

Veranstaltungsort:

Heinz Nixdorf MuseumsForum
Fürstenallee 7, 33102 Paderborn

- **Mechatronische Produkte**
(neue Funktionalitäten, Industrie 4.0, Kosteneffizienz, Zuverlässigkeit, ...)
- **Ressourceneffizienz**
(Energie, Material, ...)
- **Automatisierte Mobilität**
(Konzepte, Modelle, Sensorik)
- **Systems Engineering und Entwicklungsmanagement**
(Prozesse, Verfahren, Software, ...)
- **Innovative Konzepte und digitale Geschäftsmodelle**
(Modelle, Regelung, Optimierung, Eco-Systeme)
- **Nutzerfreundlichkeit und Akzeptanz**
(Assistenzsysteme, Schnittstellen, Interaktion, Gesetzgebung, ...)
- **Systemvernetzung und Systemintegration**
(Konzepte, Verfahren, ...)
- **Smarte Aktoren**
(Konzepte, Beispiele, ...)
- **Serienfertigung mechatronischer Produkte**
(Fallbeispiele, Komponenten, Architektur, Qualitätsmanagement, ...)

www.VDI-Mechatroniktagung.de

Augmented Reality für die Vermittlung von Systems Engineering-Kompetenzen

Augmented Reality for Teaching Systems Engineering Competencies

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler, Christian Oleff, M.Sc., Patrick Taplick, M.Sc.
Universität Paderborn, Heinz Nixdorf Institut, Lehrstuhl für Produktentstehung, 33102 Paderborn, Deutschland
{iris.graessler, christian.oleff, patrick.taplick}@hni.upb.de

Kurzfassung

Systems Engineering befähigt Entwicklungsteams, die Komplexität mechatronischer Systeme insbesondere in Bezug auf die Vernetzung von Systemelementen handhabbar zu machen. Die Methodik beruht auf dem Ansatz des Systemdenkens, das ein tiefgreifendes Verständnis mechatronischer Systeme erfordert. Traditionelle Lehrkonzepte stoßen bei der Vermittlung von SE-Kompetenzen und speziell dem Systemdenken an ihre Grenzen [1]. Sprachen wie die Systems Modeling Language erlauben die Beschreibung von Systemen und die entwicklungsphasenübergreifende Verbindung von Daten und Informationen. Sie unterstützen sowohl das individuelle als auch das kollektive Systemdenken [2]. Mittels Augmented Reality können mechatronische Systeme mit Informationen aus virtuellen Modellen angereichert und damit das Verständnis für komplexe Sachverhalte unterstützt werden (z.B. [3]). Die durch einen Demonstrator unterstützte Analyse zeigt, dass durch die situative, bedarfsgerechte und lernzielorientierte Visualisierung von Informationen der Aufbau von Systems Engineering Kompetenzen gefördert werden können.

Abstract

Systems Engineering enables development teams to manage the complexity of mechatronic systems, especially regarding the interdependencies of system elements. It is based on a systems thinking approach, which demands for an in depth understanding of the system. Traditional education concepts seem to be insufficient to teach Systems Engineering and in particular systems thinking [1]. Languages like the Systems Modelling Language enable the representation of systems as well as data and information across all life cycle phases. Thereby, they facilitate individual and collective systems thinking [2]. By means of Augmented Reality, additional information can be provided on mechatronic systems based on virtual product representations, which also increases understanding of complex structures and behaviours of mechatronic systems (e.g., [3]). This analysis is supported by a demonstrator and emphasizes how beneficial visualisation of additional information, according to the specific needs of one's situation, is to build up Systems Engineering competencies.

1 Einleitung

Systems Engineering (SE) stellt einen Ansatz dar, der die erfolgreiche Realisierung komplexer, interdisziplinärer Entwicklungsvorhaben unterstützt. Nutzenpotenziale von Produkten werden vermehrt durch das Zusammenspiel einer Vielzahl an Systemelementen aus unterschiedlichen Disziplinen generiert. Insbesondere mechatronische und zunehmend cyber-physische Systeme sind daher im Fokus heutiger Entwicklungsprojekte. Die effektive und effiziente Entwicklung solch hoch komplexer, interdisziplinärer Systeme verlangt ein strukturiertes und ganzheitliches Vorgehen [4]. Für derartige Bedarfe ist SE ausgelegt; der Bedarf an Entwicklern mit hohen Kompetenzen in diesem Bereich steigt entsprechend [5]. Zugleich stellt der holistische Entwicklungsansatz des SE aber insbesondere die universitäre Lehre vor neue Herausforderungen, da etablierte Konzepte ungenügend erscheinen, um die systemische Sichtweise zu vermitteln und dazugehörige Kompetenzen in ausreichendem Maße auszubilden [1, 6]. Die Modellierung in der Entwicklung mechatronischer Systeme hilft, die Komplexität der Systeme besser zu beherrschen. Im Kontext des SE spielt dabei die Systems Modelling Language (SysML) eine zentrale Rolle. Diese

beruht auf der Unified Modeling Language (UML) und ist auf die Entwicklung intelligenter technischer Systeme ausgerichtet. Die mit SysML generierten Partialmodelle bilden das Wissen über die Anforderungen, die Struktur und das Verhalten des Systems ab. [7]

