

»White Paper Series«

Innovative research impulses shaping the future of logistics

Das Digitale Kontinuum

Impressum

Autoren

Michael ten Hompel
Jana Jost
Sören Kerner
Marco Motta
Anike Murrenhoff
Christopher Reining
Sebastian Wibbeling

Herausgeber

Prof. Dr.-Ing. Alice Kirchheim
Prof. Dr. Michael Henke
Prof. Dr.-Ing. Uwe Clausen

Internet

Das White Paper steht Ihnen auch im Internet unter www.inkl.fraunhofer.de/veroeffentlichungen zur Verfügung.

DOI

10.24406/publica-4922

Kontakt

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2 – 4
44227 Dortmund
schriftenreihe@inkl.fraunhofer.de

Bildquelle Titelbild:

valenster – stock.adobe.com

Vorwort

Innovative research impulses shaping the future of logistics

Die White Paper-Reihe »Innovative research impulses shaping the future of logistics« greift aktuelle Herausforderungen und Zukunftstrends in der Logistik auf, beleuchtet neue Technologien sowie Geschäftsmodelle und treibt damit die Diskussion in Wissenschaft und Managementpraxis voran.

Die Ausgaben der White Paper-Reihe inspirieren grundlegende Entwicklungen im Rahmen eines innovativen, effizienten und nachhaltigen Zukunftsbildes von Logistiksystemen als den Kernelementen einer innovativen Wirtschaft, das vom Austausch der Akteure aus Forschung, Praxis und weiteren Stakeholdern profitiert. Das IML dient in dieser Form als Netzwerkknoten für Technologie, Wissen und Innovation in internationalen Wertschöpfungsketten, ganz nach dem Motto »100% Logistik!«.

In einer Ära, die durch unvorhersehbare globale Herausforderungen geprägt ist, gewinnt die strategische Resilienz-Transformation von Wertschöpfungsnetzwerken zunehmend an Bedeutung. Die Erfahrungen aus vergangenen Krisen haben gezeigt, dass Resilienz von Lieferketten nicht länger als optionales Element betrachtet werden darf. Das vorliegende White Paper greift die aktuellen Herausforderungen auf und gibt Akteuren des Supply Chain Managements Werkzeuge an die Hand, um ihre Netzwerke widerstandsfähiger und anpassungsfähiger zu gestalten. Es bietet praxisnahe Handlungsempfehlungen, die von Resilienzforscher*innen am Wissenschaftsstandort Dortmund erfolgreich umgesetzt werden und unterstützt Unternehmen dabei, in einer komplexen und volatilen Umwelt zukunftsicher zu agieren.



Inhalt

Management Summary	6
Das Digitale Kontinuum: Eine neue Ära der Künstlichen Intelligenz in der Wertschöpfung	7
Verschmelzung der physischen und digitalen Welt	8
Technologische Voraussetzungen	10
Perspektiven des Digitalen Kontinuums	11
Perspektive Supply Chain	11
Perspektive Social Network	12
Perspektive Technik	13
Generalistische Roboter als Anwendungsbeispiel der Perspektiven und Social Network	14
Wirtschaftliche und gesellschaftliche Effekte	16
Fazit und Ausblick	17
Literaturverzeichnis	18



Managementzusammenfassung

/ Management Summary

In einer Zeit rasanter technologischer Entwicklungen im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) stellt das Digitale Kontinuum einen Paradigmenwechsel in der Logistik dar. Durch die Verschmelzung physischer und digitaler Realitäten entsteht ein selbstoptimierender Regelkreis, in dem KI nicht mehr nur analysiert und unterstützt, sondern aktiv handelt, Entscheidungen trifft und Prozesse gestaltet. Getrieben von einer neuen Generation autonomer KI-Agenten und vernetzter Systeme vollzieht sich ein Strukturwandel hin zu hochadaptiven, resilienten und nachhaltig skalierbaren Wertschöpfungsnetzwerken.

Das Digitale Kontinuum geht über bestehende Digitalisierungsansätze hinaus, indem es Datenverfügbarkeit, Simulation, Echtzeitsteuerung und autonome Entscheidungen zu einem durchgängigen, dynamischen System zusammen führt. Die daraus resultierenden Potenziale, beispielsweise in der Entwicklung generalistischer Roboter, der flexiblen Gestaltung globaler Lieferketten oder der Mensch-Technik-Interaktion markieren nicht nur eine technologische, sondern auch eine soziale und wirtschaftliche Transformation. KI wird zum gleichberechtigten Akteur, zum Partner des Menschen, zur Steuerungsinstanz komplexer Systeme.

Dieses White Paper zeigt unterschiedliche Perspektiven und Zugänge zum Konzept des Digitalen Kontinuums auf – aus Sicht der Supply Chain, des Social Networks in Logistikzentren und der Technik, d. h. der Verbindung von Hard- und Software. Es formuliert technologische Voraussetzungen, skizziert praxisnahe Anwendungsfelder und leitet Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft ab. Neben Effizienzgewinnen und Resilienzsteigerung birgt das Digitale Kontinuum auch Herausforderungen im Hinblick auf Datenschutz, Regulierung, Interoperabilität und geopolitische Rahmenbedingungen.

Die Etablierung des Digitalen Kontinuums als neues Gestaltungsparadigma ist kein rein technologisches Unterfangen. Sie erfordert strategisches Denken, interdisziplinäre Kooperationen und offene Innovationskulturen. Der Wissenschafts- und Innovationsstandort Deutschland kann hier eine führende Rolle einnehmen, insbesondere durch die Verbindung von KI-Exzellenz und führender logistischer Kompetenz.

/ In times of rapid technological developments in the field of artificial intelligence (AI), the digital continuum represents a paradigm shift in logistics. Merging physical and digital realities is creating a self-optimizing control loop in which AI no longer just analyses and supports. Rather, it actively acts, makes decisions and shapes processes. Driven by a new generation of autonomous AI agents and networked systems, a structural change is taking place towards highly adaptive, resilient and sustainably scalable value creation networks.

The digital continuum goes beyond existing digitalization approaches by integrating data availability, simulation, real-time control and autonomous decisions into an end-to-end, dynamic system. Its potential, for example in the development of generalist robots, the flexible design of global supply chains or human-technology interaction, marks not only a technological transformation, but also a social and economic one. AI is becoming an equal player, a partner to humans, an authority in the control of complex systems

This white paper presents various perspectives and approaches to the concept of the digital continuum – from the perspective of the supply chain, the social network in logistics centers and technology, i.e. the connection of hardware and software. It formulates technological requirements, outlines practical fields of application and derives implications for the economy and society. In addition to efficiency gains and increased resilience, the digital continuum also poses challenges in terms of data protection, regulation, interoperability and geopolitical framework conditions.

Establishing the digital continuum as a new design paradigm is not a purely technological undertaking. It requires strategic thinking, interdisciplinary cooperation and open innovation cultures. Germany as a location for science and innovation can play a leading role here, particularly by combining AI excellence with leading logistics expertise.

