

Interoperabilität
der Industrie 4.0

Die digitale Integration von Brownfield-Anlagen

Inhalt

Über die Autor:innen	3
1 Motivation	4
2 Brownfield-Anlagen und deren Bedeutung in der aktuellen Wirtschaft	5
3 Das 4 Klassen-Schema der Digitalisierung	7
3.1 Digitalisierungsstufe 1a: Beobachtung	9
3.2 Digitalisierungsstufen 1b: Pipe	10
3.3 Digitalisierungsstufe 2: Controller	11
3.4 Digitalisierungsstufe 3: Vernetzte Systeme / Einbindung in Prozess-Netzwerke	13
4 Informatische Hintergründe	16
4.1 Was sind Informationen? Was ist Bedeutung?	16
4.2 Wie beschreiben wir die Verarbeitung von Informationen?	17
4.3 Was sind Daten?	18
4.4 Semantische Interoperabilität	19
4.5 Digitaler Zwilling und Künstliche Intelligenz	20
5 Kurze Zusammenfassung und Ausblick	23

Über die Autor:innen



Johannes Reich arbeitet bei der SAP SE als Standardarchitekt im Bereich IoT und Industrie 4.0. Dem Vorsitz des Bitkom Arbeitskreis Industrie 4.0 Interoperabilität gehört er seit 2020 an und wurde 2022 zum Sprecher gewählt. Sein Schwerpunkt liegt dabei auf Standardisierungsstrategie und semantischer Interoperabilität, zu der er mehrere Publikationen veröffentlicht hat u.a. hat er das Referenzmodell für Komponenteninteraktionen für die VDI-Richtlinie 2193 "Semantik und Interaktion für I4.0-Komponenten" beigesteuert



Gerd Ludwig ist Gründer und Geschäftsführer der INTEC International GmbH. Seit Beginn an ist er aktiv im Bitkom in diversen Arbeitskreisen u.a. im Vorstand AK Messen und Events und später in den Arbeitskreisen Industrie 4.0 Interoperabilität und Industrie 4.0 Märkte und Strategien. Im Unternehmen liegt der Schwerpunkt auf der Digitalisierung der Produktion in mittelständischen Unternehmen mit Leistungen und Produkten.



Christian Ludwig ist in der INTEC International GmbH als Geschäftsführer und Unternehmensnachfolger tätig. Seit 2015 ist er aktiv im Bitkom in den Arbeitskreisen für Industrie 4.0 – Interoperabilität und – Märkte & Strategien. Dort arbeitete er unter anderem als Co-Autor für das Faktenpapier „Geschäftsmodelle in der Industrie 4.0“ mit. Seit 2019 gehört er dem gewählten Hauptvorstand des Bitkoms an.



Christian Heinrich ist Software-Entwickler und Consultant bei der XITASO GmbH. Durch eine Vielzahl an Kundenprojekten in der Fertigung und der Produktionsautomation kennt er die Herausforderungen bei der Digitalisierung der Unternehmen sowohl bei der Neuentwicklung als auch beim Ausbau bestehender Anlagen.



Angelina Marko ist Fachreferentin Industrie 4.0 & Technische Regulierung beim Bitkom e.V. Nach ihrem Studium der Produktionstechnik an der TU Berlin war sie ab 2016 beim Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen- und Konstruktionstechnik IPK im Fachgebiet Füge- und Beschichtungstechnik als Wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig. Seit 2022 betreut sie im Bitkom e.V. u.a. die Gremien Industrie 4.0 Markt & Strategie und Interoperabilität. Hier konzipiert, organisiert und moderiert sie Gremienveranstaltungen, ist verantwortlich für die thematische Weiterentwicklung der Gremien sowie deren inhaltliche Positionierung innerhalb und außerhalb des Bitkom.

1 Motivation

Unsere Motivation ist es Fach- und Führungskräften auch ohne dedizierten informatischen Hintergrund einen verständlichen Leitfaden an die Hand zu geben, mit dem sie die Herausforderungen der Integration von Bestandsanlagen in digitalisierte Prozesse („Brownfield“-Integration) besser verstehen und für sich bewerten können.

Die Digitalisierung der Industrie zur Verbesserung der regionalen sowie globalen Wettbewerbsfähigkeit ist seit Jahren ein wichtiges Thema. Häufig stößt man in der Verwirklichung solcher Projekte auf technische und wirtschaftliche Hürden. Eine große Herausforderung bildet hier die heterogene Produktionslandschaft, die sowohl aus neuen kommunikativen Systemen als auch aus älteren Anlagen besteht.

Der vorliegende Leitfaden dient vor allem dem besseren Verständnis der Integration von bewährten Maschinen und Anlagen in die moderne kommunikative Industrielandschaft.

Die Leitgedanken dieses Leitfadens lassen sich mit den folgenden drei Fragen zusammenfassen:

1. Wie können wir die konzeptuellen Herausforderungen bei der Digitalisierung von Brownfield-Anlagen besser verstehen?
2. Wie können die Hürden zur Einbindung von Brownfield-Anlagen verringert und abgebaut werden?
3. Welche neuen Geschäftsmöglichkeiten können durch Digitalisierung im Bestand geschaffen werden?

Dabei ist es uns wichtig, dem Eindruck entgegenzuwirken, mit Einführung einer elektronischen Kommunikation werde alles „anders“: etwa in dem Sinne, dass die bekannten Dokumente verschwinden, nun alles „Service-orientiert“ werden müsse oder ohne „digitalen Zwilling“ gar nichts mehr laufe, usw. Das ist nicht der Fall. Natürlich hat die Informatik ihre Besonderheiten, aber im Großen und Ganzen beschreibt diese, als Ingenieursdisziplin verstanden, reale Systeme und ihre Interaktionen. Diese Tatsache wird häufig durch immer neue Vokabeln für altbekannte Dinge verdeckt. Insbesondere letzteres ist zu bedauern, weil es tatsächlich zum einen die Verständigung, auch unter Fachleuten, erschwert und zum anderen es deutlich schwieriger macht, wirklich Neues auch als solches zu erkennen.

Mit diesem Dokument wollen wir diese von uns beobachteten Hürden verkleinern, indem wir einerseits die IT gewissermaßen „entzaubern“ und andererseits auf ihre durchaus wichtigen Besonderheiten hinweisen, soweit sie für ein besseres Verständnis der Integration von IT-Systemen relevant erscheinen.

Heterogene
Produktionslandschaft
aus neuen und alten
Anlagen als
Herausforderung der
Industrie 4.0

2 Brownfield-Anlagen und deren Bedeutung in der aktuellen Wirtschaft

In der Software-Entwicklung ist der Begriff Brownfield bereits 2008 durch Hopkins und Jenkins¹ eingeführt worden. Mit dem Begriff wird das Problem beschrieben, wie neue Systeme in bereits bestehende Strukturen und Architekturen implementiert werden können. Wir verstehen unter Brownfield-Anlagen gewachsenen Produktionslandschaften, die alte bis hochmoderne Maschinen, Anlagen und weitere Produktionsstätten enthalten. Diese sind aus Sicht der Kommunikation nicht digitalisierte stand-alone bis vernetzte Systeme.

Eine wesentliche Erkenntnis der Digitalisierung ist, dass Wertschöpfung nicht bloß durch zusätzliche Produkte oder Dienste entsteht, sondern auch ganz wesentlich durch deren Vernetzung. Im Sinne der Nachhaltigkeit, aber auch zur Steigerung der ökonomischen Effektivität und Effizienz, ist es daher angesichts der rasanten technologischen Entwicklung wichtig, auch alle Möglichkeiten der nachträglichen oder ergänzenden Digitalisierung von Bestandsindustrie zu nutzen. Es geht also bei der Brownfield-Digitalisierung nicht unbedingt nur darum, alte durch neue Maschinen zu ersetzen, sondern die vorhandenen Wertschöpfungspotentiale der Vernetzung auch im Brownfield-Bereich zu erschließen.

Wenn es um zusätzliche Integration geht, kann ansonsten der moderne Maschinenpark von früher schnell zur Altlast werden. Da insbesondere die Integration von Systemen in Gestalt neuer Prozessteilnehmer in bestehende Prozesse in der Regel eine Modifikation dieser Prozesse erfordert, stellt ein solches Projekt erhebliche Anforderungen an die Anpassbarkeit der beteiligten Bestandssysteme. Der Nutzen einer zusätzlichen Vernetzung von Brownfield-Anlagen rechtfertigt jedoch gewisse Investitionen. Uns geht es darum, ein besseres Verständnis für die sehr differenzierten Arten der Vernetzung zu erzeugen, die auch mit sehr unterschiedlichem Aufwand verbunden sein können, so dass diese Kosten-Nutzen-Abwägung bei Investitionsentscheidungen besser getroffen werden können.