Diese Informationen werden zumeist unabhängig von der physischen Repräsentation (Prototyp, Produkt) betrachtet, wodurch die Partialmodelle häufig nicht intuitiv nachvollziehbar sind. Augmented Reality (AR) bietet eine Möglichkeit, mechatronische Systeme mit Informationen aus virtuellen Modellen visuell anzureichern. Insbesondere in Verbindung mit SysML-Modellen kann dadurch das Verständnis komplexer Sachverhalte gefördert werden [3]. Welche Potenziale die Kombination von SysML und AR-Technologie beim Aufbau von SE-Kompetenzen bieten, ist aber bisher weitestgehend unerforscht.

Zur Beurteilung der Potenziale wird in dieser Arbeit ein Demonstrator entwickelt, mit Hilfe dessen sinnvolle Anwendungsszenarien identifiziert und die Einsatzmöglichkeiten getestet werden. Weitere Potenziale werden aus Literaturbefunden abgeleitet. Die Resultate werden genutzt, um den Nutzen von AR und SysML in der SE-Lehre zu beurteilen und Handlungsempfehlungen für ein darauf abgestimmtes Lehrkonzept herauszuarbeiten.

2 Stand der Wissenschaft

Systems Engineering

Systems Engineering ist ein Ansatz, der die erfolgreiche Entwicklung komplexer, interdisziplinärer Systeme unterstützt [8]. Durch eine Fokussierung auf ein ganzheitliches Optimum, die Berücksichtigung von Schnittstellen zwischen den Teilsystemen untereinander und zum Umfeld und die kontinuierliche Ausrichtung der Entwicklung auf Stakeholderbedürfnisse ist der SE-Ansatz eine vielversprechende Unterstützung bei der erfolgreichen Entwicklung komplexer Systeme [4].

Für die Anwendung von SE müssen unterschiedliche Rollen im Unternehmen ausgeprägt werden. Ein etabliertes Rollenmodell wurde von S.A. Sheard veröffentlicht und unterscheidet 12 Rollen, die in ihrer Gesamtheit alle wesentlichen SE-Aktivitäten verantworten und in unterschiedlichem Umfang in der Unternehmensorganisation verankert werden sollten [9]. Rollen implizieren dabei einen spezifischen, aufgabenbezogenen Kompetenzbedarf. Für unterschiedliche SE-Ansätze wurden in der Vergangenheit diverse Kompetenzmodelle mit spezifischen Schwerpunkten erarbeitet [10–13]. Ausgewählte Referenzmodelle wurden zum INCOSE Systems Engineering Competency Framework zusammengeführt [5], das 36 Kompetenzen in 5 Kategorien zusammengefasst:

- „Core Competencies“ (Grundlegende Kompetenzen für Entwicklungs- und SE-Aktivitäten)
- „Professional Competencies“ (Verhaltenskompetenzen, vgl. etablierten Rahmenwerken des Personalwesens)
- „Management Competencies“ (Kompetenzen zur Kontrolle und zum Management von SE-Aktivitäten)
- „Technical Competencies“ (Kompetenzen zur Ausübung von SE-Prozessen)
- „Integrating Competencies“ (Kompetenzen zur Integration von Aktivitäten und Sichten anderer Disziplinen)

Hervorzuheben ist die Kompetenz des Systemdenkens (engl. *Systems Thinking*), die den „Core Competencies“ zugeordnet ist. In der Literatur gibt es zahlreiche Definitionen von Systemdenken, die sich zum Teil stark unterscheiden [5, 14–16]. In dieser Arbeit wird dem INCOSE-Verständnis gefolgt. Systemdenken wird als das tiefgreifende Verständnis eines Systems, dessen Einbettung in ein Umfeld, den Systemgrenzen und Schnittstellen, sowie dem Systemlebenszyklus interpretiert [5]. Dieses Verständnis ist bei der Definition, der Entwicklung und der Realisierung des Systems anzuwenden. Dadurch kann die steigende Komplexität gehandhabt und eine ganzheitliche Entscheidungsfindung ermöglicht werden [5].