Das Digitale Kontinuum: Eine neue Ära der Künstlichen Intelligenz in der Wertschöpfung

»Die Digitalisierung von allem und die Künstliche Intelligenz in allem wird alles für uns alle ändern.«
Diese unsere Headline aus dem Jahr 2019 wird Realität. Wir befinden uns an der Schwelle zu einem umfassenden Digitalen Kontinuum – Künstliche Intelligenz (KI) wird die Welt verändern. Wir stehen vor einem »Deus ex machina-Moment«.
Michael ten Hompel

In der Logistik wird diese Entwicklung besonders sichtbar. Die Vielfalt der Akteure in logistischen Netzwerken führt zu einer hohen Komplexität der Prozesse. Um logistische Systeme sinnvoll zu gestalten und zu steuern, sind große Datenmengen zu verarbeiten und mitunter gegensätzliche Ziele miteinander zu vereinbaren. Die von ihren lokalen Zielen getriebenen Akteure sind dabei größtenteils autonom – seien es Unternehmen, die Entscheidungen mit Auswirkungen auf die gesamte Supply Chain treffen, oder autonome Roboter in einem intralogistischen System, die vom Start- zum Endpunkt eines Transportauftrags navigieren. Autonome, dezentrale Entscheidungsfindung sorgt zwar für eine Reduktion der jeweiligen Entscheidungs Komplexität und befähigt die Teilnehmenden, basierend auf ihnen lokal verfügbaren Informationen, zu agieren. Doch häufig entsprechen die so ermittelten Lösungen nicht dem bestmöglichen Ergebnis für das Gesamtsystem. Bedingt durch Komplexität und Ressourcenbeschränkungen, wie zur Verfügung stehende Zeit und Rechenkapazität, kommen oft Vereinfachungen und Heuristiken zum Einsatz. Ihre Ergebnisse erscheinen unmittelbar plausibel, sind jedoch oftmals weit vom Optimum entfernt. Um zumindest einen Teil der Komplexität logistischer Systeme in Entscheidungen einfließen zu lassen und Lösungsvarianten miteinander zu vergleichen, werden diese häufig simuliert. Das Fachwissen und die Intuition von Expert*innen hat hierbei maßgeblichen Einfluss auf das Design und die Ergebnisse der Simulationsstudien. Durch die Entwicklung neuer Technologien eröffnen sich derzeit bahnbrechende Möglichkeiten, die autonome Entscheidungsfindung in der Logistik zu revolutionieren. Insbesondere die rasante Entwicklung der Künstlichen Intelligenz treibt die Branche voran. Eine neue Generation, die agentenbasierte KI, wird zum **aktiv handelnden** Element und Partner. Die

Logistik als bewegende und verbindende Instanz wird hierbei eine entscheidende Rolle spielen. Einerseits wird eine »Social Networked Industry« entstehen, in der Menschen und KI-Agenten partnerschaftlich planen und zusammenarbeiten. Andererseits werden (und das ist entscheidend) autonome KI-Software-Agenten Lieferketten und Wertschöpfungsnetzwerke zu einem Digitalen Kontinuum verbinden – vom intelligenten Ladungsträger über humanoide Roboter bis zu KI-Plattformen. Dies wird eine grundlegende Veränderung in der gesamten Logistik, vom Supply Chain Management, über intralogistische Umgebungen wie Lager und Umschlagszentren, bis hin zur Robotik mit sich bringen. Anwendungsübergreifend werden digitale Abbilder der Realität Grundlage dafür sein KI-basierte Steuerungsentscheidungen zu ermitteln. Ebenso werden KI-Methoden eingesetzt, um digitale Abbilder zu erstellen, sie an die physische Realität anzupassen und beide Welten letztendlich zu verschmelzen. Eine zunehmend enge, quasi nahtlose Verbindung zwischen der physischen und der digitalen Welt entsteht, in der die digitalen Abbildungen die steuernde Instanz sind – Taktgeber für ihre physischen Gegenstücke. Durch die fortlaufende Annäherung des digitalen Abbilds an die Realität und die stetig neu erlernten Verhaltensweisen und Entscheidungen auf einer immer genaueren Datenbasis entsteht ein hochbeschleunigter, sich fortwährend selbst optimierender Regelkreis Künstlicher Intelligenz – das Digitale Kontinuum.

Das Digitale Kontinuum ist so die logische und erwartbare Fortentwicklung bestehender Digitalisierungsparadigmen:

- von einer **Industrie 4.0** mit ihren cyberphysischen Systemen und Digitalen Zwillingen
- über das **Industrial Metaverse** als virtuelle Umgebung für industrielle Anwendungen und ihre Simulation
- hin zum **Digitalen Kontinuum**, in dem autonome KI-Agenten aktiv handeln und Wertschöpfungsnetzwerke und Lieferketten zu einem Kontinuum verbinden.

Dieses White Paper hat das Ziel, die theoretischen Grundlagen, technologischen Voraussetzungen sowie die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Implikationen des Digitalen Kontinuums zu analysieren.

Verschmelzung der physischen und digitalen Welt

Das Digitale Kontinuum entsteht, wenn sich physische und digitale Realität zu einem selbstoptimierenden, KI-gesteuerten Regelkreis verbinden und wechselwirkend miteinander interagieren [1].

Die nahtlose Verbindung von physischer und digitaler Realität im Digitalen Kontinuum lässt einen fortwährenden Regelkreis entstehen. Die physische Realität bezeichnet dabei das System, in dem autonome Agenten aktiv handeln, sei es das physische logistische System oder das steuernde Software-System. Die digitale Realität bezeichnet das digitale Abbild dieses Systems, beispielsweise ein Simulationsmodell, in dem das Lernen und Testen neuer Steuerungslogiken der KI-Agenten erfolgen kann.

Abb. 1 zeigt den Regelkreis eines Digitalen Kontinuums. Informationen über die physische Umgebung werden beispielsweise über Sensoren wahrgenommen und an ein digitales Systemmodell übertragen, das als digitaler Zwilling dient. Durch diesen Input aus der Realität kann das Modell durch KI-Agenten so realitätsnah wie für den Anwendungsfall erforderlich aufgebaut werden, sodass das Modell als digitale Realität betrachtet wird. Innerhalb dieser digitalen Realität können Simulations- und Trainingsläufe durchgeführt und vorteilhaftes Systemverhalten der einzelnen Akteure in einer Vielzahl an Zukunftsszenarien so ermittelt werden, dass es für das Gesamtsystem sinnvoll ist. Um sicherzustellen, dass die erlernten Verhaltensweisen die Absichten der Systementwickler abbilden und auch in bisher unbekanntem Situationen angemessen reagieren, wird das Verhalten vor der Übertragung an die physische Realität in vielen verschiedenen Umgebungen der digitalen Realität getestet. Anschließend kann der angepasste Code, der das Verhalten abbildet, z. B. die Gewichte neuronaler Netze, in die physische Realität übertragen werden. Die Auswirkungen der neu implementierten Steuerungs- und Entscheidungslogik im physischen System werden wiederum von Sensoren wahrgenommen, durch

KI-Agenten interpretiert und eine Aktualisierung an die digitale Realität weitergegeben. Es entsteht eine kontinuierliche, hochkomplexe und dynamische Feedbackschleife, die es dem System ermöglicht, eigenständig ein immer besseres Verhalten und immer genauere digitale Systemmodelle zu finden.

Dieser Prozess ermöglicht es einerseits, KI-Agenten in der digitalen Realität so zu trainieren, dass sie autonomen Systemen in der physischen Realität befähigen, stetig komplexere Entscheidungen zu treffen und sich an variierende Systemzustände anzupassen. Andererseits kommen KI-Agenten zum Einsatz, um den Regelkreis des Digitalen Kontinuums selbst zu steuern. Dabei werden die Fähigkeiten von Basismodellen der KI, wie beispielsweise LLMs, genutzt. Sie erkennen und reflektieren eigenständig Verbesserungspotenziale in den Abläufen. Dadurch werden neue Lernprozesse in der digitalen Realität automatisiert angestoßen. Durch den Einsatz moderner KI-Agenten erreichen Logistiksysteme ein neues Maß an Eigenständigkeit: permanent bestimmen und testen sie wünschenswertes, autonomes Verhalten in der digitalen Realität, seien es Navigationsentscheidungen eines Roboters oder Verhandlungen zu Beschaffungskonditionen auf Supply Chain Ebene und können das Erlernte ohne Unterbrechung in der realen Welt anwenden.

