, dem sogenannten Physischen Zwilling (PZ), das Ergebnis und die Grundlage für innovative Anwendungsfälle im Rahmen von ASE dar. Der DZ stellt somit das digitale Abbild eines physischen Produkts dar und steht mit diesem im wechselseitigen Austausch [6]. Er dient als technische Voraussetzung und Steuerungsschnittstelle beispielsweise zur Fernüberwachung, vorausschauender Wartung oder für Strategien zur Fehlervermeidung. Hierfür nutzt der DZ geometrie- und verhaltensbeschreibende Modelle aus der Produktentwicklung sowie Zustands- und Prozessdaten aus der Produktnutzung.

Die Herausforderungen von ASE bei der Entwicklung eines DZ umfassen die Gestaltung von virtuellen und physischen Komponenten sowie die Verarbeitung von Sensormesswerten mit Simulationsmodellen, die das Verhalten beschreiben. Dies wird mit dem Kernaspekt **Verknüpfung von Simulationsmodellen mit Sensornetzwerken** beschrieben.

Für die vollständige und effiziente Repräsentation von Merkmalen, Zuständen und Verhalten muss das physische System in Partialmodellen beschrieben werden. Je nach Anwendungsfall können die Partialmodelle berechnet und zu einem Gesamtmodell verknüpft werden. Dafür muss eine **domänenübergreifende Interoperabilität** der Modelle sichergestellt werden. Kurz- und mittelfristig ist die Entwicklung der Partialmodelle Teil der virtuellen Produktentwicklung. Langfristig werden Plattformen und digitale Ökosysteme entstehen, über die Partialmodelle von Drittanbietern für die Erweiterungen des eigenen Digitalen Zwillings erworben werden können. Die Herausforderung während der Produktentwicklung liegt darin, der immer größer werdenden Komplexität von Produkten – und des Produktentwicklungsprozesses selbst – gerecht zu werden.



**Abbildung 3:** Kernaspekte der Säule Technik des Leitbilds des Verbundprojekts CyberTech

Um diese Komplexität zu beherrschen, muss der Fokus auf den Beginn des Produktentwicklungsprozesses gelegt werden, in dem die Basis für die gesamte weitere Entwicklung entsteht. Hier wird die Produktidee analysiert und in Anforderungen, Funktionen und Komponenten zerlegt. Aufgrund normativer Anforderungen, aber auch um den Überblick über die Systemelemente zu behalten, ist eine **ganzheitliche Nachvollziehbarkeit (Traceability)** im Produktentwicklungsprozess von großer Bedeutung. Mit ihrer Hilfe kann geprüft werden, welche Anforderungen erfüllt sind oder welche Elemente durch Änderungen in der Planung beeinflusst werden. Andererseits lassen sich etwaige Fehler auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zurückverfolgen.

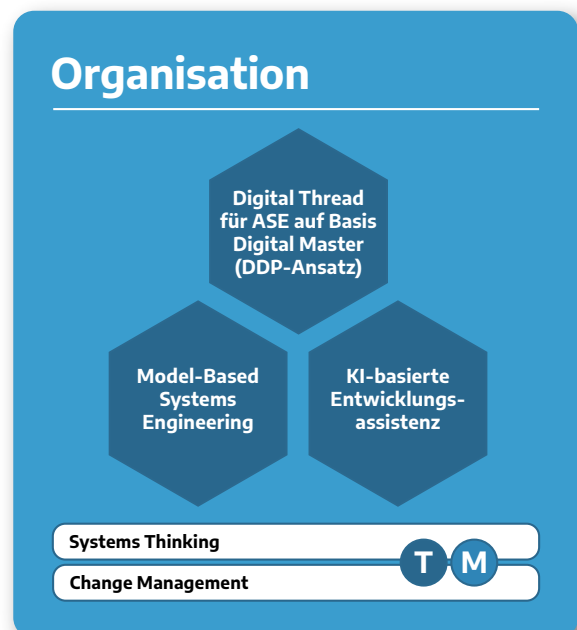
### 2.3 Organisation

Die Bereiche der mensch-bezogenen Arbeitsgestaltung und der Produktentwicklungsmethoden entwickeln sich ständig weiter. Die Integration von Ansätzen für mensch-bezogene Produktentwicklungsprozesse für AS in organisatorische Rahmenbedingungen stellt eine Herausforderung in einer globalen und agilen Arbeitsumgebung dar. Als Bindeglied zwischen der Befähigung von Mitarbeitenden und den zu entwickelnden technischen Systemen liegt der Fokus auf der Organisation als strukturierendem Faktor [7].

