

Autonome Systeme

Potenziale und Herausforderungen

Thomas Kuhn und Peter Liggesmeyer

AUTONOME SYSTEME – POTENZIALE UND GRENZEN

Ein System ist dann autonom, wenn es ohne menschliches Zutun und ohne eine detaillierte Programmierung für eine Situation ein vorgegebenes Ziel selbständig und an seine Situation angepasst erreichen kann. Autonome Systeme unterscheiden sich daher von heute existierenden eingebetteten Systemen durch ihre Fähigkeit, eigenständig Entscheidungen zu treffen – auch dann, wenn diese nicht detailliert programmiert wurden. Jedes Autonome System verfolgt ein oder mehrere Ziele. Diese sind in der Programmierung des Systems festgelegt. Das autonome Fahrzeug wird z.B. seine Passagier/-innen mittels einer optimalen Route zu ihrem Ziel bringen. Die Definition der optimalen Route hängt dabei von den Präferenzen der Passagier/-innen ab: es kann die schnellste Route sein, die Route, die am wenigsten Kraftstoff verbraucht, oder auch die Route mit der schönsten Aussicht. Das autonome Fahrzeug übernimmt dabei sowohl die unmittelbaren Fahrfunktionen, das heißt das Lenken, Beschleunigen und Bremsen, als auch strategische Funktionen wie die Wahl der Fahrspur, die Entscheidung für eine Route und gegebenenfalls die Auswahl einer alternativen Route

im Fall einer Verkehrsstörung. Das Potenzial des Autonomen Systems liegt in diesem Fall zunächst in der Entlastung der Passagier/-innen, die, anstatt das Fahrzeug zu fahren, anderen Tätigkeiten nachgehen können.

Die potenziellen Anwendungsgebiete von Autonomen Systemen sind jedoch viel größer. In allen Bereichen, in denen Menschen nicht oder nicht wirtschaftlich arbeiten können oder wollen, können und werden Autonome Systeme zukünftig anfallende Arbeiten übernehmen. In der Produktionstechnik wird eine autonome Fertigungsplanung selbständig entscheiden, wann und unter Nutzung welcher Maschinen ein bestimmtes Produkt am besten gefertigt werden kann. Autonom fahrende Lastwagen benötigen keine Fahrer/-innen mehr, sondern folgen einem Führungsfahrzeug auf der Autobahn. Bereits heute gibt es autonome Schienenfahrzeuge, die ohne Fahrer/-innen funktionieren und dennoch ihre Passagier/-innen sicher zum Ziel bringen. Autonome Fahrzeuge werden eigene Ziele gegenüber übergeordneten Systemzielen abwägen. Ähnlich wie menschliche Fahrer/-innen wird ein autonomes Fahrzeug entscheiden können, ob es in einer Stausituation einem Fahrzeug einer nicht vorfahrtsberechtigten Straße Vorfahrt gewährt und so das Systemziel ‚Fortkommen für alle Fahrzeuge‘ dem eigenen Ziel der möglichst schnellen Zielerreichung überordnet.

Trotz dieser Fähigkeit des Abwägens und des Treffens von Entscheidungen sind Autonome Systeme immer an einen Kontext gebunden. Sie treffen innerhalb dieses Kontexts Entscheidungen, die durchaus komplex sein können. Diese Entscheidungen treffen sie anhand definierter Regeln, die auf Variablen und numerischen Werten beruhen. Die Entscheidungsfindung basiert auf definierten Algorithmen, unabhängig davon, ob diese als künstliche neuronale Netze, als fest programmierte Regeln oder als Optimierungsmodelle vorliegen. Autonome Systeme sind daher überall dort einsatzfähig, wo Entscheidungen anhand von messbaren Kriterien getroffen werden. Autonome Systeme sind jedoch nicht kreativ und können keine Entscheidungen treffen, für die sie nicht vorbereitet wurden. Auch in Zukunft werden Autonome

Systeme den Rahmen ihrer Programmierung daher nicht verlassen können.