Das Systemdenken stellt den holistischen Kern des SE dar. Mit SE sollen Entwicklungsaufgaben gelöst werden, die häufig sehr umfangreich sind. Dies führt zu schwer abgrenzbaren Problemstellungen und einem unscharfen Lösungsraum [6]. Die Konsequenz ist in der Regel, dass es nicht nur eine einzelne Lösung gibt, sondern eine Kombination vielfältiger Maßnahmen zum Ziel führt. Es muss ein interdisziplinäres Optimum gefunden werden.

Ziel beim Aufbau von SE-Kompetenzen ist es, das Zusammenspiel der beteiligten Disziplinen und weiterer Stakeholder zu verstehen und zu beherrschen. Des Weiteren ist der kompetente Umgang mit unscharfen Problemstellungen in einem multidisziplinären Kontext erforderlich, da vielfach Unsicherheiten, Ambiguität, Dynamik und Zielkonflikte das Aufgabenfeld eines Systems Engineers bestimmen [9]. [6]

Durch die hohe Komplexität nimmt die Modellierung einen wichtigen Stellenwert bei der Anwendung von SE ein [7, 17]. Ein Systemmodell beinhaltet dabei Schnittstellen in verschiedene Domänenmodelle. Die Handhabung im interdisziplinären Team erfordert entsprechend übergreifende Modellierungsansätze und die Fähigkeit zur Kollaboration. Die Erfassung von Informationen über das System werden durch Modellierungssprachen, wie beispielsweise die Systems Modelling Language (SysML) ermöglicht. SysML kann zur Steigerung der Effizienz und Effektivität von Entwicklungsaktivitäten eingesetzt werden [7]. Der Bedarf an SE-Kompetenzen umfasst Fähigkeiten zum Entwurf, zur Pflege und zur Vernetzung von Systemmodellen mittels SysML.

Traditionelle, wissensvermittelnde Lehrkonzepte können durch den „reduktionistischen“ Ansatz nur unzureichend das auf Ganzheitlichkeit und Offenheit ausgerichtete SE-Konzept vermitteln [1, 6]. Dies schließt die bedarfsorientierte Anwendung von unterstützenden Methoden und Werkzeugen unterschiedlicher Domänen ein.

Augmented Reality

Augmented Reality (AR) wird durch die folgenden drei Eigenschaften von Azuma beschrieben [18]

- Kombination von Realität und Virtualität
- Echtzeit-Interaktion
- Registrierung von 3D-Objekten

Milgram et al. [19] grenzen AR von Virtual Reality und Augmented Virtuality anhand des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums ab (Abbildung 1). AR besitzt einen niedrigeren Anteil virtueller Artefakte und wird aus diesem Grund näher der Realität im Kontinuum zugeordnet. Durch die Ortsunabhängigkeit und mögliche Verbreitung über mobile Endgeräte ist der Einsatz der Technologie in verschiedenen Anwendungsbereichen möglich [20]. Im industriellen Umfeld sind Anwendungen insbesondere im Technischen Service zu finden [21]. Weiterhin stellt das Themenfeld Bildung einen Anwendungsbereich für die Technologie dar. In einer Vielzahl unterschiedlicher wissenschaftlicher Studien wurde die prototypische Anwendbarkeit untersucht. Dabei unterscheiden sich die Bildungsstufen (Grundschule bis akademische Lehre) und Lerninhalte (Physik-Unterricht, mechanische Konstruktion, ...).

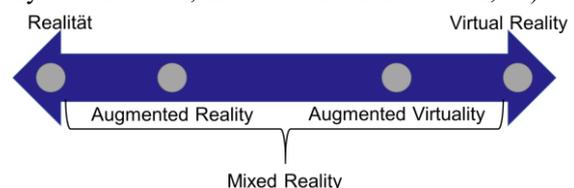


Abbildung 1 Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum (nach [19])

In verschiedenen Anwendungsstudien wurden Potenziale der Technologie identifiziert (Synopsis aus [22–26]):

- **Räumliche Visualisierung:** AR bietet die Möglichkeit Strukturen und Funktionen von Objekten anschaulich virtuell im realen Raum darzustellen.
- **Kontextualisierung:** Verbindung und Präsentation von neuen Information in der realen Welt. Dabei handelt es sich um die Darstellung virtueller Information, die kontextuell zum Verständnis reale Objekte beitragen sollen.
- **Echtzeit Informationen:** AR bietet die Möglichkeit unterstützender, kontextbezogene Informationen in Echtzeit zur Verfügung zu stellen.
- **Individualisierte Informationen:** Benutzerspezifische Bereitstellung von Informationen, die den Benutzer individuell unterstützen.
- **Informationszugänglichkeit:** Die Informationszugänglichkeit steht in direktem Zusammenhang mit der physischen Umgebung. Die Zugänglichkeit ist umgebungsbezogen mittels Tracking von Objekten und die Zuordnung von virtuellen Objekten und Annotationen.
- **Kollaboration:** Das Teilen virtueller Informationen fördert die Kollaboration von Benutzergruppen, also die integrative Zusammenarbeit zur Lösung einer Aufgabe.