Der ständige Produktivitätsfortschritt stellt Unternehmen vor neue Herausforderungen, um weiterhin ihre Marktführerschaft ausbauen und am Markt bestehen zu können. Hier ist nun wichtig, die Veränderung der Kommunikation innerhalb eines produzierenden Unternehmens zu betrachten: Ursprünglich hat ein Mensch ein Werkstück bearbeitet und nach Fertigstellung an die nächste Bearbeitungsstation weitergegeben. Wenn während des Produktionsvorgangs ein Fehler am Werkzeug oder Produktionsmechanismus (in diesem Fall der Mensch selber) aufgetreten ist, hat er dies dem nächsten Entscheidungsträger gemeldet. Die Kommunikation verlief also von Mensch zu Mensch. Im Laufe der Zeit wurden immer mehr Systeme zur Herstellung der Güter eingesetzt, doch meistens hat nach wie vor ein Mensch diese Systeme und Maschinen betreut und überwacht. Sobald Änderungen

Der moderne Maschinenpark von früher kann bei der Integration schnell zur Altlast werden.

¹ Hopkins, R., & Jenkins, K. (2008). Eating the IT elephant: moving from greenfield development to brownfield. Addison-Wesley Professional.

oder Störungen an der Maschine aufgetreten sind, hat der betreuende Mensch diese weitergegeben oder auch selbst behoben. Die Kommunikation verlief in der Regel nach wie vor von Mensch zu Mensch und von Mensch zu Maschine, indem die Arbeitsanweisungen und Einstellungen händisch an die Maschine übergeben wurden. Durch den technischen Fortschritt betreut heute ein Mensch jedoch nicht mehr nur eine Maschine, sondern ist für viele Maschinen und Anlagen zuständig. Um das zu unterstützen, gibt es bereits eine Vielzahl an eingebauten Mechanismen, damit die Maschine mittels Signalen kommunizieren kann. Die Kommunikationsstufe von Maschine zu Mensch besteht also heute auch schon.

Um den Anforderungen des Wettbewerbs gerecht zu werden und die Produktivität weiterhin steigern zu können, muss als nächster Schritt die Kommunikation von Maschine zu Maschine und von Maschine zu Business-IT funktionieren.

Dabei ist es jedoch wichtig zu verstehen, dass manche Prozesse derzeit nicht digitalisierbar sind. Der Digitalisierungsschritt muss eventuell an dieser Stelle erst einmal weiterhin von einem Menschen übernommen werden.

3 Das 4 Klassen-Schema der Digitalisierung

Das Resultat unserer Betrachtungen ist das 4 Klassen-Schema der Digitalisierung. So lassen sich anhand zweier sehr einfacher Kriterien verschiedene Anwendungsfälle insgesamt 4 Klassen zuordnen. Diese Kriterien beziehen sich zum einen auf den Informationsfluss zwischen zwei Komponenten (in eine Richtung oder in beide Richtungen) und zum anderen auf die Frage, ob mit der Informationsverarbeitung eine übergeordnete Funktion entstehen soll.

Das Schema lässt sich kompakt in einem Entscheidungsbaum zusammenfassen, wie er in Abbildung 1 dargestellt ist.

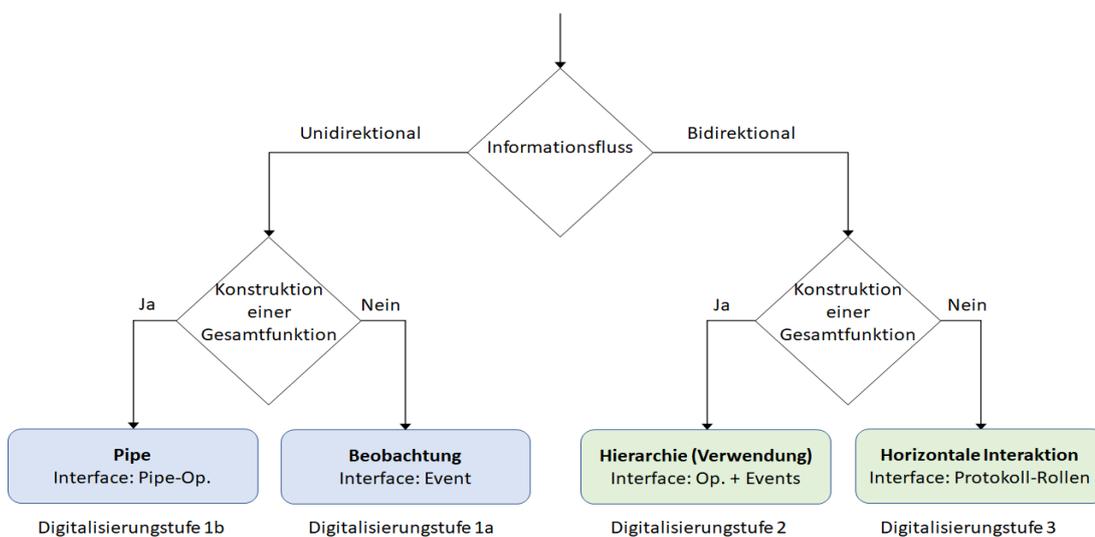


Abbildung 1: Entscheidungsbaum für die Wahl des Interfaces in Abhängigkeit vom Interoperabilitäts-szenario

Nach Verproben des gewünschten Szenarios lassen sich so die folgenden vier Klassen für Anwendungsfälle bestimmen:

- **Beobachtung:** Reine Datenerfassung, bei der die „beobachtende“Komponente für die Funktion der „beobachteten“ Komponente irrelevant ist und auch keine Gesamtfunktion entsteht.
- **Pipe:** Transport der Daten nur in eine Richtung, jedoch wird bei den hintereinander geschalteten Komponenten der Datenverarbeitung die Herstellung einer Gesamtfunktion aus den Teilfunktionen der Einzelkomponenten angestrebt.
- **Hierarchie:** Fluss von „sensorischen“ Informationen von der Maschine zur Steuerung sowie von Steuersignalen an die Maschine, wobei eine Hierarchie entsteht: Die Maschine gesteuert und damit Teil eines übergeordneten Systems.
- **Horizontale Integration:** Das zu integrierende System wird qua Prozessintegration ein gleichberechtigter Interakteur in einem (elektronischen) Interaktionsnetzwerk.

Unserer Einschätzung nach lassen sich diese 4 Klassen von Anwendungsfällen wiederum drei Komplexitätsstufen zuordnen, die in Abbildung 2 veranschaulicht werden.

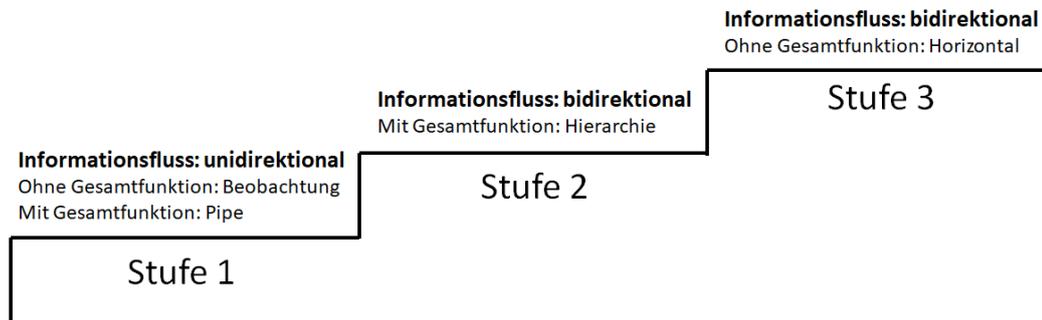


Abbildung 2: Die drei Komplexitätsstufen der Digitalisierung

Solange Informationen nur in eine Richtung fließen, wie in Stufe 1, sind die Anwendungsfälle konzeptuell vergleichsweise einfach. Fließen Informationen in beide Richtungen, dann entfaltet die Unterscheidung, ob es sich um ein hierarchisches Verwendungsverhältnis (Stufe 2) oder um die Einbindung in horizontale Interaktionen (Stufe 3) geht, bezüglich der konzeptuellen Komplexität des Anwendungsszenarios seine volle Wirkung.

Bei der Erstellung dieses Leitfadens, stützen wir uns bewusst auf die beiden folgende Studien als Grundlage zur Integration von Brownfield-Anlagen:

- Vorschlag zur systematischen Klassifikation von Interaktionen in Industrie 4.0 Systemen; Hinführung zu einem Referenzmodell für semantische Interoperabilität - White Paper (Bitkom & Plattform Industrie 4.0)
- Leitfaden Retrofit für Industrie 4.0: Neuer Nutzen mit vorhandenen Maschinen (VDMA in Kooperation mit Fraunhofer IOSB-INA)

Das Bitkom Whitepaper „Vorschlag zur systematischen Klassifikation von Interaktionen in Industrie 4.0 Systemen; Hinführung zu einem Referenzmodell für semantische Interoperabilität“ thematisiert die Grundlagen, die wir hier aufgreifen. Insbesondere nehmen wir dessen Anregung auf, zu den jeweiligen Szenarioklassen passende Sicherheitsmechanismen zu skizzieren.