Das Fehlen dieser Fähigkeit definiert eine Grenze der Einsatzpotenziale Autonomer Systeme. Kreative Entscheidungen, also das sinnvolle Reagieren auf vollkommen neue Situationen, werden auch in Zukunft dem Menschen vorbehalten bleiben. Auf gänzlich unbekannte Situationen wird auch ein Autonomes System nicht reagieren können. Beispielhaft kann man dies anhand der folgenden Situation diskutieren. Im Normalfall wird ein autonomes Fahrzeug eine Autobahn auf einer Fahrspur nur in einer definierten Richtung befahren. Kommt es zu einem Stau, wird ein autonomes Fahrzeug anhalten, und erst dann weiterfahren, wenn vor ihm genügend Platz entstanden ist. Ist eine Fahrspur z.B. aufgrund von Räumarbeiten gesperrt, so kann das autonome Fahrzeug auf eine andere Fahrspur ausweichen, da ihm das Konzept des Spurwechsels bekannt ist. Selten kommt es jedoch vor, dass die Polizei entscheidet, die wartenden Fahrzeuge z.B. aufgrund einer vorhersehbar langen Sperrung umdrehen zu lassen, und die Fahrbahn entgegen der Fahrtrichtung bis zur nächsten Ausfahrtmöglichkeit zu befahren. Wurde diese Möglichkeit nicht in das autonome Fahrzeug einprogrammiert, wird es diese Entscheidung von sich aus nicht treffen können und auch die entsprechende Anweisung der Polizei nicht verstehen. Hier stößt das Autonome System daher an die Grenzen seiner Programmierung, die es selbständig nicht überwinden kann.

Wirtschaftliche Potenziale Autonomer Systeme

Das wirtschaftliche Potenzial von Autonomen Systemen liegt in deren Fähigkeit, selbständig und effizient Entscheidungen treffen zu können. Menschen müssen diese Systeme nicht mehr zu allen Zeiten leiten. Dies führt zu effizienteren Abläufen und zu einer verbesserten Ressourcennutzung.

Ein naheliegendes Beispiel ist die Produktion. Viele Produktionslinien sind heute auf die Massenproduktion von gleichen Produkten optimiert. Dabei ist der Gewinn pro gefertigtem Produkt häufig sehr ge-

ring; um wirtschaftlich zu arbeiten, müssen daher hohe Stückzahlen der gleichen Produkte produziert werden. Die Produktion von Spezialanfertigungen würde prozentual deutlich höhere Gewinne pro Stück ermöglichen. Die Umsetzung einer solchen Spezialanfertigung scheitert jedoch häufig an den nur geringen Stückzahlen und an dem absolut geringen Umsatz, der in keinem Verhältnis zu den Rüstkosten und administrativen Kosten wie z.B. den Kosten für den Vertragsabschluss steht. Diese fallen gerade bei sehr geringen Stückzahlen ins Gewicht und machen kleinere Aufträge unrentabel. Dies ist nicht nur für das produzierende Unternehmen nachteilig, sondern auch für Auftraggeber/-innen, die ihre Aufträge nicht platzieren können.

Autonome Systeme können hier zwei Aspekte unterstützen. In der operativen Fertigung kann ein autonomes Fertigungssystem selbständig Modifikationen an Produkten vornehmen, um neue Produkte zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür sind automatisierte Gussanlagen, die selbständig anhand von Spezifikationen Formen produzieren und dann automatisiert entsprechende Werkstücke gießen. Arbeiter/-innen müssen lediglich Verbrauchsmaterialien einfüllen und Spezifikationen laden. Zukünftig werden Autonome Systeme aber auch Verhandlungen führen können, um beispielsweise auf digitalen Marktplätzen Maschinenkapazitäten zu verkaufen und selbständig Aufträge und Lieferzeiten auszuhandeln, und sogar Preisverhandlungen werden sie führen können. Das wirtschaftliche Potenzial von Autonomen Systemen liegt in diesem Fall in der gesteigerten Effizienz und in der Fähigkeit, Abläufe wie die individualisierte Massenproduktion wirtschaftlich zu gestalten. Dies führt nicht nur zu einer kosteneffizienten Produktion, sondern auch zu einer deutlich breiteren Produktpalette, die wirtschaftlich produziert werden kann.