Der aktuelle Entwicklungsstand der Technologie bietet allerdings nicht nur Potenziale, sondern auch Limitationen und Herausforderungen in Bezug Bildung:

- **Aufmerksamkeitsfixierung:** Fokus auf AR-Inhalte und Risiko der Vernachlässigung anderer Inhalte
 - **Gebrauchstauglichkeit** häufig noch nicht ausreichend, z.B. wegen Bewegungseinschränkungen.
 - **Einbindung im Lernumfeld:** Einbindung in Lernarrangements erfordert Anpassung der Lehrkonzepte
 - **Unterscheidung von Lerntypen:** Unterstützung einiger Lerntypen, aber Hemmung weniger AR-affiner Typen
 - **Spezifische Anwendungsfelder:** Fehlende Flexibilität, Aufwand der Erstellung spezifischer Applikationen
 - **Lerninhaltserstellung:** Kaum Unterstützung durch Autorentsysteme, dadurch Anforderungen an Lehrende
- Trotz dieser Aspekte wird AR durch die Vielzahl an neuen Möglichkeiten als vielversprechende Ergänzung von Lehrkonzepten angesehen.

3 Potenzialanalyse von AR und SysML zur Vermittlung von SE Kompetenzen

Zahlreiche Kompetenzen des INCOSE Kompetenzmodells können nur schwer im Rahmen einer Lehrveranstaltung im klassischen Stil aufgebaut werden. Dies sind beispielsweise ethisches und professionelles Verhalten, emotionale Intelligenz oder Verhandlungsgeschick. In dieser Arbeit werden daher die Kompetenzen in den Fokus gerückt, die direkt auf die Umsetzung der SE Prozesse und Prinzipien abzielen und im Rahmen von Lehrveranstaltungen bis zu einem gewissen Grad ausgebildet werden. Dies ist das Systemdenken sowie alle „Technical Competencies“ (*Requirements Definition, System Architecting, Design for ..., Integration, Interfaces, Verification, Validation, Transition and Operation and Support*).

Die Anwendungspotenziale von AR-Technologie sind vielfältig und stark abhängig vom jeweiligen Anwen-

dungsszenario. In diesem Fall werden solche Technologiepotenziale untersucht, die für die SE-Kompetenzvermittlung im universitären Kontext relevant sind. Dabei kommt SysML eine besondere Bedeutung zu: Die Sprache ist geschaffen worden, um Systemmodelle für mechanische Systeme in ihrer Tiefe (domänenspezifisch) und Breite (domänenübergreifend) handhabbar zu machen. SysML-Modelle können ihren Nutzen häufig auf Grund der hohen Ausdrucksstärke der Sprache sowie der Anzahl und der Vernetzung von Modellelementen nicht entfalten. In dieser Kombination soll AR in der disziplinübergreifenden Lehre einen intuitiven Zugang schaffen. Die für die Analyse zugrunde gelegten Technologiepotenziale sind in erster Linie die räumliche Visualisierung, die Kollaboration und die Kontextualisierung. In einem Demonstrator wurden entsprechende Inhalte und Funktionen implementiert. Als Referenz für die Beurteilung wird ein klassisches Lehrkonzept bestehend aus Vorlesung und Übung angenommen.

Das Konzept des Demonstrators basiert auf der Verknüpfung realer Produkte und Prototypen mit SysML-Partialmodellen. Als Ein- und Ausgabegeräte (Hardware) dienen Smartphone, Tablet oder ein Head Mounted Display (HMD). Eine Kamera des Endgeräts fungiert als Eingabegerät zur Aufnahme des Videostreams, der die reale Umgebung abbildet. Der interne Grafikchip dient als Recheneinheit zur Berechnung der Positionierung und Darstellung des virtuellen Inhalts. Die Displays der Endgeräte werden als Ausgabegerät zur Darstellung der Überlagerung von realer Umgebung und virtueller Inhalte verwendet. In diesem Fall ist ein merkmalsbasiertes, optisches Objekt-Tracking gewählt worden. Zur Darstellung der SysML-Partialmodelle müssen diese dem Objekt zugeordnet werden. Im Demonstrator werden Blockdefinitions-, Aktivitäts- und Anforderungsdiagramm den Objekten als virtueller Inhalt hinzugefügt, da dies häufig initial erlernte Modellierungsarten sind. Abbildung 2 zeigt das Interaktionsmenü für Nutzer. Beispielsweise wird es dem Nutzer ermöglicht, zwischen den SysML-Partialmodellen zu wechseln, um Zusammenhänge erschließen zu können und eine Informationsgrundlage zur Weiterentwicklung oder für Diskussionen im Projektteam zu haben. Weiterhin wird es dem Nutzer ermöglicht, verschiedene Detaillierungsgrade der Partialmodelle zu visualisieren. Durch das Antippen bestimmter Elemente eines Modells werden beispielsweise die Anforderungen spezifiziert.