Der VDMA Leitfaden „Retrofit für Industrie 4.0“ hingegen ist stärker darauf ausgerichtet, konkrete Anwendungsfälle zu beschreiben, Altanlagen „mittels sogenanntem Industrie 4.0-Retrofit funktional mit Sensorik und Kommunikationsschnittstellen aufzurüsten, um sie auf dieser Grundlage in Industrie 4.0-Produktionsumgebungen betreiben zu können.“ Tatsächlich lässt sich das vorgestellte Modell der drei Komplexitätsstufen als direkte Fortsetzung des VDMA Industrie 4.0-Retrofit-Stufenmodells verstehen. So lassen sich dessen untere Stufen inkl. der „intelligenten Zustandsüberwachung“ unserer Stufe 1a (Beobachtung) und dessen letzte Stufe „Aktionen“ sich unserer Stufe 2 (Hierarchie) zuordnen.

Durch die zunehmende Vernetzung und damit der Einbeziehung semiautonomer Maschinen in horizontale Interaktionsnetzwerke und die dadurch zusammenhängende Bedeutung von semantischen Protokollen, sehen wir hier eine Lücke in den bisherigen Studien, die wir mit unserem 4 Klassen-Schema der

Digitalisierung zu schließen versuchen. Unserer Ansicht nach ist die horizontale Einbindung von Maschinen konzeptuell noch einmal deutlich komplexer. Dies äußert sich nicht nur dadurch, dass diese IT-werkzeugseitig deutlich schlechter unterstützt wird, etwa mit der Bereitstellung von entsprechenden Interface-Repositories oder vorgegebenen Protokolldefinitionen „von der Stange“, sondern auch darin, dass heutige Applikationen nicht die für ihre aufwandsarme Realisierung notwendige „interaktionsorientierte Architektur“ aufweisen. Im Folgenden gehen wir daher im Detail auf die vier grundsätzlich unterschiedlichen Szenarienklassen ein, die wir als Digitalisierungsstufen 1a, 1b, 2 und 3 bezeichnen.

3.1 Digitalisierungsstufe 1a: Beobachtung

Die einfachste Beziehung zwischen zwei Systemen ist die Beobachtung. Hier fließt Information ausschließlich von dem beobachteten System zu dem Beobachter. Das beobachtete System kennt den Beobachter nicht und weiß auch nicht, wie dieser die übertragenen Informationen verarbeitet. Dieses Szenario ist für den Brownfield-Bereich besonders relevant, weil es besonders einfach ist und weil bereits durch wenige zusätzlich erhobene Daten ein großer zusätzlicher wirtschaftlicher Nutzen entstehen kann. Das beobachtete System muss allerhöchstens mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet werden, ansonsten bleibt es unverändert.

Da das beobachtete System seinen Beobachter nicht kennt, kann es nicht eigenständig seine Informationen auf irgendeinen Empfänger passend zuschneiden. Aus Sicherheitsicht kann das sendende System seine Informationen nicht ohne weiteres in Bezug auf mögliche konkrete Empfänger verschlüsseln. Es könnte aber sehr wohl mit einer digitalen Signatur dafür sorgen, dass jeder Empfänger die Authentizität und Unveränderbarkeit seiner Informationen überprüfen kann.

Eine typische Technologie zur Realisierung der Beobachtungsrelation ist „Publish-Subscribe“: Ein System stellt unaufgefordert seine Informationen in generischer Form an einer Stelle zur Verfügung und ein weiteres System kann, auch ohne dass es das informationsliefernde System mitbekommen kann, diese Informationen an eben dieser Stelle abrufen.

Anwendungsfall Brownfield

Ein Unternehmer will einen besseren Überblick über die Verfügbarkeit seiner Maschinen erhalten. Dazu bestückt er sie mit zusätzlichen Sensoren, die ihren Stromverbrauch messen. Die Informationen über den Stromverbrauch aller Maschinen, gemessen als Stromstärke in 10-Sekundenintervallen, werden zentral über einen Publish-Subscribe-Mechanismus gesammelt und in einer App visualisiert.

In diesem Anwendungsfall fließt tatsächlich keine Information zurück. Somit werden die verfügbaren Informationen durch den Menschen ausgewertet. Eventuelle Änderungen an den Maschinen werden daher auch nur durch den Menschen in einem anderen Kontext vorgenommen, also unabhängig von dem betrachteten Anwendungsfall.

Der beschriebene Anwendungsfall ist besonderes einfach wegen des ausschließlich unidirektionalen Informationsflusses und der Tatsache, dass die Interpretation der Informationen durch den Beobachter (Mensch) für den Beobachteten (Maschine) irrelevant ist, sich also die Frage nach der Gesamtverarbeitung nicht stellt.

Der wirtschaftliche Nutzen genauer Daten zur Verfügbarkeit der Maschinen kann ausgesprochen hoch sein, etwa weil sich damit frühzeitig bestimmte Unregelmäßigkeiten in der Produktion erkennen lassen, Wartungsintervalle besser bestimmt werden können oder auch Effizienzreserven auffindbar werden. Aber in diesem Szenario bleibt es dem Menschen vorbehalten, die Daten angemessen zu interpretieren, um anschließend steuernd in die Produktionsabläufe einzugreifen - was durchaus sehr anspruchsvoll sein kann: Nicht jede Verfügbarkeitsunterbrechung ist aus einer Gesamtperspektive beurteilt Ausdruck ökonomischer Ineffizienz.

An dieser Beobachtungsrelation ändert sich auch nichts Grundsätzliches, wenn sie sich über mehrere Stationen erstreckt oder wenn sie in den Bereich des „Big Data“ reicht. Sicherlich ist die Auswertung großer Datenmengen komplexer, was der noch recht jungen Disziplin der Data Science ihre Rechtfertigung verschafft. Unserer Erfahrung nach besteht die Herausforderung im Brownfield-Bereich aber häufig nicht so sehr im unstrukturierten Sammeln großer Datenmengen, sondern eher darin, gezielt die „richtigen“ Daten zu bestimmen.

3.2 Digitalisierungsstufen 1b: Pipe

Das Prinzip der Pipe findet sich etwa in einer Fertigungsstraße, in der ein Produkt über mehrere Stationen nacheinander verschiedene Transformationen durchläuft. In einer Pipe fließen, ebenso wie in der Beobachtung, die Informationen nur in eine Richtung. Allerdings liegt der Fokus dieser Interaktionsklasse hier in dem Aufbau einer Gesamtfunktion aus hintereinander auszuführenden Teilfunktionen. Für die Konstruktion der Gesamtfunktion ist es erforderlich, dass der Pipe-Konstrukteur die Funktion eines jeden Teilnehmers kennt. In einigen Programmiersprachen, etwa R, Shell-Skriptsprachen, etc., sind explizite Pipe-Operatoren vorgesehen.

Bei den Aufbau dieser Gesamtfunktion aus Teilfunktionen ist es dabei nicht relevant, ob sich die einzelnen Komponenten gegenseitig kennen. Es kann aber vorkommen, dass der eigentlich „innere“ Datenstrom einer Pipe von außen belauscht oder sogar manipuliert werden kann. Dieses Problem lässt sich mit kryptografischen Mitteln auf einer übergeordneten Ebene auf unterschiedliche Weise lösen. Z.B. kann man den übergeordneten Konstruktionsprozess der Pipe so modifizieren, dass jede Pipe-Komponente bei ihrem Einbau das übergeordnete Wissen um ihren tatsächlichen Nachfolger erhält. Eine weitere Möglichkeit besteht in einer Konstruktion der Pipekomponenten, bei der sie bei ihrem Einbau mit einem symmetrischen Schlüssel ausgestattet werden, den auch alle anderen Pipekomponenten erhalten haben.

Anwendungsfall Brownfield

Die Daten, die bei einer Beobachtung anfallen, sollen automatisiert in mehreren Prozessschritten verarbeitet werden, z.B. zunächst gefiltert, dann mit weiteren Daten angereichert und anschließend abgespeichert werden.

In der Fertigung ist dieses Prinzip in der Fertigungsstraße, die aus mehreren Stationen besteht, schon heute weit verbreitet. IT-gestützt könnte dieses Prinzip zusätzlich Anwendung finden, etwa wenn der Output von einer Maschine mittels eines Robotersystems zu einer weiteren Maschine geliefert werden soll.

Wie in echten Fertigungsstraßen ist natürlich auch denkbar, dass sich der Informationsfluss an einer Stelle aufspaltet, also parallelisiert, und an einer anderen Stelle wieder zusammengeführt wird. Solange es keinen Informationsfluss zurück gibt, bleibt das Szenario weiterhin vergleichsweise einfach..