Autonome Systeme haben das Potenzial, Entscheidungswege zu verkürzen und verfügbare Ressourcen optimal zu nutzen. Die vorgestellten Beispiele unterstreichen die Fähigkeiten von Autonomen Systemen. Relativ monotone Aufgaben mit einem beschränkten Entscheidungsspielraum werden Autonome Systeme recht schnell übernehmen können. Komplexere Entscheidungen sind dann möglich, wenn die da-

für notwendigen Informationen in maschinenlesbarer Form bereitgestellt werden können. Hier gibt es laufende Forschungsvorhaben, die Informationen als Modelle oder Ontologien (vgl. Guarino/Oberle/Staab 2009) aufbereiten, um sie als Eingangsdaten auch für autonom agierende Systeme zu nutzen. Dies ist z.B. für die Automatisierung von Produktionsentscheidungen immens wichtig, um entscheiden zu können, welche Produktionsschritte sinnvoll von einer Maschine durchgeführt werden können.

Neben der wirtschaftlichen Produktion ist die wirtschaftliche Nutzung von Ressourcen ebenfalls ein Aspekt, den Autonome Systeme beeinflussen werden. Heute ist die Zeit, die Fahrzeugführer/-innen mit dem Fahren eines Kraftfahrzeugs verbringen, verlorene Zeit. Wenn diese Aufgabe von einem autonomen Fahrzeug übernommen werden kann, könnten sich die Passagier/-innen auf andere Tätigkeiten konzentrieren. Dies könnte die Vorbereitung des nächsten Termins, das Beantworten von E-Mails oder auch einfach die Entspannung nach einem anstrengenden Tag sein. Ebenfalls wird die Anzahl der benötigten Fahrzeuge im Zeitalter des autonomen Fahrens deutlich zurückgehen. Wenn Fahrzeuge autonom fahren können, ist es unsinnig, diese den größten Teil der Zeit auf Parkplätzen stehen zu lassen. Für viele Menschen wird die Nutzung von Mobilitätsdiensten gegenüber dem eigenen Fahrzeug die wirtschaftlichere Lösung sein. Ein solcher Dienst könnte so gestaltet sein, dass man kurzfristig per App ein Fahrzeug anfordern kann. Die Parkplatzsuche am Ziel entfällt und es ist immer dann ein Fahrzeug verfügbar, wenn es benötigt wird. Insgesamt werden damit deutlich weniger Fahrzeuge benötigt, um alle Mobilitätswünsche zu bedienen. Daher werden auch weniger Flächen für Parkplätze benötigt, die dann besser genutzt werden können, z.B. für Wohnungen oder Gewerbeflächen. Hier zeigt sich, dass Autonome Systeme auch die Nutzung von bestehenden und knapper werdenden Ressourcen wie Flächen in Städten positiv beeinflussen können und werden.

Die dargestellten Beispiele zeigen, dass die wirtschaftlichen Potenziale von Autonomen Systemen zunächst in deren Fähigkeit liegen, selbständig Entscheidungen zu treffen. Mittelbar ergeben sich daraus

allerdings eine Vielzahl von Potenzialen. Schnellere und optimierte Prozesse werden neue Geschäftsmodelle ermöglichen, die z.B. auf der Vermittlung von Ressourcen und deren effizienter Nutzung aufbauen. Teilweise haben Unternehmen dies schon erkannt und bauen Infrastrukturen auf, die dieses Konzept unterstützen. Man kann davon ausgehen, dass Angebote wie Uber, aber auch die zahlreichen Carsharing-Angebote, an denen Fahrzeugbauer beteiligt sind, sich in diese Richtung entwickeln werden und im Zeitalter der autonomen Fahrzeuge ihr Netzwerk nutzen werden, um Mobilitätsdienstleistungen anzubieten. Teilweise werden die wirtschaftlichen Potenziale von Autonomen Systemen auch eine Gefahr für etablierte Wirtschaftszweige darstellen. Werden im Zeitalter von autonomen Fahrzeugen weniger von diesen benötigt, dann werden Fahrzeughersteller andere Geschäftsmodelle entwickeln müssen, um ihre Einnahmen zu sichern. Gleiches gilt für die klassische Automatisierungstechnik, die im Zeitalter wandelbarer Fabriken und optimierter Auslastung weniger Geräte verkaufen wird. Die Geschäftsmodelle der Zukunft werden um digitale Ökosysteme herum realisiert werden, die einen effizienten Zugang zu Autonomen Systemen ermöglichen und dienstbasiert abrechnen. So wird z.B. nicht mehr das Fahrzeug, sondern die Mobilität verkauft. Es werden keine Produktionsanlagen oder Anlagenkapazitäten mehr verkauft, sondern eine gewisse Menge an Produkten und Werkstücken, die mit einer definierten Qualität gefertigt werden.