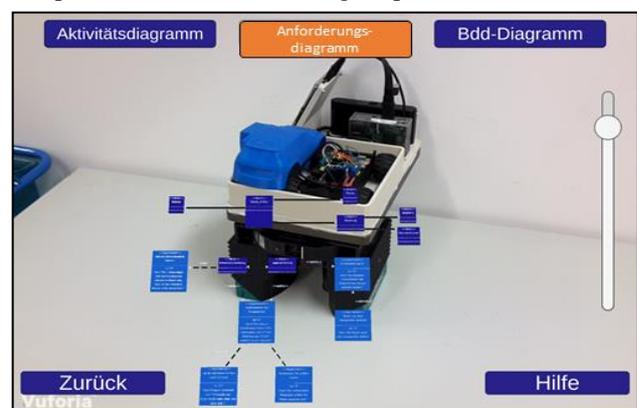


Abbildung 2 Mit SysML-Modell angereichertes Sichtfeld auf den Demonstrator durch eine Microsoft HoloLens

Tabelle 1

Übersicht der Potenziale von AR und SysML für die Vermittlung von Systems Engineering-Kompetenzen

		Systems Engineering Kompetenzen [5]									
		Systems Thinking	Requirements Definition	System Architecting	Design for...	Integration	Interfaces	Verification	Validation	Transition	Operation and Support
AR Technologiepotenziale	Räumliche Visualisierung	●	●	●	●	◐	●	◐	●	●	◐
	Kollaboration	●	●	●	●	◐	●	◐	●	◐	◐
	Kontextualisierung	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	●	●	●
	Echtzeit Informationen	◐	◐	◐	◐	●	◐	●	●	●	●
	Individualisierte Informationen	◐	○	◐	●	◐	○	○	○	●	◐
	Informationszugänglichkeit	◐	◐	◐	●	◐	◐	◐	○	●	●
Vielversprechende AR Potenziale		● Großes Potenzial ◐ Mittleres Potenzial ○ Geringes Potenzial									
Generische Potenziale digitaler Medien											

Eine Übersicht aller Potenziale einer Anwendung von AR und SysML für den Aufbau von SE-Kompetenzen zeigt Tabelle 1. Im Folgenden werden die drei Potenziale räumliche Visualisierung, Kollaboration und Kontextualisierung als Ergebnisse von Literatur- und Demonstrator-basierter Analyse näher erläutert.

Das Potenzial der **räumlichen Visualisierung** liegt in der immersiven Anreicherung der realen Umgebung mit Diagrammen und Modellen, die ergänzende Informationen beinhalten. Beispielsweise kann ein realer Prototyp und dessen Struktur anhand virtueller Strukturdiagramme auf Schnittstellen oder Verbesserungspotenziale hin untersucht werden. Es fördert auch das Systemdenken, da ein tieferes Verständnis des Systems, dessen Aufbau und der Umgebungsbedingungen unterstützt wird. Außerdem wird das Berücksichtigen aller Lebenszyklusphasen durch das Einblenden zu Grunde liegender Anforderungen möglich. Durch die Visualisierung der Simulation von Änderungen am System und den resultierenden Effekten auf die Anforderungserfüllung können geeignete Lösungsansätze ausgearbeitet werden. Anschließend sind ganzheitliche Entscheidungen unter bewusster Berücksichtigung aller Restriktionen möglich. Grundsätzlich wird durch die hohe Transparenz der systembezogenen Informationen das Erarbeiten einer Systemarchitektur unterstützt und zugleich ein ganzheitliches Systemverständnis aufgebaut. Dies gilt ebenso für die Verifizierung und Validierung des Systems. Durch das Einblenden geeigneter Modelle oder Testergebnisse kann das Entwicklungsteam oder andere Stakeholder die Anforderungserfüllung fundierter beurteilen und auch im Sinne einer Validierung bereits in frühen Entwicklungsstadien Aussagen über die Befriedigung der Stakeholder-Bedürfnisse treffen. Insgesamt wird die Kombination von räumlicher Visualisierung und SysML-Diagrammen (insb. Struktur- und Anforderungsdiagramm) als besonders vorteilhaft für das Systemverständnis und die Anwendung von Systemdenken gesehen.