3.3 Digitalisierungsstufe 2: Controller

Ab der Digitalisierungsstufe 2 fließen Informationen zwischen Komponenten in beide Richtungen. Damit werden diese Anwendungsfälle deutlich komplexer.

Der Controller steht für ein System, das andere Systeme sowohl beobachten als auch steuern kann, also einen geschlossenen Regelkreis implementiert. Wir nennen diese hierarchische „Ist-Teil-von“-Beziehung zwischen dem Controller, seinen Aktoren und Sensoren auch anschaulich „Verwendung“. In diesem Sinne „verwendet“ ein Controller etwa seine Sensoren und seine Aktoren. Er bekommt von seinen Sensoren Informationen über seine Umgebung und steuert seine Aktoren so, dass er seine Ziele erreichen kann. Die Beziehung zwischen dem Controller und seinen Teilen ist demnach asymmetrisch.

Sicherheitstechnisch „kennt“ der Controller sowohl die Sensoren als auch die Aktoren, diese kennen ihn hingegen nicht. Da ein Aktor immer nur vom Controller angesprochen wird, könnte dieser dem Aktor nämlich bei jeder Ansprache auch einen Schlüssel mitgeben, mit dem dieser ggfs. seine Rückantworten zu verschlüsseln hat.

Anwendungsfall Brownfield

Wir setzen das Beispiel aus Digitalisierungsstufe 1a fort: Unser Unternehmer hat in einem ersten Schritt sich einen besseren Überblick über die Verfügbarkeit seiner Maschinen verschafft. Eine Analyse hat gezeigt, dass die Gesamtauslastung seines Maschinenparks sich signifikant verbessern würde, wenn die Einschaltzeiten vorgezogen werden und die Aufwärmphase vor Arbeitsbeginn schon beendet wäre. Die Idee ist, dazu die jetzigen Einschalter durch WLAN-gesteuerte elektronische Schalter zu ersetzen, die sich über ein elektronisches Interface von einem zentralen Controller steuern lassen, der schon die Betriebsdaten der Maschinen erhält.

Die weitere Evaluierung des Projektes ergab folgendes Ergebnis: Der Umrüstaufwand der Schalter sowie die Erweiterung des Softwareteils der neuen Lösung waren vergleichsweise günstig. Erste Versuche ergaben jedoch, dass das annähernd gleichzeitige Anschalten aller Maschinen zu einer Überlastung des Stromnetzes führen würde. Ein Problem, das recht leicht zu beheben war. Deutlich schwerer wog allerdings die überraschende Erkenntnis, dass gerade beim Anlaufen der Maschinen häufig Unregelmäßigkeiten auftraten. Diese ließen sich durch Mitarbeiter in der Regel schnell beseitigen, wenn diese schon vor Ort waren. So zeigten sich kaum Auswirkungen auf die Produktion. Ein unbeobachtetes Anlaufen endete hingegen verhältnismäßig häufig in Fehlerzuständen, die in ihrer Behebung sehr aufwändig waren.

Die Entwicklung dieser Fehlerzustände ließ sich aber durch einen weiteren Sensor, der den initialen Materialzufluss monitorte, und der zusätzlich an den Maschinen anzubringen war, leicht erkennen, so dass in diesem Fall die vorzeitige Inbetriebnahme einfach abgebrochen wurde und die Mitarbeiter per Email von dieser Ausnahmesituation entsprechend informiert wurden.

Dieses Beispiel soll mehrere Dinge illustrieren:

- Interaktionen, in denen Informationen in beide Richtungen fließen, sind nicht einfach eine Kombination aus Interaktionen, in denen Informationen jeweils nur in eine Richtung fließt.
- Wer eine Änderung des Zustand der Welt zu verantworten hat, muss sich auch um die Situationen kümmern können, die den Ausnahmefall betreffen. Es gilt Aktionen festzulegen, wenn die gesteuerten Teile nicht so funktionieren, wie sie sollen.
- Controller bauen ist komplizier und nimmt in der Komplexität in Abhängigkeit der angesteuerten Funktionalität zu. Auch hinter offensichtlich einfach wirkenden Funktionen, wie z.B. einer „an/aus“-Steuerung, können sich sehr komplexe Vorgänge verbergen. Deren Komplexitätsgrad kommt u.U. im Falle eines Fehler „ausnahmsweise“ zum Vorschein. In einer Ausnahme- bzw. Fehlersituation sind wir als einfache Anwender in der Regel überfordert und sind gezwungen, den Techniker zu rufen.
- Der „Ausnahme“-Mechanismus ist das geeignete Mittel, die Fiktion des Funktionierens im einfachen Fall aufrecht zu erhalten, ohne über das Knowhow der Problemlösung aller komplexen Fälle zu verfügen. Wichtig ist hier nur, die

sichere Feststellung des einfachen Falls, bzw. die sichere Detektion der „Ausnahme“-Bedingung. Deren Berücksichtigung auf der Prozessebene kann dann Prozessen auf höheren semantischen Schichten überlassen werden.

- Noch eine Bemerkung zur Beschreibung des Informationsflusses in hierarchisch aufgebauten Systemen: Hier muss man aufpassen, die richtigen Komponenten zu betrachten, Das ist ähnlich dem Stromfluss: Niemand würde sagen, dass zwischen einem Auto als Ganzem und einem Rücklicht als seinem Teil Strom fließt, sondern nur zwischen der Batterie als Teil des Autos und dem Rücklicht, ebenfalls Teil des Autos.
- Tatsächlich können Informationen in hierarchischen Systemen nur in Interaktionen zwischen Systemen gleicher Hierarchiestufe ausgetauscht werden, weil es gerade diese Interaktionen sind, die zur Bildung der übergeordneten Supersysteme führen. Und gerade das Interface der Operation repräsentiert nicht den Informationsfluss, sondern die hierarchische Komposition².

3.4 Digitalisierungsstufe 3: Vernetzte Systeme / Einbindung in Prozess-Netzwerke

Unter der dritten Digitalisierungsstufe verstehen wir die „horizontale“ Einbindung von Systemen in das Netzwerk der verschiedenen betriebswirtschaftlichen Prozesse. Auch hier fließt Information in beide Richtungen zwischen den Beteiligten - im Gegensatz zum hierarchischen Fall lässt sich aber bezogen auf die Informationsverarbeitung keine semantische Richtung angeben, die sich auf die Gestalt des Interfaces auswirken würde.

Dabei handelt es sich um Systeme, die nach außen in ihren Interaktionen gewisse Entscheidungskompetenzen haben, also eine Expertisendomäne repräsentieren. Demnach sind hier nicht einzelne Aktoren oder Sensoren gemeint. Wir reden hier von Systemen in der Art eines „Toplevel-Controller“ oder eines ERPs, die eine bestimmte, koordinierende Aufgabe bis zu einem gewissen Grad selbstständig erledigen. Ein ERP unterstützt vielfältige Geschäftsprozesse und unterhält vielfältige Interaktionen zu anderen Systemen wie ein zusätzliches Planungssystem, ein Manufacturing Execution System, usw.

Für die horizontale Einbindung muss ein System in die Lage versetzt werden, sich gemäß der Spielregeln, die Protokoll-basierte Interaktionen ausmachen, zu verhalten. Wenn wir wollen, dass unser System in der Rolle „Schwarz“ in einem Schachspiel mitspielen soll, müssen wir es in die Lage versetzen, sich regelkonform zu verhalten. Im Fall des Schachspiels muss es die Figuren und die Brettgröße kennen, es muss wissen, dass die 8x8 Felder in einer Richtung mit Buchstaben und in der anderen Richtung mit Zahlen benannt werden, welche Figuren initial wo stehen, welche Züge erlaubt sind und wie es sich zu äußern hat, also welchen Transportkanal es zu verwenden hat und wie es seine Spielzüge formulieren muss, so dass der andere Spielende, in diesem Fall „Weiss“, diese entsprechend verstehen kann.

² J. Reich (2021) Komposition und Interoperabilität von IT-Systemen Informatik Spektrum 44:339–346. DOI: 10.1007/s00287-021-01376-6

In der Regel beinhaltet die „horizontale“ Einbindung eines neuen Systems in ein schon bestehendes Netzwerk verschiedener betriebswirtschaftlicher Prozesse allerdings nicht nur, dieses System in ein schon gegebenes Protokoll in einer vorgesehenen, noch freien Rolle zu integrieren. Sondern in der Regel bedeutet diese Form der Integration eines neuen Systems in „bestehende“ Geschäftsprozesse mit bestehenden Interaktionen ebenso, die bisher vorhandenen Prozesse modifizieren zu müssen.