Die organisatorischen Rahmenbedingungen für ASE definieren Produktentwicklungsprozesse und erfordern ein **Rahmenwerk für Model-Based Systems Engineering** (modellbasierte Systementwicklung). Das Rahmenwerk strukturiert Methoden, digitale Werkzeuge und Vorlagen, um modellbasierte Entwicklungsprozesse für ASE in der Organisation zu verankern.

Des Weiteren spielt die digitale Nachverfolgbarkeit produktbezogener Entwicklungsartefakte in einer verteilten, kollaborativen Entwicklungsumgebung eine Schlüsselrolle [8]. Der **Digital Thread für ASE auf Basis des Digital Master** unter Verwendung des DDP-Ansatzes liefert hierfür ein Mittel zur digitalen Nachverfolgbarkeit von Entwicklungsartefakten im ASE [9]. Das Digital Data Package (DDP) ist ein organisatorisch umzusetzender Kernaspekt zur technischen Realisierung des Digital Master.

Zusätzlich sind automatisierte Prozesse und Methoden notwendig, um trotz der Komplexität bei AS und der Interdisziplinarität im ASE einen Überblick in der täglichen Arbeit zu behalten. Um die Verfolgung von Entwicklungsartefakten wie Anforderungen, abgeleiteten Funktionen und technischen Lösungselementen sicherzustellen, müssen eine KI-basierte Datenbereitstellung, domänenspezifische Datenmodelle sowie ein domänenübergreifendes Informationsmodell unterstützen [10]. Zudem bietet eine **KI-basierte Entwicklungsassistenz** Unterstützung bei Routinearbeiten in der Systemmodellierung und der Einhaltung relevanter Normen in der Entwicklung von AS.



**Abbildung 4:** Kernaspekte und Querschnittsthemen der Säule Technik des Leitbilds des Verbundprojekts CyberTech

## 3. Zentrale Ergebnisse

### 3.1 Mensch

Für das ASE-gerichtete Kompetenzmanagement wurde ein empirisches Kompetenzmodell entwickelt, welches Unternehmen zur Adaption bestehender Kompetenzentwicklungsmodelle und -maßnahmen zur Verfügung steht [4]. Drei Hauptbestandteile wurden für ein ASE-gerichtetes Kompetenzmanagement hergeleitet: (1) Identifizierung und Formulierung von Kompetenzanforderungen, (2) Systematisierung der Anforderungen in einem Kompetenzmodell sowie (3) Training und Entwicklung von agilen Kompetenzen auf Grundlage des erstellten Modells. Um agile Arbeitsmethoden bereits vor dem Eintritt in den Arbeitsmarkt anzuregen, wurde ein universitäres Lernlabor aufgebaut, welches gezielt sozial-kommunikative Kompetenzen für ASE im Rahmen von Lehrveranstaltungen (z.B. Tutorien, Projekt- und Abschlussarbeiten) fördert und das bestehende Curriculum am Fachbereich Maschinenbau erweitert [11]. Darüber hinaus wurde für die agile Lernkultur eine agile Toolbox für agiles Arbeiten entwickelt. Diese beinhaltet verschiedene Methoden, die Kompetenzen verschiedener nicht-technischer Bereiche fördern. Die agile Toolbox lässt sich anpassen, wobei verschiedene Methoden hinzugenommen oder ausgelassen werden können. Im Rahmen der universitären Lehre wird die agile Toolbox bereits erprobt.

### 3.2 Technik

Der Mehrwert des DZ im Rahmen von CyberTech liegt in der direkten Datenauswertung während der Produktnutzung zur Zustandsbeschreibung, Diagnose, Vorhersage und präskriptiven Analyse [12] sowie in der Rückkopplung von Zustandsdaten und Simulationsergebnissen aus der Produktnutzung in die Produktentwicklung [13]. Simulationsmodelle können in konkreten Fällen validiert und tatsächliche Nutzungsprofile simuliert werden. Die entwickelten Konzepte der Kernaspekte der Säule Technik wurden anhand eines Demonstrators implementiert und validiert. Der Demonstrator umfasst einen Roboterarm und einen funktional erweiterten 3D-Drucker. In der Produktnutzung können über die Demonstrator-