Die permanente Adaption im Regelkreis des Digitalen Kontinuums umfasst den gesamten Lebenszyklus eines logistischen Systems. Dadurch verschwimmen Entwicklungs-, Planungs- und Betriebsphasen, wie sie klassischerweise durchlaufen werden.

Die Entscheidungen, die das Verhalten eines Systems bestimmen sowie die passenden Reaktionen auf Veränderungen im physischen System werden in der digitalen Welt getroffen, wodurch digitale Modelle zu Treibern physischer Prozesse werden.

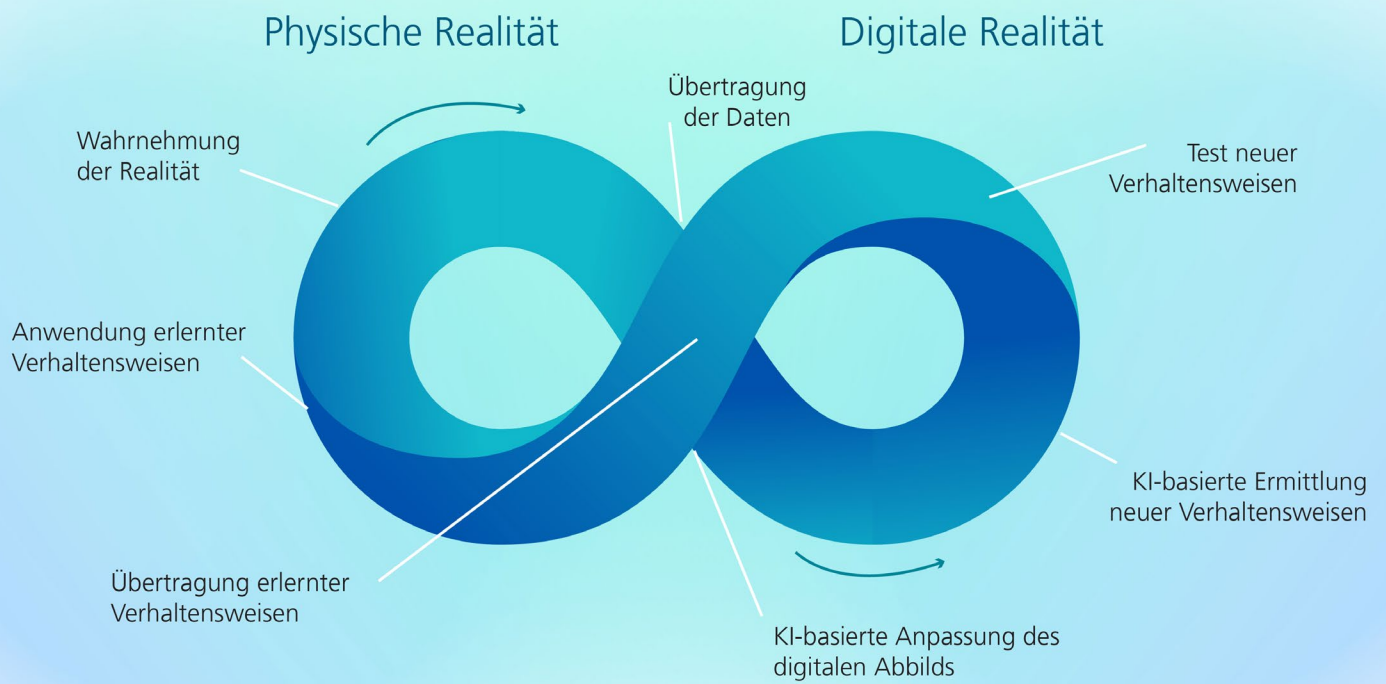


Abb. 1: Nahtlose Verschmelzung der physischen und digitalen Welt zum Digitalen Kontinuum

Technologische Voraussetzungen

Die Realisierung des Digitalen Kontinuums setzt den Einsatz einer Reihe an Schlüsseltechnologien voraus:

Künstliche Intelligenz: Fortschrittliche KI-Agenten schließen das Digitale Kontinuum zu einem selbstoptimierenden Regelkreis. Bisherige Virtualisierungskonzepte und KI-Workflows weisen noch Unterbrechungen in der Verbindung zwischen physischer und digitaler Realität auf: so sind bei Störfällen in komplexen Umgebungen, bei der Synchronisation des digitalen Modells mit der physischen Realität, bei der Definition von Lernaufgaben und Erstellung von Experimentierplänen sowie beim Übergang von der Entwicklungs- zur Betriebsphase immer wieder manuelle Eingriffe in den Regelkreis notwendig. Aktuelle Entwicklungen wie [2] zeigen, dass die Fähigkeit neuester generativer KI-Algorithmen, komplexe Zusammenhänge zu erfassen und Kontexte zu interpretieren, dazu genutzt werden kann, diese Lücken zu schließen. Die KI-Agenten können dabei sowohl in intelligenten Robotern in einer betrieblichen Umgebung physisch aktiv handeln, als auch als Software-Agenten in Cloud-Plattformen Entscheidungen zur Steuerung der logistischen Systeme treffen und aktiv ausführen.

Internet of Things (IoT) und 5G/6G-Technologie: Echtzeit-Datenverarbeitung und Kommunikation zwischen Maschinen sind essenziell für eine reibungslose Vernetzung der physischen mit der digitalen Realität und somit für die Realisierung des Digitalen Kontinuums.

Edge-Computing und Cloud-Infrastrukturen: Dezentrale Rechenkapazitäten sorgen für eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und Verfügbarkeit von KI-Diensten. Die intelligente Entscheidungsfindung im laufenden Prozess in einer logistischen Umgebung wird durch Edge-Computing ermöglicht, während rechenintensive Trainings- und Testläufe in Cloud-Infrastrukturen laufen können. So entsteht eine kontinuierliche Datenverarbeitungsinfrastruktur zwischen der physischen und digitalen Realität.

Blockchain und Smart Contracts: Vertrauenswürdige und automatisierte Transaktionsmechanismen gewährleisten Sicherheit und Nachvollziehbarkeit. Dies ist insbesondere bei der Integration verschiedener Akteure einer Supply Chain im Digitalen Kontinuum von großer Bedeutung.

Souveräne Datenräume: Um die kontinuierliche Verfügbarkeit von Daten an den Stellen des Digitalen Kontinuums sicherzustellen, sind souveräne Datenräume essenziell. Um die Akzeptanz dieser Datendurchgängigkeit zu erreichen, muss die Datensouveränität der einzelnen datenbereitstellenden und -konsumierenden Wertschöpfungspartner sichergestellt werden. Weitere Voraussetzungen sind Datenstandards und/oder leistungsfähige Daten-Mapper zur Herstellung einer inhaltlichen Durchgängigkeit zwischen Datenräumen mit unternehmensspezifischer Semantik der Daten.

Perspektiven des Digitalen Kontinuums

Das Digitale Kontinuum umfasst sämtliche Prozesse und Systeme der Logistik: von der globalen Betrachtung ganzer Lieferketten und Produktlebenszyklen bis hin zu (smarter) Sensorik und Aktorik auf lokaler Ebene. Die Betrachtungsebenen gehen dabei kontinuierlich ineinander über und die digitalen Modelle ermöglichen eine skalenübergreifende Betrachtung der Systeme je nach Use Case. So können sowohl Roboter als auch die Materialflusssysteme und Supply Chains, in denen sie arbeiten, gleichzeitig analysiert und optimiert werden. Dies ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung und verbessert die Abstimmung zwischen den verschiedenen Systemkomponenten.