Das betrifft sicherlich zumindest diejenigen Prozesse, die sich mit dem neuen System und dessen Prozessen auseinandersetzen sollen. Tatsächlich können aber auch weitere Prozesse indirekt betroffen sein, da sie nun an bestimmten Stellen weitere Informationen zur Verfügung stellen müssen.

Auch diese Form der Integration kennen wir alle aus unserem Alltag. Es entspricht dem Phänomen einer veränderten Aufteilung der Arbeit in nun neu abzugrenzenden Expertisendomänen. Bei einem kollegialen Ärztenetzwerk führt etwa die Einführung eines Radiologen zusätzlich zum Internisten und Chirurgen zu Veränderungen der bisherigen Arztrollen. Ebenso werden sich die Prozesse in einem Enterprise Resource Planning (ERP) System ändern, wenn zusätzlich etwa ein Customer Relationship Management (CRM) System eingeführt wird.

Ein weiteres System einzuführen, was eine eigene Entscheidungskompetenz mitbringt, bedeutet für die anderen Systeme ihre bisherigen Prozesse entsprechend anpassen zu müssen.

Insofern betrifft diese Integration nicht nur das „neue“ System, sondern entsprechend auch die „alten“ Systeme, was sie oft erstaunlich aufwändig macht - insbesondere wenn auch die alten Systeme von ihrer Architektur her nicht ohne weiteres die gewünschten Prozessänderungen aufwandsarm unterstützen.

Informatisch gesehen besteht das Problem darin, dass es bei ausformulierten Prozessfunktionen solcher komplexen Komponenten, etwa im Sinne eines Workflows, keine Garantien dafür gibt, dass kleine Änderungen in Interaktionsspielregeln auch nur

Anwendungsfall Brownfield

Ein Unternehmen lässt seine Maschinen von einem MES disponieren. Nun möchte das Unternehmen Maschinenausfälle möglichst frühzeitig erkennen und in seiner Disposition so berücksichtigen. Die vorhandenen Produktionsreserven sollen so eingesetzt werden, dass die Kundenaufträge möglichst störungsarm abgewickelt werden können. Die Maschinen selbst werden durch ein Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA)-System gesteuert.

kleine Änderungen in der Struktur der Prozessfunktion der Systeme zur Folge haben.

Das gewünschte Szenario läuft beispielhaft wie folgt: Die Eigenschaften und Qualitätsmerkmale der Produktionsanlagen sind schon bekannt und das MES erhält auch bisher schon zeitnah alle relevanten Daten aus der Produktion. Die

Produktionsaufträge kommen wie gehabt von der Business-IT, etwa einem ERP-System, in das Werk.

Das MES prüft, ob die Bedingungen für eine erfolgreiche Produktion aktuell vorliegen, reserviert die notwendigen Ressourcen und bestätigt ggfs. den Auftrag, Dann weist es den Auftrag der nächsten frei verfügbaren Maschine zu, die den Kriterien genügt, nennen wir sie Maschine 1, und die Produktion läuft an.

Nach der Hälfte der Produktion wird basierend auf den Produktionsdaten festgestellt, dass sich ein Maschinenausfall ankündigt. Um Materialausschuss vorzubeugen, prüft das MES, welche andere Maschine den Auftrag fertigstellen kann, so dass der Kundenauftrag im Plan fertig gestellt wird. Das MES sendet an die Maschine 1 die Aufforderung zur Beendigung der Produktion und die zuvor von der IT geprüfte und qualifizierte Maschine 2 erhält den Auftrag zur Restproduktion. Maschine 1 kann dann gewartet bzw. repariert werden.

Ein solches Szenarios lässt sich sehr unterschiedlich realisieren, in Abhängigkeit davon, wo man die „Intelligenz“ hineinpacken möchte oder auch kann. Das SCADA-System könnte die Produktionsdaten auswerten und eine entsprechende Ausfallwarnung an das MES senden. Lässt sich das SCADA-System für eine solche Kompetenz nicht erweitern, wäre denkbar, dass es stattdessen alle Produktionsdaten an das MES sendet, damit dieses in die Lage versetzt wird, die relevante Verschlechterung festzustellen. Soll auch die Modifikation des MES in Grenzen gehalten werden, wäre auch das Aufsetzen eines dritten Systems denkbar, welches die Produktionsdaten erhält sowie auswertet und ggfs. eine Warnmeldung an das MES sendet.

In jedem Fall ist aber eine Modifikation der Produktionsprozesse im MES notwendig, wenn eine Umschichtung der Produktion durch eine neue Abbruchbedingung eingerichtet werden soll. Dabei wird sich diese Modifikation ganz wesentlich an dem „Kompetenzmodell“ zu orientieren haben, um zu definieren, welches System welche Entscheidung treffen soll.

4 Informatische Hintergründe

Im Weiteren erläutern wir hierfür einige informatischen Hintergründe, die unsere Einteilung der Anwendungsfälle motiviert haben und die für Brownfield-Anlagen eine wichtige Rolle spielen. Eine ausführliche, weiterführende Übersicht der informationstechnischen Hintergründe können zudem dem White Paper „Vorschlag zur systematischen Klassifikation von Interaktion in Industrie 4.0 Systemen“ entnommen werden.

4.1 Was sind Informationen? Was ist Bedeutung?

Was macht die Informatik zur Informatik? Das ist sicherlich der Begriff der Information. Nun steckt hinter diesem Begriff etwas mehr als nur „0“ oder „1“. Tatsächlich steckt dahinter die bahnbrechende Idee von Ralph V. L. Hartley³ und Claude E. Shannon⁴ und anderen, die Welt ein wenig anders zu beschreiben, als dies bis dato in den sonstigen Ingenieursdisziplinen oder auch Naturwissenschaften üblich war. Während dort die Zustände der Natur in den traditionellen Zustandsgrößen wie Ort, Geschwindigkeit, Spannung oder Strom bemaßt wurden, richteten sie die Aufmerksamkeit auf das Unterscheidbare: Sie abstrahierten von den konkreten Zustandsgrößen und fassten alle die als äquivalent zusammen, die dieselbe Anzahl von unterscheidbaren Werten abbilden konnten. Um weiter über diese Werte reden zu können, mussten sie für jeden einzelnen Wert ein neues Symbol einführen. Sie definierten alle diese neu eingeführten Symbole zu einem „Alphabet“, wie der Informatiker sagt, zusammen. Die Information war „erfunden“. Also etwa „0“ oder „1“. Wir hätten uns auch auf „A“ oder „B“ einigen können. Die Gestalt der Symbole ist dabei unerheblich; Hauptsache sie sind unterscheidbar und definiert. Repräsentiert ein Zustand mit seinem Wert nur zwei Symbole, spricht man auch davon, dass er ein „Bit“ repräsentiert, die Maßeinheit der Information. Mit dieser Information kann man nun genau zwei Dinge anstellen: Transportieren und Verarbeiten.

Information transportieren heißt, dass der Wert einer Zustandsgröße von einer anderen Zustandsgröße so reproduziert wird, dass dieser mit demselben Symbol benannt wird. Eine Transportfunktion ist daher - nach Definition - immer eine Identität.

Informationen verarbeiten heißt hingegen, dass dieser Schritt als Transformation gedacht wird, also als allgemeine Abbildung, die sich daher auch auf dieselbe Zustandsgröße beziehen darf. Ein einfaches Beispiel ist ein Zustand, dessen Wert sich in einem Schritt als UND-Verknüpfung zweier anderer Zustandswerte ergibt.

Informationen können transportiert oder verarbeitet werden

³ Hartley, R. V. L. (1928). Transmission of information 1. Bell System technical journal, 7(3), 535-563.

⁴ Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. The Bell system technical journal, 27(3), 379-423.

Demnach gibt es keine zwei verschiedenen Welten der Informationen und der Physik, die auf geheimnisvolle Weise wechselwirken, sondern nur eine gemeinsame Welt, die unterschiedlich beschrieben werden kann.

Mit dem Kunstgriff von Ralph V.L. Hartley, Claude E. Shannon und anderen lässt sich demnach die Frage, was zwischen Systemen, die über Signale miteinander kommunizieren, eigentlich „transportiert“ wird, klar beantworten: Es sind Informationen.

Und es lässt sich ebenso klar sagen, was nicht transportiert wird: eine eventuelle Relevanz oder Bedeutung der Informationen.. Ihre eventuelle Bedeutung erhalten die transportierten Informationen gemäß der Informationstheorie von Ralph V. L. Hartley und Claude E. Shannon ausschließlich durch ihre Verarbeitung, also lokale Transformation. Wir können daher sagen, dass Bedeutung wird eben nicht transportiert, sondern vom Empfänger „erteilt“ wird. Ob eine vorliegende Information Relevanz entfaltet, ist eine Frage ihrer weiteren konkreten Verarbeitung. Informationen, die nicht verarbeitet werden, sind offenkundig irrelevant. In diesem Sinne verstehen wir den Bezeichner „semantisch“ gleichbedeutend mit „auf die Verarbeitung von Informationen bezogen“. „Semantische Interoperabilität“ wird so zum Pleonasmus, etwa wie „weißer Schimmel“. Denn selbstverständlich bezieht sich „Interoperabilität“ auf eine in irgendeinem Sinne relevante, aufeinander bezogene Informationsverarbeitung der informationsaustauschenden Systeme.