Die Potenziale der räumlichen Visualisierung zum Kompetenzaufbau werden erst durch **Kollaboration** vollständig realisierbar. Eine situationsgerechte Darstellung der Systemstruktur kann in Team-Meetings als Diskussionsgrundlage dienen, für ein gemeinsames Verständnis sorgen und Kommunikationsprobleme reduzieren. Insbesondere in interdisziplinären Entwicklungsvorhaben treten solche Probleme auf Grund unterschiedlicher Denkweisen und Begriffswelten auf [27]. Durch die bedarfsgerechte Informationsbereitstellung für technische Entwicklungsaktivitäten mit mehr als einer beteiligten Disziplin kann AR daher besonders hilfreich sein (z.B. Anforderungserhebung, Ausarbeitung einer Systemarchitektur, Systemintegration) und die Realisierung eines ganzheitlichen Optimums fördern. Die Folge ist eine erhöhte Systemdenken-Kompetenz der Individuen und des Teams, sowie positive Effekte auf technische Kompetenzen wie z.B. „Interfaces“, „System Architecture“ oder „Design for X“. Neben der Kollaboration im Projektteam ermöglicht AR-Technologie auch eine intensivere Einbindung weiterer Stakeholder. Kunden können ein System realitätsnah erleben und dadurch eine aktivere und besser informierte Rolle einnehmen. Insbesondere während der Anforderungserhebung, bei wichtigen Meilensteinüberprüfungen oder bei der Verifizierung und Validierung des Systems ist dies vorteilhaft; Entwickler können dadurch die Kundenwahrnehmung und -sichtweise einfacher nachvollziehen, Änderungswünsche einbringen und das System optimal auf die Kundenbedürfnisse ausrichten. Vom aktiven Austausch mit Stakeholdern und dem Perspektivwechsel profitieren zahlreiche technische Kompetenzen wie beispielsweise „Requirements Definition“ und „Validation“. Ein weiteres, fundamentales Potenzial der AR-Technologie ist die **Kontextualisierung**. Die Verknüpfung der digitalen SysML-Partialmodelle mit realen Prototypen eines Systems kann die Verfügbarkeit der relevanten Informationen deutlich verbessern und für jedes Bauteil die entsprechenden Detailinformationen anzeigen.

Das führt zu einem schnelleren Verständnis der Systemstruktur und des Systemverhaltens. In Verbindung mit SysML-Verhaltensdiagrammen wie dem Aktivitätsdiagramm kann die Nutzung oder das Verhalten eines realen Systems gut verständlich visualisiert werden. Des Weiteren ist durch Kontextualisierung eine durch Zusatzinformationen unterstützte Interaktion mit dem System möglich. Beispielsweise können beim Zusammenbau des Systems andere Teilelemente, Arten von Schnittstellen und die Systemumgebung eingeblendet werden. Für die Planung, Durchführung und Optimierung von Integrationsaktivitäten ist dies ein erheblicher Vorteil. Übergreifend sind die erläuterten Potenziale besonders dann bedeutsam, wenn ein realer Prototyp oder realisierte Systemelemente bzw. das Gesamtsystem vorliegen und eine Interaktion damit stattfindet. Technische Kompetenzen können durch den intuitiveren Zugang zu Informationen besser vermittelt werden, die auf eine Interaktion mit dem System ausgerichtet sind (z.B. „Integration“, „Transition“ und „Operation und Support“).

Indirekt wird auch die Kompetenz „Systems Modeling and Analysis“ gefördert, da dem AR-Nutzer verdeutlicht wird, wofür die SysML-Modelle in einer mechatronischen Produktentwicklung verwendet werden, wann und in welcher Form diese Nutzen stiften und was die Anwendungsgrenzen sind. Neben den Kompetenzen der Kategorien „Core Competencies“ und „Technical Competencies“ wird voraussichtlich auch bezüglich weiterer Kompetenzen ein Nutzen erzielt, wenn auch in einem geringeren Maße. Beispielsweise könnten „Professional Competencies“ (z. B. „Communication“ und „Technical Leadership“) durch das verbesserte und vereinheitlichte Systemdenken oder die geförderte Kollaboration positiv beeinflusst werden. „Management Competencies“ (z. B. „Decision Making“ und „Configuration Management“) profitieren insbesondere durch die Informationsverfügbarkeit, Einbindung fachspezifischer Perspektiven und Meinungen und Transparenz der Systemeigenschaften.

Alle weiteren in Kapitel 2 erläuterten AR-Potenziale (Echtzeitinformationen, individualisierte Informationen und Zugänglichkeit der Informationen) gelten generisch für die Nutzung von SysML mit digitalen Medien und könnten beispielsweise auch durch ein (Tablet-) Computer realisiert werden. Solche Potenziale wurden ebenfalls untersucht. Da in dieser Arbeit die spezifischen Kompetenzen im Vordergrund stehen, werden generische Potenziale jedoch nicht detailliert beschrieben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass AR sich vor allem durch die nutzenstiftende Kombination der drei Technologie-Potenziale und SysML auszeichnet. Einige der erläuterten Vorteile lassen sich auch durch andere digitale Medien erzielen, aber die immersive Anreicherung des Systems mit bedarfsgerechten Informationen ermöglicht ein tieferes Verständnis eines mechatronischen Systems und fördert somit nicht nur das Systemdenken, sondern auch die einzelnen technischen SE-Kompetenzen.