Sensoren Messwerte erfasst und an den DZ übermittelt werden. Mittels entwickelter Prozesse und Methoden werden ausgewählte Sensormesswerte als Simulationsdaten weiterverarbeitet und das Systemverhalten virtuell beschrieben. Im konkreten Fall wurde der Druckprozess des 3D-Druckers mit verhaltensbeschreibenden Modellen für Mehrkörpersimulationen abgesichert. Aufgrund von hohen Druckgeschwindigkeiten kann es zur Fehlproduktion der additiv gefertigten Bauteile kommen. Mit zunehmender Druckgeschwindigkeit wirken dynamische Kräfte, die über die Kontaktfläche zwischen dem Bauteil und der Druckplattform aufgenommen werden. Ändert sich die Druckgeschwindigkeit, können die Auswirkungen der Geschwindigkeit mittels der Simulationsmodelle beschrieben und validiert werden, um eine Prozessoptimierung zu erreichen.

### 3.3 Organisation

Im Verbundprojekt CyberTech wurde ein Rahmenwerk für MBSE im Kontext ASE ausgearbeitet, wobei ein Schwerpunkt auf einem Vorgehen zur Anpassung des Rahmenwerks an Bedürfnisse spezifischer Unternehmen lag. Teil der Lösung ist eine enge Verknüpfung des MBSE-Rahmenwerks an eine organisatorisch unterstützte Durchgängigkeit entlang des Digital Thread durch Bereitstellung eines generischen Informationsmodells [14]. Zur technischen Umsetzung des Informationsmodells wurden mehrere Lösungsvarianten für die IT-unterstützte Durchgängigkeit, insbesondere von verschiedenen kommerziellen Toolanbietern, untersucht. Als vielversprechendster und offener Ansatz wurde das DDP identifiziert und ein sogenannter DDP-Manger [9] als Proof-of-Concept umgesetzt. Der DDP-Ansatz ermöglicht die Integration verschiedener Entwicklungsartefakte in offenen Neutralformaten in ein definiertes Containerformat, um Kollaboration in und zwischen Unternehmen zu ermöglichen. Ergänzend wurde eine KI-Lösung zur Automatisierung im Bereich der frühen Systemmodellierung erforscht [15] und in einem Demonstrator umgesetzt. Ein Schwerpunkt war der Umgang mit regulatorischen und normativen Anforderungen, um Normkonformität der Systemarchitektur im ASE zu gewährleisten und mit alternativen, teils etablierten Lösungen oder Teillösungen gegenüberzustellen.

## 4. Ausblick

Dieser Beitrag skizziert ein Leitbild des Advanced Systems Engineering (ASE) unter Anwendung des MTO-Ansatzes (Mensch-Technik-Organisation). Das Leitbild fungiert als Ordnungsrahmen und stellt einen Auszug aus der Abschlussveröffentlichung des Verbundprojekts CyberTech dar. Es bietet eine kompakte Orientierung zu ASE und gibt Einblicke in mögliche Handlungsfelder, ohne jedoch die detaillierte Umsetzung im Rahmen einer Einführung von ASE zu vertiefen. Die ausführliche Darstellung der weiteren Detailstufen des Leitbilds und Ansätze zur Implementierung von ASE in Unternehmen ist Bestandteil der CyberTech-Abschlussveröffentlichung [2]. Zudem werden die Querschnittsthemen, wie Change Management, Wissensmanagement und Systems Thinking, in der CyberTech-Abschlussveröffentlichung näher dargestellt. Die Querschnittsthemen bilden im Kontext einer soziotechnischen Betrachtungsweise ASE-Themenfelder ab, die mehrere Säulen des MTO-Ansatzes adressieren und so erarbeitete Bausteine für Schlüsseltechnologien, Befähigungskonzepte und Einführungsstrategien für ASE integrieren. Diese spielen eine entscheidende Rolle im Erfolg von ASE und wurden integraler Bestandteil der Forschungsbemühungen. Ihre Relevanz erstreckt sich auf die Implementierung von ASE-Praktiken in reale Unternehmensumgebungen.