Auf eine Besonderheit informatischer Systeme wollen wir explizit hinweisen: Auf Grund der Tatsache, dass man von der konkreten Realisierung der Zustandswerte abstrahiert und stattdessen die Alphabete eingeführt hat, sind rein informatisch zu beschreibende Systeme ihrem Wesen nach sehr einfach transportierbar. - was ihren „virtuellen“ Charakter erklärt. Entsprechend endet dieser „virtuelle“ Charakter dort, wo diese Abstraktion ihre Gültigkeit verliert, wenn etwa auf Grund eines konkreten Signals ein konkreter Roboterarm sich unaufhörlich nach oben oder unten bewegt. Dies ist dann die Welt der cyberphysischen Systeme.

4.2 Wie beschreiben wir die Verarbeitung von Informationen?

Die Verarbeitung von Informationen beschreiben wir durch „berechenbare“ Funktionen. Das mathematische Konzept der Funktion erschließt sich eigentlich sehr intuitiv. Wenn wir auf den Einschaltknopf eines funktionierenden, aber ausgeschalteten Fernsehers drücken, geht er an. Wenn wir ein funktionierendes Handy besitzen, dann können wir damit telefonieren. Wie diese einfachen Beispiele zeigen, benützen wir den Begriff des „Funktionierens“ genau dafür, eine eindeutige Beziehung zu beschreiben: gedrückter Knopf bedeutet Fernseher geht an. Nummer eingeben bedeutet Verbindung wird hergestellt. Eine solche eindeutige Abbildung ist eine Funktion. Sie bezieht sich in ihrer „Eingabe“ und „Ausgabe“ immer auf definierte Wertemengen und bildet ihre Eingabe auf ihre Ausgabe ab. Im Falle des Fernsehers bildet sie die Zustandswerte des Schalters {links, recht} auf den Zustand des Fernsehers {an, aus} ab.

Informationen werden durch berechenbare Funktionen verarbeitet

Nun haben wir es in der Informatik nicht mit allen möglichen Funktionen zu tun, sondern ihrer Natur nach mit einer sehr speziellen Klasse, die wir „berechenbar“ nennen. Dabei handelt es sich um ein einfaches Konzept: Eine Funktion heißt berechenbar, wenn sie sich aus anderen Funktionen zusammensetzt, die ihrerseits wiederum berechenbar sind. Demnach muss dies natürlich irgendwo seinen Anfang bei berechenbaren Funktionen nehmen, die „irgendwie“ gegeben sein müssen. Diese werden Elementarfunktionen genannt. Berechenbarkeit ist also ein Konzept, das im Wesentlichen wie Lego kompositionell ist und sinnvollerweise entsprechende Elementarbausteine, die Elementarfunktionen, aufweist.

Tatsächlich lässt sich zeigen, dass nur ganz wenige Regeln für dieses Zusammensetzen existieren: Funktionen können hintereinander oder parallel angewandt werden; sie lassen sich für eine vorgegebene Anzahl hintereinander auf zu liefernden Zwischenergebnissen anwenden oder so oft auf Zwischenergebnissen anwenden bis ein (wiederum berechenbares Problem) damit gelöst wird, etwa eine Nullstelle gefunden wurde. Das war es auch schon.

4.3 Was sind Daten?

Es scheint vor der Informatik keine Daten gegeben zu haben. Daten sind ein schönes Beispiel für unsere These, dass die Welt, betrachtet durch die Brille der Informatik, keine fundamental andere wird, sondern dass sich wichtige Aspekte unserer Welt schlicht präziser in ihrer Essenz betrachten lassen.

Nach unserem informatischen Verständnis sind Daten Informationen, von denen man grundsätzlich weiß, wie man sie zu verarbeiten hat. Daten entstehen demnach streng genommen in diesem Sinne erst durch die informatische Reduktion der Welt auf das Unterscheidbare - eben auf Zeichen.

Jetzt müssen wir nur noch klären, was wir mit „grundsätzliches Wissen, wie man bestimmte Zeichen verarbeitet“ meinen. Um das besser zu verstehen, geben wir ein einfaches Beispiel: Was rechtfertigt es, über 64 zusammenhängende Bits als Gleitkommazahl zu reden? Nun, es ist das Wissen um einige wenige Elementaroperationen, die auf eben diese 64 Bits anzuwenden sind. Im Falle der Gleitkommazahlen kennt jeder diese Elementaroperationen. Es sind $+$, $-$, $*$ und $/$, die heutzutage alle von den modernen Rechnerzentraleinheiten zur Verfügung gestellt werden. Sie alle gehen von einer bestimmten Struktur dieser 64 Bits aus, etwa dass die ersten 56 Bits für die Mantisse und die restlichen 8 Bits für den Exponenten zu einer zuvor vereinbarten Basis vorgesehen sind. So transformieren diese Elementaroperationen die 64-Bit-Werte so, dass wir damit „rechnen“ können: $+$ und $-$ heben sich auf, ebenso $*$ und $/$, usw. In dieser Weise hat etwa das IEEE den Datentyp float standardisiert.

Bauen wir anschließend die Verarbeitung unserer Informationen, die wir als Gleitkommazahlen ansehen, ausschließlich aus diesen Elementaroperationen auf - und natürlich weiteren von uns entsprechend zusammengesetzten Operationen - dann können wir uns ganz sicher sein, dass wir diese 64-Bit Informationspakete die ganze Zeit als Gleitkommazahlen interpretieren.

Daten sind Informationen, von denen wir wissen, wie sie grundsätzlich zu verarbeiten sind.

„Grundsätzlich wissen, wie bestimmte Informationen verarbeitet werden“ heißt also ganz konkret alle Elementarfunktionen zu kennen, die auf diese Art der Informationen angewendet werden können, zusammen mit den Regeln, nach denen wir Funktionen zusammensetzen können. Elementarfunktionen sind dabei sowohl Transportfunktion als auch Verschlüsselungs- und Entschlüsselungsfunktionen.

Wenn wir einen Datentyp kennen, wissen wir also etwas darüber, wie man die entsprechenden Informationen verarbeiten könnte - aber wir wissen nicht, wie ihre Verarbeitung sinnvollerweise tatsächlich geschehen wird. Kennen wir etwa den Wert einer Variablen vom Datentyp Temperatur als 20°C, dann wissen wir, dass wir damit eine Wärmemenge berechnen könnten oder einen Temperaturvergleich anstellen könnten. Was aber tatsächlich mit Hilfe dieses Wertes berechnet wird, was er also darüber hinaus bedeutet, das wissen wir nicht.

Dabei ist es wichtig, den Unterschied zwischen etwa dem physikalischen Konzept der Temperatur und einem Datentyp für Temperaturwerte zu unterscheiden. Unterhalten sich zwei Menschen über Temperatur in einem physikalischen Sinn, dann ist sehr wahrscheinlich, dass sie beide nicht dasselbe Verständnis von Temperatur haben. Vielleicht ist der eine Mensch eine Physikerin und der andere Mensch ihr 8-jähriger Sohn, der ihr erzählt, dass er heute, bei 30°C in der Schule hitzefrei bekommen hat. Reden hingegen zwei Menschen über einen Datentyp, dann ist es wenigstens im Prinzip möglich zu garantieren, dass beide über dasselbe reden - eben, wenn sie sich auf die Elementaroperationen haben einigen können. Für zusammengesetzte Datentypen ergeben sich die Elementaroperationen aus den Elementaroperationen der Teiltypen.

Insofern sich die Qualifikation von Informationen als „Daten“ auf ihre Verarbeitung bezieht, ist sie nach unserem Verständnis damit eine semantische Festlegung. Auf Grund ihres semantischen Bezugs spielen Datentypen etwa in ihrer Erscheinung als „Merkmal“ in der effizienten Herstellung von Interoperabilität eine wichtige Rolle. Aber auf Grund des semantischen Spielraumes, den sie lassen, reicht das gemeinsame Wissen von Sender und Empfänger über ihre Datentypen allein nicht aus, um Interoperabilität herzustellen. Dazu bedarf es zusätzlichem Kontextwissen.

4.4 Semantische Interoperabilität

Zwei Systeme sind einfach gesprochen interoperabel, wenn sie durch Interaktion „etwas“ zusammen bewerkstelligen können. Wie lässt sich diese Auffassung durch die Brille der Informatik präzisieren?