4 Lehrkonzept zum Aufbau von SE-Kompetenzen mittels SysML und AR-Technologie

Zur Beurteilung der Realisierbarkeit der beschriebenen Potenziale zum SE-Kompetenzaufbau sind eine strukturierte Anwendung und langfristige Studien erforderlich. Als ein vorbereitender Schritt werden im folgenden Handlungsempfehlungen für die Implementierung von SysML und AR in der universitären Lehre vorgestellt.

Bonnema leitet aus seiner umfangreichen Erfahrung zur Vermittlung von SE-Kompetenzen und darauf aufbauender Forschung ab, dass es sehr vorteilhaft ist, SE-Aktivitäten an einem geeigneten Objekt zu demonstrieren und idealerweise gemeinsam ein System zu entwickeln [1, 28]. Um die Kollaboration zu fördern, sollte das Lehrkonzept auf Kleingruppen setzen. So wird jedem Individuum die Möglichkeit gegeben, die AR-Technologie tatsächlich zu nutzen und entsprechende Potenziale auszuschöpfen, aber zugleich die Interaktion und die damit verbundenen positiven Effekten auf den Lernerfolg zu realisieren. Des Weiteren sollte ein konkretes Produkt (weiter-) entwickelt werden zu dem die Teilnehmer Modelle erstellen und diskutieren. So wird der ganzheitliche SE-Ansatz „erlebar“. Falls möglich könnte sogar ein Unternehmen mit einem realen Anwendungsfall eingebunden werden. Dies hätte den Vorteil, dass bei den SE-Aktivitäten ein (fiktiver) Kunde durch AR-Anwendungen und SysML-Modelle aktiv eingebunden werden kann.

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend zeigt die Potenzialanalyse, dass eine Anwendung von AR und SysML für den Kompetenzaufbau im Kontext von SE vorteilhaft ist. Den aus dem holistischen SE-Ansatz resultierenden Herausforderungen kann nur durch eine sinnvolle Gestaltung der Lehrkonzepte begegnet werden. SysML fördert das ganzheitliche Systemverständnis und damit die Systemdenken-Kompetenz. AR ergänzt dies durch die Möglichkeit, eine übergeordnete oder individuelle Perspektive einzunehmen und gemeinsam mit Fachexperten anderer Disziplinen interaktiv am System zu arbeiten. Das Systemdenken als Kern des SE profitiert in hohem Ausmaß. Auch die technischen Kompetenzen werden direkt oder indirekt gefördert. Für verlässliche Aussagen muss ein detailliertes Lehrkonzept mit AR- und SysML-Einbindung ausgearbeitet und sowohl im akademischen als auch im industriellen Rahmen angewandt werden. Anhand der durch das INCOSE Kompetenzmodell vorgegebenen Beurteilung des Kompetenzniveaus können im Anschluss die Effekte bewertet und eine verlässliche Aussage getroffen werden, ob die identifizierten Potenziale erreicht werden.

6 Literatur

- [1] G. M. Bonnema, K. T. Veenliet und Broenink, Jan F., *Systems design and engineering: Facilitating multidisciplinary development projects*. Boca Raton: CRC press, 2016.