## Quellen

- [1] R. Dumitrescu, A. Albers, O. Riedel, R. Stark, J. Gausemeier, Engineering in Deutschland – Status quo in Wirtschaft und Wissenschaft. Ein Beitrag zum Advanced Systems Engineering, Paderborn, 2021.
- [2] S. Kleiner (Hrsg.), O. Bleisinger (Hrsg.), Abschlussveröffentlichung CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen, Darmstadt, 2024, ISBN 978-3-00-079013-3.
- [3] M. Glück, Agile Innovation - Mit neuem Schwung zum Erfolg, Springer Vieweg, 2022, <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37957-5>.
- [4] Y. Arslanparcasi, O. Karasek, Kompetenzentwicklung in Systems Engineering. Nachhaltig Arbeiten und Lernen - Analyse und Gestaltung lernförderlicher und nachhaltiger Arbeitssysteme und Arbeits- und Lernprozesse, Tagungsband zum 69. Arbeitswissenschaftlichen Kongress, GfA-Press, 2023.
- [5] Y. Arslanparcasi, Von der klassischen Weiterbildung zur virtuellen Lernkultur. Arbeit und Digitalisierung – Warum Digitalisierung besser mit einer partizipativen Arbeitskultur gelingt, Begleitforschung Mittelstand-Digital, 2022, S. 24–26.
- [6] R. Stark, R. Anderl, K.-D. Thoben, S. Wartzack, WiGeP-Positionspapier: „Digitaler Zwilling“, ZWF 115 (special), 2020, S. 47-50, <https://doi.org/10.3139/104.112311>.
- [7] DIN German Institute for Standardization, DIN 69901-1: Project management - Project management systems - Part 1: Fundamentals, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009.

- [8] M. Eigner, R. Stelzer, Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management, Springer, Berlin, 2009, ISBN 978-3-540-44373-5.
- [9] S. Kleiner, M. Kirsch, How Digital Data Packages Support Model-Based Systems Engineering & Supply Chain Excellence in the Future, 3D Collaboration & Interoperability Congress, Golden, 2024.
- [10] M. Hirz, W. Dietrich, A. Gfrerrer, J. Lang, Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development: Development Processes, Geometric Fundamentals, Methods of CAD, Knowledge-Based Engineering Data Management, Springer, Berlin, 2013, ISBN 978-3-642-11939-2.
- [11] O. Karasek, Y. Arslanparcasi, Conceptualizing an Academic Teaching and Learning Laboratory for Systems Engineering, In S. Nazir (Hrsg.), Training, Education, and Learning Sciences, Vol. 109, AHFE International Conference, AHFE Open Access, 2023, S. 134–141, <http://doi.org/10.54941/ahfe1003159>.
- [12] G. Schuh, P. Walendzik, M. Luckert, M. Birkmeier, A. Weber, M. Blum, Keine Industrie 4.0 ohne den Digitalen Schatten: Wie Unternehmen die notwendige Datenbasis schaffen, ZWF 111 (11), 2016, S. 745-748, <http://doi.org/10.3139/104.111613>.
- [13] B. Röhm, R. Anderl, Concept of a System Architecture for a Simulation Data Management in the Digital Twin, In ASME 2021 30th Conference on Information Storage and Processing Systems, 2021, <https://doi.org/10.1115/ISP2021-65300>.
- [14] N. Cioroi, O. Bleisinger, A. Merchergui, J. Krautkremer, S. Kleiner, Ein generisches Informationsmodell für durchgängige IT-Toolchains im Kontext des Model-Based Systems Engineering, Tag des Systems Engineering 2023: Tagungsband, Würzburg, 2023, S. 258-264, ISBN 978-3-910649-00-2.
- [15] M. Chami, N. Abdoun, J.-M. Bruel, Artificial Intelligence Capabilities for Effective Model-Based Systems Engineering: A Vision Paper, INCOSE International Symposium, 2022, S. 1160-1174, <https://doi.org/10.1002/iis2.12988>.

## CyberTech – Advanced Systems Engineering für die Arbeitsgestaltung von Cyber-technischen Systemen

KONSORTIALFÜHRER

Dr. Sven Kleiner

AUTOREN

**:em engineering methods AG**

Dr. Sven Kleiner (Hrsg.), Oliver Bleisinger

**TU Darmstadt –**

**Fachgebiet Product Life Cycle Management (PLCM)**

Prof. Benjamin Schleich, Prof. Reiner Anderl,

Dr. Benjamin Röhm, Tanja Steinbach

**TU Darmstadt – Institut für Arbeitswissenschaft (IAD)**

Oliwia Karasek, Yusuf Arslanparcasi

**SysDice GmbH**

Mohammad Chami

**Mechatronik Engineers GmbH**

Dr. Albrecht Urbaszek, Günter Eßl, Dr. Marko Ćorić

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Förderkennzeichen 02J19B010 gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

**Ansprechpartner:** Dr. Sven Kleiner, :em engineering methods AG

E-Mail: [info@em.ag](mailto:info@em.ag) | Tel. +49 6151 7376-100