Gesellschaftliche Potenziale Autonomer Systeme

Neben ihren wirtschaftlichen Potenzialen haben Autonome Systeme auch signifikante gesellschaftliche Potenziale. Ein großes gesellschaftliches Problem ist heute die Landflucht. Umfragen zeigen, dass viele Familien sich ein Leben auf dem Land wünschen würden, jedoch die bessere Infrastruktur der Stadt bevorzugen. Kürzere Wege, ein besseres öffentliches Transportsystem, Einkaufsmöglichkeiten, öffentliche Infrastruktur und die Verfügbarkeit von Arbeitsplätzen sind die Hauptgründe, weswegen Menschen in die Städte ziehen. Die damit einherge-

hende Hektik, Lärmbelästigung, Stress und Enge werden in Kauf genommen. Autonome Systeme können hier in einigen Bereichen die Verhältnisse zwischen städtischen und ländlichen Regionen angleichen.

Im Bereich des öffentlichen Personennahverkehrs sind ländliche Regionen gegenüber Städten klar im Nachteil. Busse verkehren, wenn überhaupt, nur in großen Zeitabständen. Dies macht sie für die potenziellen Nutzer/-innen unattraktiv. Daher ziehen Personen, die diese Option haben, das individuelle Kraftfahrzeug als Transportmittel vor. Ältere Personen, die diese Möglichkeit nicht oder nicht mehr haben, müssen mit einer deutlich eingeschränkten Mobilität zurechtkommen. Dies führt schon bei einfachen Aufgaben, wie etwa einem Arztbesuch, zu Herausforderungen, z.B., wenn der Weg zu einem Facharzt/einer Fachärztin weit ist oder wenn häufiges Umsteigen erforderlich ist, um das Ziel zu erreichen.

Aufgrund der verhältnismäßig dünnen Besiedelung wird der Individualverkehr in ländlichen Regionen auch in Zukunft eine zentrale Rolle spielen. Autonome Fahrzeuge werden auch Menschen ohne Führerschein oder Menschen, die aufgrund ihres Alters oder aufgrund von Einschränkungen kein Kraftfahrzeug führen können, eine ausreichende Mobilität ermöglichen. Diese Autonomen Systeme haben hier das Potenzial, sich durch die verbesserte Mobilität direkt positiv auf die Lebensqualität von Menschen in ländlichen Regionen auszuwirken.

Neben der Beförderung von Personen ist die Beförderung von Gütern in ländlichen Regionen ebenfalls eine Herausforderung. Während in Großstädten kurze Wege zwischen Lager und Ziel die Kosten senken, müssen in ländlichen Regionen häufig lange Wege zurückgelegt werden. Dies ist insbesondere dann teuer, wenn nur wenige Güter in eine Region gebracht werden müssen, die Empfänger/-innen einer Lieferung nicht angetroffen werden und eine Fahrt wiederholt werden muss. Autonome Systeme können auch hier unterstützen, indem sie im Vorfeld ermitteln, ob der Empfänger/die Empfängerin einer Lieferung zu Hause ist und so unnötige Fahrten vermeiden.