Im Folgenden werden drei Perspektiven auf das Digitale Kontinuum vorgestellt, die Zugänge zu diesem Konzept aufzeigen. Die Perspektiven orientieren sich an den Aggregationsebenen logistischer Systeme, von der Supply Chain über Produktions- und Intralogistiksysteme bis hin zur Technikebene (vgl. [3], [4]).

Perspektive Supply Chain

Die Supply Chain Perspektive des Digitalen Kontinuums stellt die standort- und unternehmensübergreifende Ebene der realen und digitalen Supply Chain dar. Planungs- und Steuerungselemente des Supply Chain Managements in der realen Welt verbinden sie mit ihren digitalen Abbildern,

wie in Abb. 2 dargestellt. Das Digitale Kontinuum ermöglicht, KI-basierte Entscheidungen autonomer Akteure in der Supply Chain auf Echtzeit- und Prognosedaten in der digitalen Realität zu erlernen und eigenständig in der Realität auszuführen. Anwendungsbeispiele für das Supply Chain Kontinuum sind kollaborative und szenariobasierte Planungsmethoden im Bedarfs- und Kapazitätsmanagement inklusive der autonomen Verhandlung von Entscheidungsgrundlagen zwischen Wertschöpfungspartnern oder logistische Assistenzsysteme zur Schaffung und Nutzung von Transparenz im unternehmensübergreifenden Materialfluss. Der Mensch nimmt in dieser Perspektive zukünftig die Rolle ein, langfristige Planungsziele und Handlungsspielräume vorzugeben, an denen KI-Anwendungen die Güte ihrer Entscheidungen ausrichten können oder kann über Assistenzsysteme in die Entscheidungsfindung eingebunden werden.

Insbesondere die kontinuierliche Verfügbarkeit von Daten entlang der Partner einer Supply Chain ist eine wichtige Eigenschaft des Digitalen Kontinuums für diese Perspektive, um den agierenden KI-Agenten die volle Transparenz zur Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

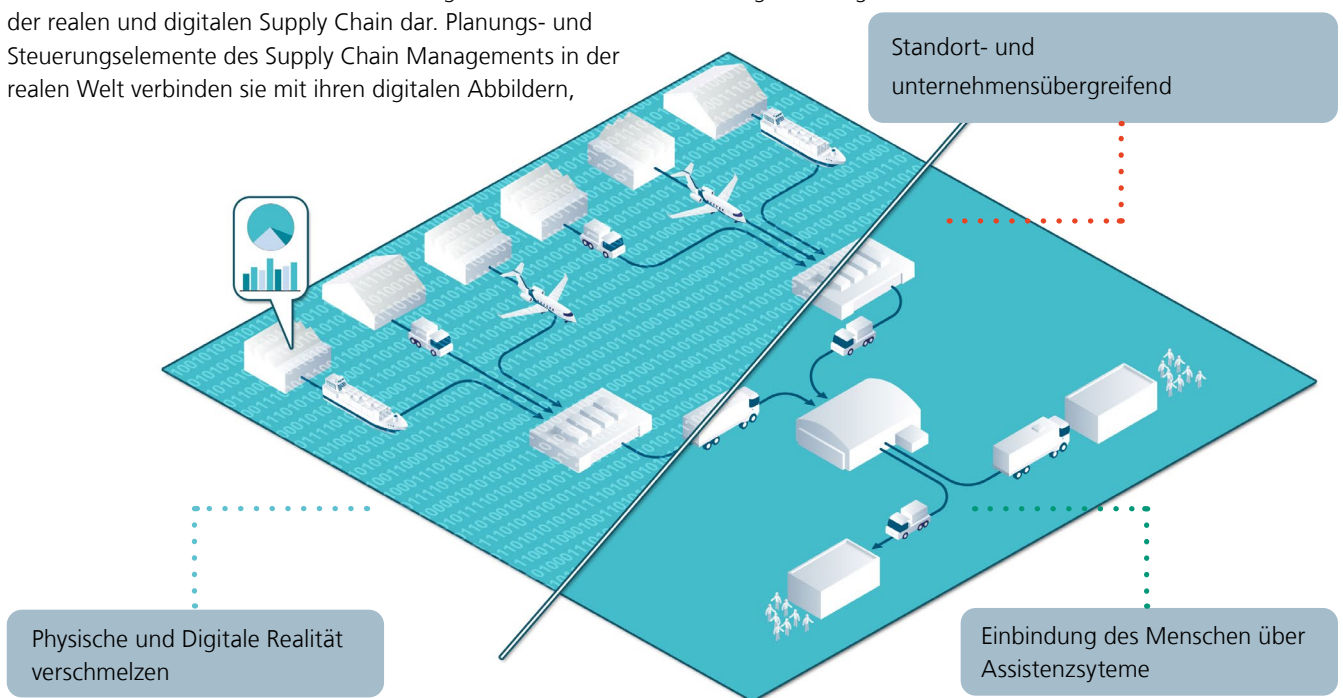


Abb. 2: Die Perspektive Supply Chain auf das Digitale Kontinuum

Perspektive Social Network

Die Social Networked-Perspektive des Digitalen Kontinuums zeigt die Perspektive der Entscheidungsfindung und Bestimmung von Verhaltensweisen für die logistische Leistungserbringung in Produktions- und Logistiksystemen – egal ob beim Transport, beim Umschlag oder bei der Lagerung.

Abb. 3 zeigt, dass der Mensch in diesen Systemen sowohl informationstechnisch als auch physisch als Akteur eingebunden ist. Dies stellt besondere Herausforderungen an die Abbildung der physischen Realität in der digitalen Realität sowie an die Lösungen der Interaktion zwischen Menschen und autonomer Technologie. Beispiele für diese Systeme sind das Social Networked Warehouse oder auch Schwärme autonomer Transportroboter, die untereinander und mit Menschen interagieren. In der Social Networked Perspektive kann das Gesamtsystem aus Technik und Menschen realitätsnah in der digitalen Realität abgebildet und prädiziert werden, sodass echtzeitnahe Steuerungsentscheidungen getroffen werden können, die dann in der physischen Realität umgesetzt werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Routenplanung autonomer Transportroboter, die gemeinsam mit Menschen im logistischen System arbeiten. Um die Routenplanungen in der digitalen Realität durchzuführen

und dabei die Belastbarkeiten und Leistungsfähigkeiten der Menschen einbeziehen zu können, sodass die Ergebnisse in der Realität umgesetzt werden können, müssen insbesondere menschliche Verhaltensweisen realitätsgetreu abgebildet werden können. Dazu kann die Modellierung des Systems in der digitalen Realität durch reale Daten angereichert und das Modell durch KI-Verfahren verbessert werden. Individuelle Belastbarkeit und Leistungsfähigkeit des Menschen können so abgebildet und in die Planung eingebunden werden. Da der Mensch auch Aufgaben übernehmen kann, die nicht zuvor in der digitalen Realität geplant wurden, ist er eine größere Variable als die Technologie. Wirkzusammenhänge von Mensch und Technik können auf Basis von vergangenen Daten erlernt, in Zukunftsszenarien dargestellt und so in Planungen beachtet werden.