Mit Interaktion meinen wir in der Informatik schlicht den Informationsaustausch inklusive der beteiligten Zustandsübergänge von Sender und Empfänger. D.h. ein „Sender“-System produziert in einem seiner Ausgangszustände im Rahmen eines Zustandsübergangs einen Informationswert und ein weiteres System, das „Empfänger“-System, betrachtet eben diesen Zustand als Eingabezustand. Es „verarbeitet“ diesen Informationswert, in dem es seinerseits einen Zustandsübergang vornimmt.

Grundsätzlich wissen, wie bestimmte Informationen verarbeitet werden, bedeutet alle Elementarfunktionen zu kennen

Interoperabilität bedeutet die aufeinander abgestimmte Informationsverarbeitung aller beteiligter Systeme

Die Reproduktion der Zustandswerten von Ausgabe- auf Eingabezustände nennen wir Informationstransport. Und die damit zusammenhängenden Zustandsübergänge die Informationsverarbeitung.

Das „irgendwie etwas zusammen Bewerkstelligen“ bezieht sich auf die Informationsverarbeitung, also auf den Zusammenhang der Zustandsübergänge von Sender- und Empfängersystemen, wie sie durch die Informationsübertragung gekoppelt werden. Setzen wir den Aspekt des Informationsaustauschs voraus, beziehen wir „Interoperabilität“ auf die Informationsverarbeitung aller beteiligter Systeme, die „irgendwie“ aufeinander abgestimmt sein muss. Das soll der Ausdruck „semantische Interoperabilität“ betonen.

Die interessante Frage ist nun, wie man dieses „irgendwie aufeinander abgestimmt“ bezüglich der Informationsverarbeitung besser fassen kann. Das geht unserer Auffassung nach mit Hilfe des Kompositionsbegriffs⁵. Dieser lässt sich recht einfach mathematisch fassen: Die zentrale Idee ist, dass sich durch die Interaktion, also durch den Informationsaustausch zwischen Systemen, übergeordnete Strukturen bilden - immer. Wir können damit das „irgendwie aufeinander abgestimmt Sein“ durch die Entstehung der übergeordneten Strukturen beschreiben. Hier gibt es zwei gänzlich unterschiedliche Fälle: zum einen können sich durch Interaktion „vertikale“ hierarchische Strukturen im Sinne einer „Ist-Teil-von“-Beziehung bilden, zum anderen können aber auch „horizontale“, nicht hierarchische Beziehungen entstehen. Das ist die Grundlage der meisten zweidimensionalen Softwarearchitekturmodelle, wie auch unserer Unterscheidung der beiden Szenarienklassen „Hierarchie“ und „Horizontale Interaktion“ unserer Digitalisierungsstufen 2 und 3.

4.5 Digitaler Zwilling und Künstliche Intelligenz

In diesem Abschnitt wollen wir noch auf die beiden Konzepte des Digitalen Zwillings und der Künstlichen Intelligenz eingehen, die im Zusammenhang mit Interoperabilität bei Brownfield-Anlagen aktuell relevant sind. Hier bietet unser Modell unserer Ansicht nach eine gute Orientierung an.

4.5.1 Digitaler Zwilling

Dieser Begriff wird aktuell in einem gewissen Sinne inflationär verwendet. Das ist insoweit ein Problem, als es die vielleicht tatsächlich neuen Dinge kaschiert, wenn damit auch viele Dinge benannt werden, für die es vorher auch schon treffende Begriffe gegeben hat. Diese Beliebigkeit führt unserer Meinung nach dazu, dass ein enormer Diskussionsbedarf erzeugt wird, wie denn nun genau dieser neue Begriff mit all den alten zusammenhängt. Aus marketingtechnischer Sicht mag das alles irgendwie ok sein – aus ingenieurtechnischer Sicht behindert unserer Ansicht nach ein solcher Gebrauch unserer Sprache aber Innovationen eher, als dass er sie fördert.

Im [AI Glossar](#) der Deutsch-Chinesische Arbeitsgruppe Unternehmen zu Industrie 4.0 und intelligenter Fertigung (AGU) findet sich die folgende Definition: „*Digital twin refers to a digital replica of a living or non-living physical entity. It can be used for*

Ein Digitaler Zwilling ist eine elektronische Komponente, die sich in bezüglich gewisser Aspekte in bestimmten Kontexten so verhält wie das Bezugssystem

⁵ J. Reich (2021) Komposition und Interoperabilität von IT-Systemen Informatik Spektrum 44:339–346. DOI: 10.1007/s00287-021-01376-6

simulating, monitoring, diagnosing, predicting and controlling the product's physical entity in the real environment of the production process, state and behavior“

Dieses Verständnis eines „Digitalen Zwilling“ lässt sich unserer Auffassung nach sinnvoll konkretisieren als eine elektronische Komponente, die sich bezogen auf gewisse Aspekte in bestimmten Kontexten genauso *verhält* wie ein Bezugssystem und daher, innerhalb dieses Rahmens dasselbe logische Interface aufweisen kann. Diesen Umstand kann man sich in der Realisierung zu Nutze machen und beide Systeme, das originale Bezugssystem wie auch den digitalen Zwilling, tatsächlich mit demselben Interface ausstatten.

Hierzu drei Beispiele, wie die Verhaltensäquivalenz einer digitale Zwillingskomponente zu den aufgeführten Zwecken einsetzen lässt:

- Ein Controller, der eine Kläranlage steuert, kann auch ein Modell steuern - den digitalen Zwilling der Kläranlage. Hier verhalten sich Kläranlage und Modell in Bezug auf wichtige Aspekte im Kontext der Ansteuerung durch den Controller (möglichst) gleich – und können somit auch dasselbe logische Interface aufweisen.
- Ein MES, das eine Fertigungsstraße steuert, kann auch eine Simulation der Fertigungsstraße steuern. Diese Simulationskomponente verhält sich bezogen auf wichtige Aspekte der Steuerung wie das Original – weist also dasselbe logische Interface auf. Jetzt lässt sich mithilfe dieses „digitalen Zwilling“ tatsächlich eine Steuerung der Fertigungsstraße entwickeln, mit dem man vorwärtsgerichtet eventuelle Totzeiten der Fertigungsstraße ausgleichen kann. Das Modell wird zu einem internen Modell der Fertigungsstraße im Controller.
- Ein Simulationsprogramm simuliert den Aufprall von Autos und die Kinetik der Fahrzeuginsassen. Dann wäre eine Komponente, die sich in der Simulation verhält wie ein Mensch in diesem Kontext der Simulation ein digitaler Zwilling des Menschen.

Gemäß diesem Verständnis hilft ein digitaler Zwilling nicht bei der effizienten Herstellung von Interoperabilität, sondern muss dieselben Anforderungen erfüllen und Hürden überwinden, wie seine „Spiegelkomponente“. Stufe 1 des Modells dient daher der Datensammlung und ist die Basis für Simulationen. In Stufe 2 und Stufe 3 können wir sowohl die Originalkomponente als auch ihre Spiegelkomponente mit dem gleichen Interface ausstatten, damit ein Austausch der Komponenten einfach möglich ist.

Entsprechend können wir auch für bestimmte informatische Strukturen ausschließen, dass es sich dabei um einen „Digitalen Zwilling“ handelt: Nämlich bei allen Strukturen, die kein aktives „Verhalten“ zeigen und damit auch kein „Interface“ aufweisen können. Ein wichtiges Beispiel wären hier reine Datenstrukturen, etwa eine Personalakte oder eine Krankenakte. Niemand käme auf die Idee, von einer Personalakte zu fordern, dass sie sich in manchen Aspekten wie ein Beschäftigter verhalten soll oder von einer Krankenakte, dass sie sich wie ein Patient verhalten soll. Insofern wäre es verfehlt, sie als „Digitalen Zwilling“ zu betrachten. Auch wäre der Bestand an Schrauben, sagen wir 100 Stück, ein solches Datum ohne eigenes Verhalten und somit sicherlich nicht der „Digitale Zwilling“ der Schrauben in irgendeinem verständlichen Sinn.

4.5.2 Künstliche Intelligenz

An welchen Stellen können wir in unserem Modell künstliche Intelligenz verorten? Eine naheliegende Anwendung ist sicherlich das Treffen von Entscheidungen. Die Frage ist, ob der Entscheidungsbegriff den Bezug auf Intelligenz voraussetzt. Das tut er unserer Auffassung nach nicht. Unserer Auffassung ergibt sich der Entscheidungsbegriff aus der Unbestimmtheit der netzwerkartigen Interaktionen. Er füllt sozusagen die Leerstellen der nichtdeterministischen Protokolle. In diesem Sinne können wir davon sprechen, dass unsere Entscheidungen unser Verhalten in regelbasierten Interaktionen bestimmt.