- [2] R. Cloutier, B. Sausser, M. Bone und Taylor, Andrew, "Transitioning Systems Thinking to Model-Based Systems Engineering: Systemigrams to SysML Models," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern, Syst.*, vol. 45, no. 4, pp. 662–674, 2015.
- [3] R. Reif, *Entwicklung und Evaluierung eines Augmented Reality unterstützten Kommissioniersystems*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2009. Gar-ching b. München: Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluß Logistik (fml) Techn. Univ. München, 2009.
- [4] D. D. Walden, G. J. Roedler, K. Forsberg, R. D. Hamelin und Shortell, Thomas M., *Systems engineering handbook: A guide for system life cycle processes and activities*, 4th ed.: Wiley, 2015.
- [5] INCOSE, "Systems Engineering Competency Framework," 2018. Accessed on: Oct. 11 2018.
- [6] G. Muller and Bonnema, G. Maarten, "Teaching Systems Engineering to Undergraduates; Experiences and Considerations," *INCOSE International Symposium*, vol. 23, no. 1, pp. 98–111, 2013.
- [7] T. Weilkiens, *Systems Engineering mit SysML/UML: Modellierung, Analyse, Design*, 3rd ed. Heidelberg, Neckar: dpunkt, 2014.
- [8] I. Gräßler, "Umsetzungsorientierte Synthese mechatronischer Referenzmodelle: Implementation-oriented synthesis of mechatronic reference models," in *Konferenzband der VDI Mechatronik: Fachtagung Mechatronik 2015*, T. Bertram, Ed., Dortmund, 2015, pp. 167–172.
- [9] S. A. Sheard, "Twelve Systems Engineering Roles," in *Proceedings of the INCOSE Sixth Annual International Symposium: Systems Engineering: Practices and Tools*, Marriot Copley Place Hotel, Boston, Massachusetts, USA, 1996.
- [10] Trudeau/Ziarko, "MITRE Institute SE Competency Model," 2007. [Online] Available: <https://www.mitre.org/publications/technical-papers/systems-engineering-competency-model>. Accessed on: Oct. 11 2018.
- [11] NASA, *Project Management and Systems Engineering Competency Model.: Academy of Program/Project & Engineering Leadership (APPEL)*. [Online] Available: <https://appel.nasa.gov/career-resources/competency-model/>. Accessed on: Oct. 11 2018.
- [12] INCOSE UK, *Systems Engineering Competency Framework*. [Online] Available: http://www.incoseonline.org.uk/Program_Files/Publications/zGuides_6.aspx?CatID=Publications. Accessed on: 29-Aug-18.
- [13] J. E. Kasser and Frank, Moti, "1.2.2 A Maturity Model for the Competency of Systems Engineers," in *20th International Symposium of INCOSE*, pp. 37–50.
- [14] R. D. Arnold and Wade, Jon P., "A Definition of Systems Thinking: A Systems Approach," *Procedia Computer Science*, vol. 44, pp. 669–678, 2015.
- [15] K. Watanabe, Y. Tomita, K. Ishibashi, M. Ioki und Shirasaka, Seiko, "Framework for Problem Definition - A Joint Method of Design Thinking and Systems Thinking," *INCOSE International Symposium*, vol. 27, no. 1, pp. 57–71, 2017.
- [16] V. Anderson and Johnson, Lauren, *Systems thinking basics: From concepts to causal loops*. Waltham, Mass.: Pegasus Communications, 2007.
- [17] O. Alt, *Modell-basierte Systementwicklung mit SysML: In der Praxis*. München: Hanser, Carl, 2012.
- [18] R. T. Azuma, "A Survey of Augmented Reality," *Teleoperators and Virtual Environments*, pp. 355–385.
- [19] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi und F. Kishino, "Augmented Reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum," *Proceedings of Telemanipulator and Telepresence Technologies*, pp. 2351-34.
- [20] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm, and B. Jung, Eds., *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg, 2013.
- [21] I. Gräßler and Taplick, Patrick, "Supporting Product Engineering by Technologies of Virtual and Augmented Reality," in *ECEC 2015*, Lisbon, Portugal, 2015, pp. 73–79.
- [22] I. Radu, "Augmented reality in education: A meta-review and cross-media analysis," *Pers Ubiquit Comput*, vol. 18, no. 6, pp. 1533–1543, 2014.
- [23] J. Bacca, S. Baldris, R. Fabregat, S. Graf und Kinshuk, "Augmented Reality Trends in Education: A Systematic Review of Research and Applications," *Educational Technology & Society*, vol. 2014, no. 17(4), pp. 133–149, 2014.
- [24] D. Schafer and Kaufman, David, "Augmenting Reality with Intelligent Interfaces," in *Artificial intelligence: Emerging trends and applications*, M. A. Aceves-Fernandez, Ed., London: IntechOpen, 2018.
- [25] P. Diegmann, M. Schmidt-Kraepelin, S. van den Eynden und Basten, Dirk, "Benefits of Augmented Reality in Educational Environments: A Systematic Literature Review," *12. Internationale Tagung Wirtschaftsinformatik (WI 2015)*, vol. 2015, 2015.
- [26] F. Saltan, "The Use of Augmented Reality in Formal Education: A Scoping Review," *Eurasia J. Math. Sci. Tech. Ed*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [27] A. Feith, "Zur Fachkommunikation interdisziplinärer Teams in der Produktentwicklung," Dissertation, Fachbereich Gesellschafts- und Geschichtswissenschaften, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2014.
- [28] G. M. Bonnema, I. F. Lutters-Weustink und Jau-regui-Becker, Juan, "A decade of teaching systems engineering to Bachelor students," in *SoSE and cyber physical systems (CPS), from academia to application and back: 2016 11th Systems of Systems Engineering Conference (SoSE)*, IEEE : June 12-16, 2016, Kongsberg Kunnskap og kulturpark, Kongsberg, Norway, Kongsberg, Norway, 2016, pp. 1–6.