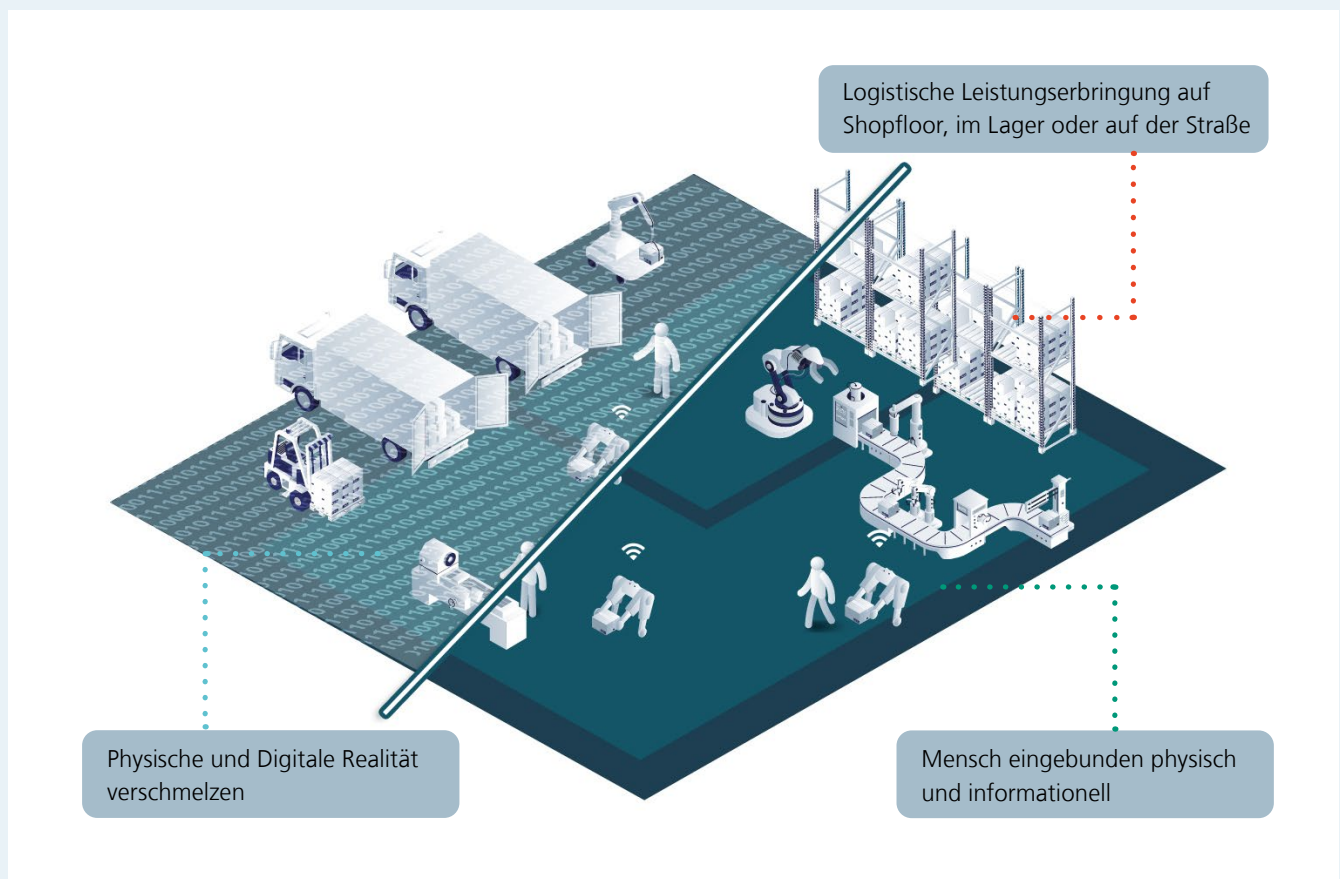


Abb. 3: Die Perspektive Social Network auf das Digitale Kontinuum

Perspektive Technik

Abb. 4 stellt die Verbindung von Hardware und Software auf Systemebene in der physischen und der digitalen Realität als technische Perspektive des Digitalen Kontinuums dar. Schlüsseltechnologie für dieses Kontinuum ist die exakte Abbildung des cyber-physischen Systems als Modell einer Physiksimulation – einem simulationsbasierten Digitalen Zwilling. Moderne holistische Physiksimulationen sind dabei in der Lage, in Echtzeit Aktoren und Sensoren mit einem derart geringen Modellfehler zu simulieren, dass das Programm eines CPS nicht mehr unterscheiden kann, ob es das reale System oder das Modell steuert. Die Simulation wird dabei zur führenden Instanz und somit die Hardware des Systems zum cyber-physischen Zwilling. Bereits in der Entwicklungsphase des cyber-physischen Systems können Design- und Steuerungsentscheidungen in der digitalen Realität, also der Simulation, abgebildet und getestet werden, bevor sie in der physischen Realität umgesetzt werden. Es folgt damit ein Paradigmenwechsel von der simulationsgestützten hin zu einer simulationsbasierten Entwicklung. Die rein modellbasierte Entwicklung von Systemen schließt einen kontinuierlichen Zyklus der Entwicklung für Algorithmen der KI.

Eine mögliche Ausprägung ist das Robotik-Kontinuum, in dem autonome Roboter Aufgaben wie Antriebsregelung, Lokalisierung, Navigation, Objekterkennung und Kollisionsvermeidung kontinuierlich und in geschlossenen Regelkreisen erlernt und angewendet werden. Die Simulation der Umwelt dient hierbei als Validierung und Regulation der Entwicklung. Daten können dabei sowohl aus der realen als auch der digitalen Welt stammen. Die kontinuierlich aktualisierte Abbildung der realen in der digitalen Realität ist somit der Nukleus eines Technik-Kontinuums, doch vor allem die kontinuierliche Evolution des Systems im Digitalen Kontinuum bietet den entscheidenden Vorteil in der Anwendung. Menschenbezogene Kennwerte und Daten können synthetisch in der Digitalen Realität erzeugt werden und sind somit für das Training von Algorithmen nicht personenbezogen.