Zuletzt werden Autonome Systeme auch die Lebensqualität zu Hause steigern. Assistenzsysteme haben das Potenzial, den Alltag zu erleichtern, z.B. indem sie die unterschiedlichen Aufstehzeiten der Bewohner/-innen berücksichtigen und diese möglichst sanft und angepasst an deren Schlafrhythmus wecken. Autonome Systeme können die Weckzeit z.B. davon abhängig machen, wann eine Person aufstehen muss, und zu diesem Zweck auf deren Kalender zugreifen. Aber auch nach einem längeren Krankenhausaufenthalt kann ein Autonomes System Unterstützung leisten. Zum Beispiel kann es den Tagesablauf einer Person verfolgen und bei ungewöhnlichen Abweichungen, wie z.B. mangelnder Aktivität, zuerst nachfragen und dann Hilfe holen. Auch bei Unfällen im Haus könnte ein solches System zum Einsatz kommen und im Fall der Fälle Hilfe für einen Verunglückten/eine Verunglückte rufen.

Weitere Potenziale Autonomer Systeme

Neben wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Potenzialen haben Autonome Systeme auch überall dort Anwendungspotenziale, wo Entscheidungen in menschenfeindlichen Umgebungen getroffen werden müssen. Dies kann z.B. beim Rückbau eines Kernkraftwerks sein, wo Abschirmung und Strahlung den Funkverkehr zwischen Bediener/-innen und Roboter beeinflussen. Ebenfalls gibt es im Bereich der Erforschung des Weltraums und im Bereich der Tiefseeforschung, das heißt überall dort, wo die Kommunikation mit menschlichen Bediener/-innen schwierig ist und lange dauert, Anwendungspotenziale für Autonome Systeme, die selbständig Entscheidungen treffen.

HERAUSFORDERUNGEN UND LÖSUNGSANSÄTZE

Bis die Potenziale von Autonomen Systemen vollständig genutzt werden können, müssen verschiedene Herausforderungen gemeistert werden. Im Folgenden werden wir einige dieser Herausforderungen beschreiben und aktuelle Forschungsfragestellungen skizzieren.

Herausforderungen im Zusammenhang mit Kooperationsmodellen

Ein traditionelles eingebettetes System wird entwickelt, mit anderen Systemen vernetzt, in Verkehr gebracht, und erhält danach gegebenenfalls noch sporadische Updates, z.B., um Fehler zu beheben oder neue Funktionen hinzuzufügen. Diese Updates werden ebenfalls entwickelt und in einer definierten Umgebung getestet, die den Anwendungsbereich des Systems widerspiegelt. Autonome Systeme passen sich hingegen permanent an ihre Umgebung an und bilden dynamisch Verbünde mit anderen Systemen. Ob sich ein System in einen Verbund integriert, entscheidet es zur Laufzeit. Es koppelt sich mit einem Verbund, wenn diese Kopplung die Zielerreichung unterstützt. Die Beteiligung an einem Verbund ist in der Regel nur vorübergehend. Im Gegensatz zu traditionellen eingebetteten Systemen kann diese Integration nicht vorab durch Entwickler/-innen mittels Integrationstests getestet werden. Durch die Fähigkeit zur dynamischen Kopplung entsteht eine Vielzahl von Systemkombinationen, die die Funktionen einzelner Systeme in unterschiedlicher Weise koppeln. Ein Beispiel hierfür ist eine Kolonne von autonomen Fahrzeugen, die sich auf der Autobahn selbstständig formt, und bei der jedes Fahrzeug so lange Mitglied bleibt, bis die eigene Ausfahrt erreicht wurde. Um diese Kopplungen abzusichern, müssen neue Möglichkeiten für automatisierte Integrationstests zur Laufzeit erforscht werden. Eine mögliche Lösung könnte in einem virtuellen Integrationsraum bestehen, der Funktionen dynamisch in einer Simulation der Umgebung miteinander integrieren lässt. Dieser In-

tegrationsraum überprüft automatisch definierte Eigenschaften, wie z.B. die Kontrollierbarkeit und das Einnehmen sicherer Zustände, bevor die echten Systeme miteinander gekoppelt werden. Eine solche Integration erfordert Simulationsmodelle mit definierten Ausführsemantiken und definierten Schnittstellen. Das *Functional Mockup Interface* (FMI) (vgl. Blochwitz et al. 2011) ist ein Kandidat hierfür, der derzeit von einer Vielzahl von Herstellern von Simulationswerkzeugen unterstützt wird.