Entsprechend lassen sich zwei verschiedene Klassen von Entscheidungen unterscheiden: Spontanentscheidungen und Auswahlentscheidungen. Diesen Unterschied kennen wir alle und er wird deutlich, wenn ein Vater etwa gerne möchte, dass sein heranwachsendes Kind ein Instrument spielt und es nun fragen könnte „Willst Du ein Instrument spielen?“ oder auch „Welches Instrument willst Du spielen?“

Daraus ergibt sich, dass man versuchen kann, erforderliche Entscheidungen mithilfe von künstlicher Intelligenz zu treffen, wie man sie auch mit anderen Mitteln treffen kann. Etwa die Auswahlentscheidung für einen Schachzug. Offensichtlich kann eine Entscheidung über einen Schachzug sehr unterschiedlich getroffen werden. Spielt etwa ein Computer gegen einen Menschen, so handelt tatsächlich ein System, das viele, ggfs. Milliarden Stellungen pro Sekunde bewerten kann, gegen ein System, das nachweislich ggfs. nur wenige Stellungen pro Sekunde bewerten kann - und beide spielen unter Umständen gleich gut.

Ein Beispiel aus der Brownfield-Integration wäre die Qualität der zu produzierenden Bauteile zu messen und Ausschuss rechtzeitig zu erkennen, um darauf im Prozess reagieren zu können.

Wo es unserer Ansicht wirklich interessant wird - ein Ausblick in die Zukunft - ist in der Gestaltung von Interaktionen. Technische Interaktionen zeichnen sich bisher dadurch aus, dass die notwendigen Protokolle häufig recht aufwändig explizit ausformuliert werden müssen, um ihre Konsistenz prüfen zu können. Dabei gilt der Grundsatz, dass ein nicht-validiertes Protokoll höchstwahrscheinlich Inkonsistenzen enthält.

Der Mensch hingegen ist in der Lage, mit einer entsprechend positiven Grundhaltung (die zu rechtfertigen wäre), direkt zu kooperieren und die in einer Interaktion auftretende drohenden Inkonsistenzen mit ad hoc gesetzten Spielregeln zu umgehen. Insofern wäre unserer Ansicht nach ein vielversprechender Ansatz, wenn man hier mit Hilfe von künstlicher Intelligenz zu ähnlich flexiblen Lösungen kommen könnte.

Künstliche Intelligenz wird zukünftig vor allem bei der Gestaltung technischer Interaktionen interessant

5 Kurze Zusammenfassung und Ausblick

Mit diesem Leitfaden haben wir den Versuch unternommen, Fach- und Führungskräften, die gegenwärtig die Digitalisierung ihrer Unternehmen vorantreiben, gewissermaßen Leitplanken ihrer Digitalisierungsstrategie an die Hand zu geben. Das von uns vorgeschlagene Schema zur Klassifikation der Anwendungsfälle sowie der zu erwartenden Komplexität sollte in der Praxis helfen, bei den Anwendungsfällen die Spreu vom Weizen zu trennen und die Beurteilungsfähigkeit in der ökonomischen Kosten-Nutzen-Abwägung verbessern.

Warum ist ein adäquates Grundverständnis der informatischen Grundlagen semantischer Interoperabilität auch für nichtinformatische Fach- und Führungskräfte, die über Digitalisierungsprozesse entscheiden, so wichtig? Wir glauben, dass wichtige Entscheidungen insbesondere über Digitalisierungsprozesse am besten im Dialog mit den IT-Fachleuten getroffen werden sollten, weil sie in der Regel ganz viele verschiedene, insbesondere auch nicht-informatische Aspekte betreffen, etwa rechtliche, arbeitswissenschaftliche, mitbestimmungs-Aspekte, etc. Und dieser Dialog setzt ein gewisses gemeinsames Verständnis voraus.

Unserem Modell der semantischen Interoperabilität folgend, basiert die Separation verschiedener Expertisen-Domänen und die Flexibilität ihrer Zusammenarbeit ganz wesentlich auf Redundanz, nämlich dem Teilen eines gemeinsamen Kontextes und nicht auf der möglichst redundanzfreien Strukturierung funktionaler Einheiten.

Ein gutes Beispiel ist wiederum ein Ärzteteam, das einen Intensivpatienten betreut. Jede Fachspezialistin ist für ihre Domäne die Expertin, etwa Anästhesie, Chirurgie, Radiologie, Labor etc. Wirklich gut zusammenarbeiten können sie aber nur deshalb, weil sie ein grundsätzlich recht weitgehendes Verständnis der Tätigkeit des jeweils anderen haben, was sich in über 6 Jahren annähernd gleicher Ausbildung zum Arzt vor ihrer Spezialisierung ausdrückt. Nur dadurch wissen sie, welche Informationen zu welchem Zeitpunkt ihre jeweiligen Partner in der Kooperation brauchen, nur dadurch können sie im Sinne ihrer Kooperationspartner „mitdenken“. Das Gleiche lässt sich von einem Entwicklungsteam von Ingenieuren sagen, oder auch von ganzen Unternehmen, deren Erfolg ganz wesentlich auf der Kooperation seiner Beschäftigten beruht.

Fassen wir unsere 3 Stufen noch einmal kurz zusammen: Häufig lassen sich auf Stufe 1 durch die Beobachtung nur weniger Daten erhebliche ökonomische Vorteile erlangen, auch wenn (oder auch gerade weil) deren Beurteilung noch vollständig beim Menschen verbleibt.

Demgegenüber erfordert die Steuerung von Maschinen als Stufe 2 erheblich mehr Knowhow über die Relevanz der zu ändernden Zustände für die Funktion der Maschine, als auch in Bezug zu ihrer Umgebung - wobei dieses Wissen aufgrund des Ausnahmemechanismus nicht allumfassend sein muss.

Darüber hinaus zeigen sich die ökonomischen Möglichkeiten, die sich aus der Einbindung von semiautonomen Maschinen in bestehende - bzw. zu modifizierende Prozessnetzwerke ergeben - Stufe 3 - erst langsam. Insbesondere werden die erforderlichen Protokoll-Schnittstellen weder Werkzeugseitig bisher unterstützt, noch finden sie in den Standardisierungsprozessen ausreichend Beachtung. Auch sind heutige IT-Applikationen in der Regel nicht so gebaut, dass die erforderlichen Prozessanpassungen ausreichend aufwandsarm vorgenommen werden können.

Diese Digitalisierungsstufen werden daher immer nebeneinander existieren und können sich nicht gegenseitig ersetzen. Aber es wird sicherlich eine Verschiebung in ihrer Relevanz stattfinden. Insofern sehen wir gerade in unserer Digitalisierungsstufe 3 noch ein erhebliches Innovations- bzw. Entwicklungspotential. Im Sinne der wettbewerbsorientierten Industrie eine sehr gute Nachricht.

Bitkom vertritt mehr als 2.000 Mitgliedsunternehmen aus der digitalen Wirtschaft. Sie erzielen allein mit IT- und Telekommunikationsleistungen jährlich Umsätze von 190 Milliarden Euro, darunter Exporte in Höhe von 50 Milliarden Euro. Die Bitkom-Mitglieder beschäftigen in Deutschland mehr als 2 Millionen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Zu den Mitgliedern zählen mehr als 1.000 Mittelständler, über 500 Startups und nahezu alle Global Player. Sie bieten Software, IT-Services, Telekommunikations- oder Internetdienste an, stellen Geräte und Bauteile her, sind im Bereich der digitalen Medien tätig oder in anderer Weise Teil der digitalen Wirtschaft. 80 Prozent der Unternehmen haben ihren Hauptsitz in Deutschland, jeweils 8 Prozent kommen aus Europa und den USA, 4 Prozent aus anderen Regionen. Bitkom fördert und treibt die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft und setzt sich für eine breite gesellschaftliche Teilhabe an den digitalen Entwicklungen ein. Ziel ist es, Deutschland zu einem weltweit führenden Digitalstandort zu machen.

Herausgeber

Bitkom e.V.
Albrechtstr. 10 | 10117 Berlin

Ansprechpartner

Angelina Marko | Fachreferentin Industrie 4.0 & Technische Regulierung
T 030 27576-133 | a.marko@bitkom.org

Verantwortliches Bitkom-Gremium

AK Industrie 4.0 Interoperabilität
UAG Leitfaden Brownfield

Copyright

Bitkom 2022

Diese Publikation stellt eine allgemeine unverbindliche Information dar. Die Inhalte spiegeln die Auffassung im Bitkom zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider. Obwohl die Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurden, besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität, insbesondere kann diese Publikation nicht den besonderen Umständen des Einzelfalles Rechnung tragen. Eine Verwendung liegt daher in der eigenen Verantwortung des Lesers. Jegliche Haftung wird ausgeschlossen. Alle Rechte, auch der auszugsweisen Vervielfältigung, liegen beim Bitkom oder den jeweiligen Rechteinhabern.