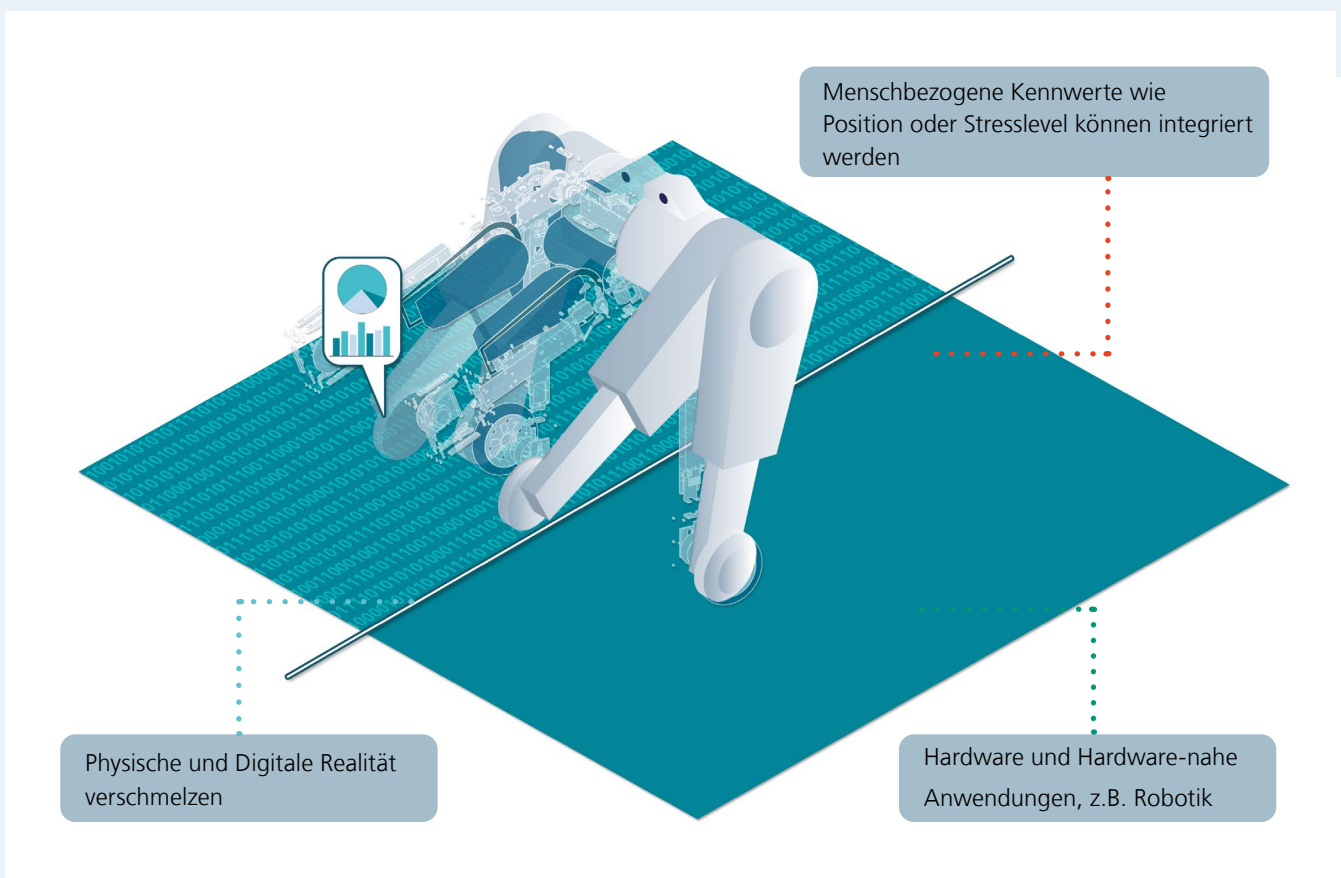


Abb. 4: Die Perspektive Technik auf das Digitale Kontinuum

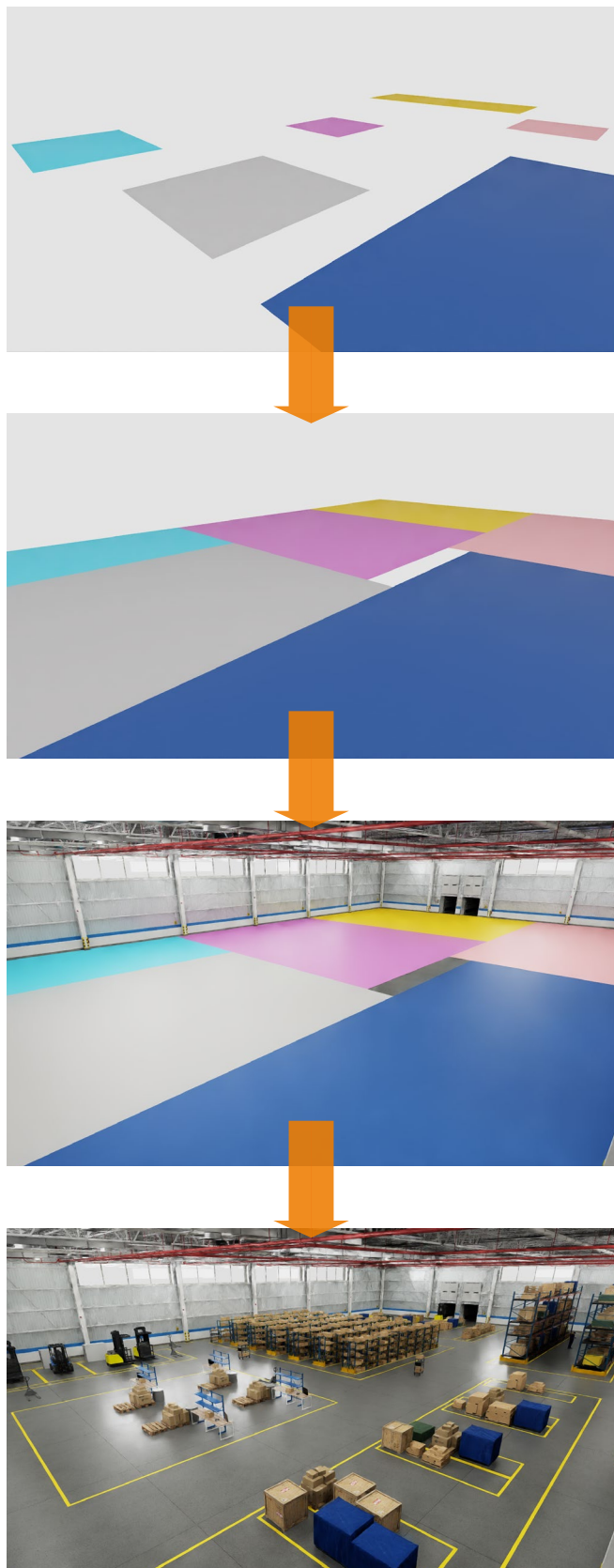


Abb. 5: Prozedurale Generierung von variantenreichen Lern- und Testumgebungen für generalistische Roboter in Materialflusssystemen

Generalistische Roboter als Anwendungsbeispiel

Das Digitale Kontinuum ermöglicht die Realisierung einer neuen Generation intelligenter, aktiv handelnder KI-Agenten. Im Folgenden wird am Beispiel der Entwicklung und des Betriebs generalistischer Roboter in logistischen Umgebungen wie Lagern und Umschlagszentren gezeigt, wie die Prinzipien des Digitalen Kontinuums in den Perspektiven Technik und Social Network zum Einsatz kommen.

Die Entwicklung generalistischer Roboter ist eines der erklärten Ziele der Robotik-Forschung (z. B. [5], [6]). Im Vergleich zu spezialisierten Robotern, die heutzutage häufig zur Automatisierung abgesteckter, repetitiver Tätigkeiten im Einsatz sind, beherrschen generalistische Roboter eine breite Palette an Aufgaben und Anwendungen. Sie zeichnen sich durch ihre Fähigkeit aus, verschiedene Aufgaben in unterschiedlichen Umgebungen auszuführen und sich flexibel an neue Gegebenheiten anzupassen. Durch diese Eigenschaften sind generalistische Roboter ideal für den Einsatz in logistischen Systemen geeignet: die Struktur der Systeme und die abzuwickelnden Produkte verändern sich je nach aktueller Geschäft- und Marktlage dynamisch und die durch Roboter zu übernehmenden Aufgaben sind vielseitig. Sie können Transport-, Lagerungs- und Handhabungsaufgaben im Materialfluss übernehmen, mit Menschen zusammenarbeiten oder bei der Inventur unterstützen [7]. Die mit generalistischen Robotern verbundenen Erwartungen verstärken die Aufmerksamkeit von Anwendern und Forschern zu aktuellen Entwicklungen rund um das Thema humanoide Robotik.