Herausforderungen bei der Kommunikation

Eine weitere zentrale Herausforderung für kommunizierende Einheiten ist das Vorhandensein einer gemeinsamen Sprache. Menschen, die gemeinsam eine Aufgabe lösen sollen, werden ohne eine geeignete Kommunikationsform größte Mühe haben, ihre Arbeiten auf das gemeinsame Ziel hin zu koordinieren. Autonome Systeme sind mit der gleichen Herausforderung konfrontiert. Heute gibt es eine Vielzahl von Kommunikationsprotokollen und Kommunikationsparadigmen, die eine Integration von Systemen aus unterschiedlichen Bereichen erschweren.

Die Maschinen-zu-Maschinen-Kommunikation ist eine besondere Herausforderung für Autonome Systeme. Diese Systeme müssen mit einer Vielzahl von anderen Systemen kommunizieren können, auch wenn diese zu deren Entwicklungszeit noch nicht bekannt waren. Daher ist es erforderlich, system- und herstellerübergreifende Kommunikationsstandards zu definieren, die diese Kommunikation ermöglichen. Es gibt verschiedene Alternativen innerhalb der bestehenden Systemklassen, um hier eine Standardisierung zu erreichen. Zu nennen sind in diesem Kontext die Bemühungen um standardisierte Fähigkeitenmodelle durch die Plattform Industrie 4.0¹ oder die Standardisierungsaktivitäten des Car2Car Communication Consortium². Beide Initiativen de-

1 <https://www.plattform-i40.de> vom 20.8.2018.

2 <https://www.car-2-car.org> vom 20.8.2018.

finieren Standards, die den Datenaustausch zwischen Systemen und damit eine Maschinen-zu-Maschinen-Kommunikation ermöglichen.

Ein Beispiel für ein System, das von der Maschinen-zu-Maschinen-Kommunikation profitiert, ist ein dezentrales Logistiksystem, dass die Auslieferung von Paketen in ländlichen Regionen organisiert. Pakete werden mithilfe dieses Systems in freien Kapazitäten von Pendler/-innen oder von Linienbussen befördert, um für Speditionen und Paketdienste unwirtschaftliche Strecken zu bedienen. Die Integration neuer, autonom agierender Systeme wie z.B. Drohnen erfordert gemeinsame Schnittstellen. Die Funktionen des Liefersystems, die die Lieferung von Paketen definieren, müssen mit den Fähigkeiten der Drohne zum Transport leichter Lasten integriert werden. Diese Integration zur Laufzeit erfordert ein grundlegendes gemeinsames Verständnis von Fähigkeiten, die z.B. den Transport von Gütern oder die Fähigkeit zur Bewegung mit einer bestimmten Geschwindigkeit beschreiben. Die zentrale Herausforderung hier liegt in der Definition von Schnittstellen und darin, die für eine dynamische Integration geeigneten Abstraktionsebenen zu finden. In dem genannten Beispiel würde das Liefersystem die Notwendigkeit beschreiben, einen Gegenstand mit einem bestimmten Gewicht innerhalb einer vorgegebenen Zeit zu transportieren. Die Drohne würde zur Integration ihre Fähigkeit zur Bewegung und zum Transport leichter Güter beschreiben. Für diese Kopplung wären aufgabenorientierte Schnittstellen geeignet. Das Logistiksystem definiert die Aufgabe, die durchgeführt werden muss, z.B. den Transport eines Pakets mit einem definierten Gewicht zu einem definierten Ort innerhalb einer definierten Zeit. Integrierte Systeme kommunizieren die Parameter, innerhalb derer sie diese Aufgaben realisieren können, ohne dass hierfür die Details der Umsetzung kommuniziert werden müssen. Durch semantische Technologien wie z.B. Ontologien können sich Systeme über Fähigkeiten informieren und prüfen, ob eine geforderte Fähigkeit von den angebotenen Fähigkeiten eines anderen Systems realisiert wird. Da Ontologien erweitert werden können, ist dies auch dann möglich, wenn eine bestimmte Fähigkeit zur Entwicklungszeit eines Systems noch nicht zur Verfügung stand.