Die Entwicklung und der robuste Betrieb generalistischer Roboter ist nicht trivial: Um sich an verändernde Umgebungen und Aufgaben anpassen zu können, müssen sie die Fähigkeit besitzen, basierend auf den ihnen zur Verfügung stehenden Informationen autonom zu entscheiden. Dies erfordert fortschrittliche KI-Modelle, insbesondere aus den Bereichen des Reinforcement Learning. Dabei benötigen generalistische Roboter riesige Datenmengen aus unterschiedlichen Szenarien, um vielseitige Aufgaben zu lernen und generalisieren zu können. Auch aufgrund eines Mangels an Regularien und Leitfäden ist die Sammlung qualitativ hochwertiger Daten für bestimmte Anwendungen schwierig, vor allem in komplexen Umgebungen wie logistischen Systemen.

An dieser Stelle unterstützt das Digitale Kontinuum durch das Verschmelzen von physischer und digitaler Realität.

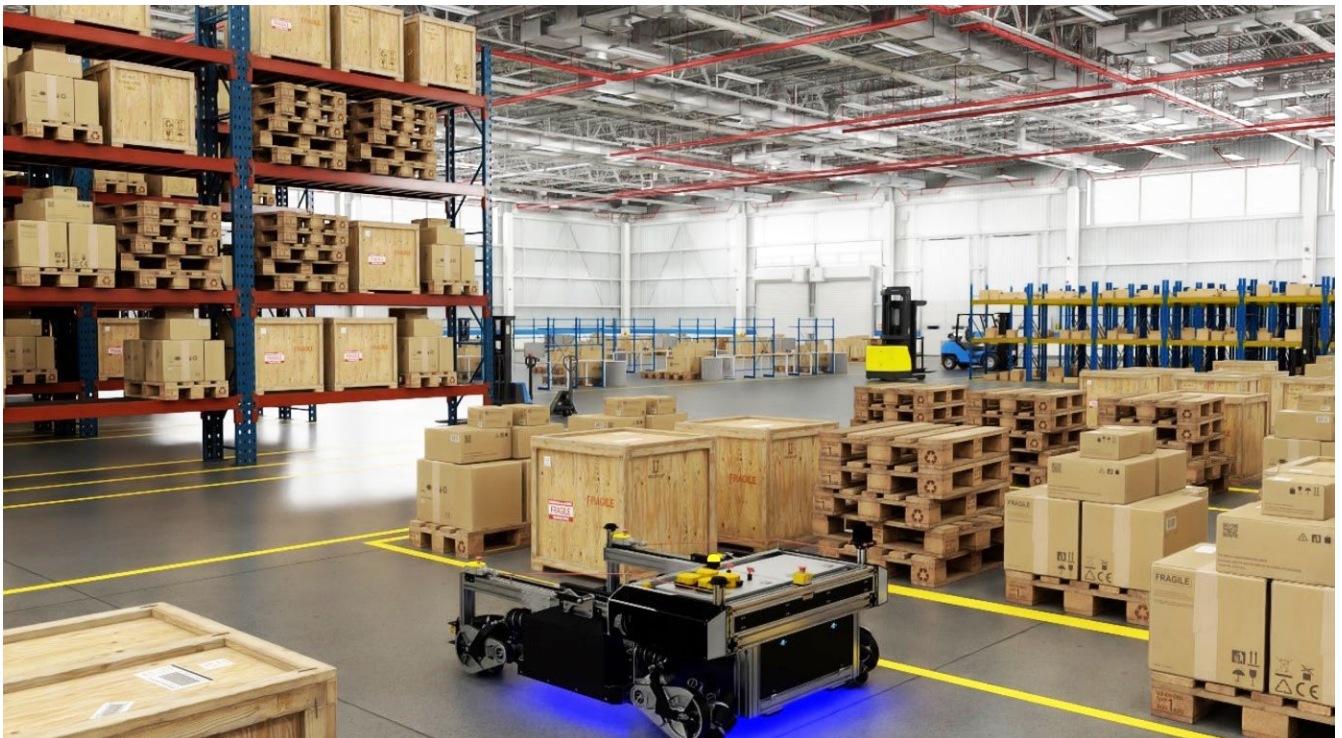


Abb. 6: Roboter in der Simulationsumgebung der digitalen Realität

Durch die digitale Abbildung der Roboter sowie des gesamten logistischen Systems, in dem sie arbeiten, wird ein digitales, sehr realitätsnahes Entwicklungs- und Testfeld erschaffen, in dem Hardwareentscheidungen getestet und Steuerungsverhalten entwickelt und erlernt werden können. Ein Vorteil liegt darin, dass Fehler in der digitalen Entwicklungsumgebung keine physischen Schäden bewirken. Außerdem werden die Entwicklungszyklen beschleunigt: In der digitalen Realität kann eine Vielzahl unterschiedlicher Lern- und Testumgebungen generiert werden, in denen das Lernen selbst beschleunigt und die Generalisierungsfähigkeit der erlernten Verhaltensweisen der Roboter im logistischen System gesteigert wird. Dadurch werden die Roboter robust gegenüber variablen Gegebenheiten und auf den Einsatz in der komplexen, wenig vorhersehbaren Realität logistischer Systeme vorbereitet.

Ein Beispiel für die Generierung dieser Lern- und Testumgebungen ist in Abb. 5 zu sehen. In diesem Beispiel werden automatisch viele variable Struktur- und Lastvarianten intralogistischer Systeme generiert. Die generierten Umgebungen weisen einen hohen Detailgrad auf, sodass autonome, auf Sensordaten basierende Algorithmen für robotisches Verhalten in diesen Umgebungen erlernt werden können (siehe Abb. 6). Die hohe Realitätsnähe der Simulationsumgebung in Kombination mit der Varianz der Umgebungsparameter erleichtern das Schließen der Lücke zwischen Simulation und Realität [89]. Die so entwickelten Verhaltensweisen, zum einen des Roboters und zum anderen auch intelligenter KI-Agenten, die das gesamte logistische

System steuern, können anschließend in die physische Realität übertragen werden.

Die digitale Realität begleitet den Roboter sowie das logistische System dabei nicht nur während der Entwicklungsphase, sondern kontinuierlich über ihre gesamten Lebenszyklen. Während das physische System aufgebaut wird, wird die digitale Realität kontinuierlich aktualisiert. Dadurch kann auch die Inbetriebnahme der Systeme beschleunigt werden, denn Risiken und Störungen können bereits in der digitalen Realität bewertet werden. Im weiteren Verlauf des Lebenszyklus können dann durch das enge Zusammenspiel von physischer und digitaler Realität fortlaufend Anpassungen sowohl der Hardware, als auch der Steuerungslogik des Systems entwickelt, getestet und angewendet werden. Durch den Einsatz von KI-Verfahren, die auf Sensordaten der Roboter basieren, können die physikalischen Eigenschaften der Realität wie z.B. Reibwerte, kontinuierlich in der digitalen Realität aktualisiert werden. Ebenso werden strukturelle Veränderungen, wie die Umlagerung von Ladeeinheiten oder der Umbau von Lagerbereichen, KI-basiert erkannt und in das digitale Abbild übernommen. Durch die Integration von Informationen aus der Supply Chain ist es außerdem möglich, passende Steuerungslogiken für mögliche Zukunftsszenarien zu erlernen – sowohl die der generalistischen Roboter als auch die des gesamten logistischen Systems.

So bietet die digitale Realität stets ein aktuelles Lern- und Testfeld für KI-Agenten und bietet so die Grundlage für hochadaptive logistische Systeme.