Es wäre jedoch zu kurz gegriffen, nur die Kommunikation und die ausgetauschten Daten zu standardisieren. Die komplexeren Herausforderungen bei der Kopplung von Autonomen Systemen liegen in der Integration von Diensten. Dabei wird ein Code von einem System auf ein anderes System geladen, um dieses mit neuen Funktionen auszustatten. Durch die Integration von neuen Diensten können Autonome Systeme ihre Fähigkeiten auch nach ihrer Fertigstellung erweitern. Im Kontext des Logistiksystems könnte dies der eilige Transport von Medikamenten sein. Dieser Dienst wird möglicherweise von einer dritten Partei realisiert, die diesen Dienst in Software definiert und für die Umsetzung auf die Fähigkeiten bereits integrierter Systeme zurückgreift. Die oben genannten Drohnen könnten z.B. eilige Lieferungen realisieren. Dafür muss ein neuer Code mit dem Transportsystem integriert werden. Die dadurch entstehenden Herausforderungen bezüglich der Sicherheit vor Angriffen liegen auf der Hand. Bevor dieses Szenario realisiert werden kann, sind sichere Ausführungsumgebungen notwendig, die den fremden Code isoliert ausführen, Fehlverhalten oder schädliches Verhalten erkennen und in einem solchen Fall automatisch wieder einen funktionierenden Zustand herstellen können.

Absicherung Autonomer Systeme

Heute steuern eingebettete Systeme eine Vielzahl von sicherheitskritischen Prozessen. Dies sind z.B. Fahrfunktionen wie das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) oder Produktionssysteme, die sicherstellen, dass ein Roboter seine Bewegungen einstellt, wenn ein Mensch eine Produktionszelle betritt. Heute werden diese Systeme dadurch abgesichert, dass z.B. mittels Fehlerbäumen (vgl. Vesely et al. 1981) die Ursachen von Fehlern identifiziert werden und geeignete Strategien im System verankert werden, die Fehler vermeiden oder deren Auswirkungen begrenzen. Für Autonome Systeme lassen sich diese bewährten Techniken nur eingeschränkt einsetzen. Durch die Fähigkeit, selbstständig Entscheidungen zu treffen, wird die Anzahl der möglichen Verhalten und Fehlerquellen so groß, dass diese sich nicht mehr a priori er-

mitteln lassen. Deutlich wird dies bei der Nutzung von neuronalen Netzen, beispielsweise zur Mustererkennung oder zur Entscheidungsfindung. Diese Systeme lassen sich aufgrund ihrer mathematischen Komplexität nicht mit bestehenden Methoden absichern, da diese auf dem Verständnis des internen Zustands eines Systems beruhen und auf dem Wissen, wie das System in einem Zustand auf einen definierten Stimulus reagiert. Hier sind neue Technologien, wie z.B. Safety Cages erforderlich, die Systeme nicht aufgrund ihres internen Zustands, sondern aufgrund ihres nach außen sichtbaren Verhaltens absichern.

Bei der Kopplung von Systemen zeigen sich Parallelen zu den oben beschriebenen Integrationstests. Wenn sich Autonome Systeme zu Verbünden integrieren, müssen auch für die Absicherung dieser Verbünde von Systemen neue Wege gefunden werden, um einen sicheren Betrieb zu garantieren. Garantiert werden muss z.B. die Qualität von ausgetauschten Daten und deren Aktualität sowie die Fähigkeit, auf einen Befehl innerhalb eines bestimmten Zeitfensters zu reagieren. Der dynamische Austausch von Sicherheitszertifikaten zum Aushandeln von minimalen Zusicherungen (vgl. Schneider/Trapp 2013) ist hier einer der möglichen Wege, um eine sichere Integration von Systemen zur Laufzeit zu erreichen.