Wirtschaftliche und gesellschaftliche Effekte

Die Einführung des Digitalen Kontinuums wird weitreichende Veränderungen in Wirtschaft und Gesellschaft mit sich bringen:

Geschlossene, beschleunigte (Entwicklungs-) Prozessketten

Das Zusammendenken von physischer Anwendung und digitaler Abbildung sorgt für eine Beschleunigung der Prozesse von der Entwicklung und Planung bis zur Umsetzung logistischer Systeme bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung. Die Durchgängigkeit von physischer und digitaler Realität mit dem Potenzial der Simulation realer Anwendungen ermöglicht die effiziente Entwicklung von Algorithmen und Hardware, da diese keinen Unterschied zwischen physischer und digitaler Realität erkennen. KI-Verfahren und die verfügbare Rechenleistung ermöglichen es, diese Prozesse zu parallelisieren und Verbesserungen zu erlernen.

Resilienz der Wertschöpfung

Das Digitale Kontinuum steigert die Transparenz über komplexe Prozesse auf allen Ebenen des Wertschöpfungssystems maßgeblich, von der Supply Chain bis auf die technische Ebene. In Verbindung mit förderierten Datenplattformen ist dies der Weg, auf Basis von Transparenz kollaborative Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz zu entwickeln und umzusetzen. Gleichzeitig ermöglicht das Verschmelzen der virtuellen und realen Welt, sich proaktiv auf verschiedene Störungsszenarien der Wertschöpfung vorzubereiten und Gegenmaßnahmen vorausschauend zu implementieren.

Nachhaltig skalierbare logistische Systeme

Die Reaktionsfähigkeit, die die autonomen Akteure durch das Digitale Kontinuum erlangen, können zudem einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit der Wertschöpfung haben. Auch wenn das Digitale Kontinuum selbst Ressourcen benötigt, so ist doch von einem Nutzen für die Nachhaltigkeit auszugehen, da sich die entstehenden hochadaptiven Systeme individuell an die Bedarfe des logistischen Systems anpassen können, sodass Verschwendungen und Überdimensionierungen vermieden

werden. Einer ökologisch und ökonomisch optimalen Gestaltung, Planung und Steuerung der Wertschöpfung wird so der Weg bereitet.

Veränderung der Arbeitswelt

Im Digitalen Kontinuum wird der Mensch zunehmend zum Partner autonomer Roboter und KI-basierter Softwareagenten sowie zum Dirigenten digitaler Lösungen. Er arbeitet eng mit intelligenten Technologien zusammen, die sich dynamisch an seine individuellen Bedürfnisse und Situationen anpassen können.

Herausforderungen im Datenschutz und in der Regulierung

Für die Realisierung des Digitalen Kontinuums sind unternehmens- und länderübergreifende Regelungen sowie ein organisierter Datenaustausch erforderlich. Förderierte Datenräume und die dahinterstehenden Initiativen spielen eine zentrale Rolle, um einen sicheren und vertrauenswürdigen Datenverkehr zu ermöglichen.

Open Source als Treiber

Um die technologischen Herausforderungen des Digitalen Kontinuums zu meistern, ist die Entwicklung und Nutzung von Open-Source-Lösungen essenziell. Unternehmen müssen bei der Schaffung gemeinsamer Standards und Basiskomponenten kooperieren. Darauf aufbauend kann jedes Unternehmen seine eigenen Wettbewerbsvorteile (USPs) entwickeln.

Geopolitischer Wettbewerb

Protektionistische Tendenzen stehen im Widerspruch zu den Grundprinzipien des Digitalen Kontinuums. Statt Abschottung erfordert dieses Paradigma Offenheit, Kooperation und den freien Austausch von Daten und Technologien über nationale Grenzen hinweg.

Fazit und Ausblick

Das Digitale Kontinuum stellt eine tiefgreifende Transformation in der industriellen und logistischen Wertschöpfung dar. Durch den Einsatz autonomer KI-Agenten und die Integration vernetzter Systeme entsteht eine neue Generation der digitalen Steuerung und Prozessoptimierung. Das Digitale Kontinuum ist die Grundlage für eine nachhaltige High-Tech-Logistik und Supply Chain Management von morgen. Es beschleunigt Planungs-, Entwicklungs- und Realisierungsprozesse, indem es Planungs- und Ausführungsphasen ineinander verschwimmen lässt. Dadurch werden betriebliche Erfahrungen und Erkenntnisse unmittelbar für die Weiterentwicklung zugänglich. Der Aufbau und die anschließende Nutzung des Digitalen Kontinuums führt zu hochadaptiven Systemen, die sich wechselnden Anforderungen und Systemlasten resilient anpassen.

Die erfolgreiche Umsetzung und Nutzung erfordert interdisziplinäre Kooperationen, gezielte Investitionen in Schlüsseltechnologien und die Schaffung regulatorischer Rahmenbedingungen. Zukünftige Forschungsarbeiten beschäftigen sich neben der praktischen Implementierung ebenfalls mit den Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt sowie den ethischen Fragestellungen im Kontext des Digitalen Kontinuums.

Die notwendigen nächsten Schritte sind die verstärkte Integration der Prinzipien des Digitalen Kontinuums in Unternehmen und die Schaffung einer entsprechenden Infrastruktur. Dazu ist es wichtig, dass Unternehmen ihre Prozesse und Systeme an die Digitalisierung anpassen und die nötigen Technologien implementieren.

Für Deutschland und Europa ist die Entwicklung und Anwendung des Digitalen Kontinuums von entscheidender Bedeutung. Angesichts der aktuellen Dominanz der USA und Chinas in der KI-Entwicklung und -Anwendung ist es unabdingbar, dass Deutschland und die EU aufholen. Besonders vielversprechend ist die Investition und Anwendung in einem Bereich, in dem Deutschland derzeit noch eine Führungsposition innehat: den vernetzenden Querschnittsfunktionen der Logistik. Dieser Schritt wird nicht nur die Wettbewerbsfähigkeit stärken, sondern auch dazu beitragen, die Zukunft der High-Tech-Industrien in Europa aktiv zu gestalten.



Literaturverzeichnis

[1] Schmidt M. (2022): "Simulation-based AI" and the 'digital continuum,". Jahresber. 2022 Fraunhofer-Inst. Für Mater. Logist. IML.

[2] Zhou X. u.a. (2023): Towards Generalist Robots: A Promising Paradigm via Generative Simulation. version: 3. DOI: 10.48550/arXiv.2305.10455. arXiv: 2305 . 10455[cs]. URL: <http://arxiv.org/abs/2305.10455>.

[3] Pfohl H.-C. (2025): »Logistiksysteme: betriebswirtschaftliche Grundlagen« 10., Aktualisierte und Überarbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg. doi: 10.1007/978-3-662-69936-2.

[4] Gudehus T. (2012): Logistik 1: Grundlagen, Verfahren und Strategien. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-29359-7.

[5] Xian Z., Gervet T., Xu Z., Qiao Y.-L., Wang T.-H., Wang Y. (2023): "Towards Generalist Robots: A Promising Paradigm via Generative Simulation," doi: 10.48550/arXiv.2305.10455.

[6] McCarthy R., Tan D., Schmidt D., Acero F., Herr N., Du Y., Thuruthel T., Zhibin L. (2024): "Towards Generalist Robot Learning from Internet Video: A Survey", <http://arxiv.org/abs/2404.19664>.

[7] Fragapane G., de Koster R., Sgarbossa F., Strandhagen J. (2021): "Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda," in European Journal of Operational Research 294.2: 405-426.

[8] Zhao W., Queralta J. P., Westerlund T. (2020): "Sim-to-Real Transfer in Deep Reinforcement Learning for Robotics: a Survey," in 2020 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), pp. 737–744. doi: 10.1109/SSCI47803.2020.9308468.



Kontakt

Fraunhofer-Institut für Materialfluss
und Logistik IML

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4
44227 Dortmund
www.ima.fraunhofer.de