Security

Da Autonome Systeme auch auf Daten zugreifen, ist deren Schutz eine weitere Herausforderung. Insbesondere dann, wenn persönliche Daten von Benutzer/-innen genutzt werden, muss deren Schutz vor einer missbräuchlichen Nutzung garantiert werden. Hierfür ist es wichtig, dass Nutzer/-innen ihren Systemen vertrauen können und wissen, was mit ihren Daten geschieht und was die Auswirkungen einer Einwilligung zur Nutzung sind. Hierfür gibt es Ansätze zur Datennutzungskontrolle, die darauf abzielen, auch technisch nicht versierten Benutzer/-innen die Kontrolle über ihre Daten zu ermöglichen (vgl. Steinebach et al. 2016). Aktuelle Forschungsvorhaben untersuchen beispielsweise, wie die Datennutzung durch Autonome Systeme dargestellt werden

kann, sodass deren Nutzer/-innen sinnvoll über erlaubte und verbotene Nutzungsszenarien entscheiden können.

Geschäftsmodelle

Die Nutzung von Autonomen Systemen wird neue Geschäftsmodelle ermöglichen. Während z.B. Carsharing heute hauptsächlich von Personen genutzt wird, die normalerweise auf andere Verkehrsmittel zurückgreifen und nur in bestimmten Situationen ein Auto benötigen, wird mit der Verbreitung autonomer Fahrzeuge die gemeinsame Nutzung von Fahrzeugen sprunghaft ansteigen. Schon allein deshalb, weil es nicht wirtschaftlich ist, ein autonom fahrendes Fahrzeug für eine längere Zeitdauer zu parken, werden autonom fahrende Fahrzeuge von mehreren Nutzer/-innen geteilt werden. Im Bereich der Produktion können Autonome Systeme selbständig Verträge aushandeln und die Produktion verändern, und so die Auslastung und den Gewinn eines Unternehmens maximieren.

Die Veränderung bestehender Geschäftsmodelle erfordert insbesondere von den menschlichen Nutzer/-innen Offenheit. In der Produktion findet man heute z.B. noch immer die Einstellung, dass eine Maschine, die nicht ausgelastet ist, nicht für einen Konkurrenten produzieren soll, auch wenn dies für beide Parteien einen Vorteil gegenüber Dritten bedeuten würde. Autonome Systeme werden es ermöglichen, vorhandene Ressourcen deutlich flexibler einzusetzen, und diese auch einzusetzen, um die Ziele von mehreren Systemen zu erreichen. Das nutzbare Potenzial dieser Systeme kann nur dann erreicht werden, wenn man dies zulässt. Beginnt man jedoch erst dann mit der Erforschung von Geschäftsmodellen, wenn die dafür notwendigen Autonomen Systeme schon existieren, riskiert man, von anderen Playern abgehängt zu werden. Die größte Herausforderung ist hierbei die Überwindung der ‚German Angst‘, der Angst vor Veränderungen.

DIGITALE ZWILLINGE ALS WEGBEREITER FÜR AUTONOME SYSTEME

Eine zentrale Herausforderung für jedes Autonome System, das Entscheidungen trifft, ist es, die Auswirkungen dieser Entscheidungen in seinem Kontext korrekt vorherzusagen und zu bewerten. Dabei werden ‚digitale Zwillinge‘ (vgl. Kuhn 2017) eine wichtige Rolle spielen. Digitale Zwillinge sind digitale Repräsentanzen von Dingen aus der realen Welt, die die relevanten Eigenschaften und Verhaltensweisen ihres realen Gegenstücks beschreiben. Sie repräsentieren dabei sowohl physische Objekte als auch nicht-physische Dinge wie z.B. Softwarekomponenten. Um eine sinnvolle Vorhersage zu ermöglichen, muss sich ein digitaler Zwilling in einer definierten Situation immer so verhalten, wie es sein reales Gegenstück auch tun würde. Dies bedeutet insbesondere, dass er sein reales Gegenstück mit der notwendigen Genauigkeit abbilden muss. Für einfache Vorhersagen können hier sehr einfache Modelle genügen. Ein Logistiksystem benötigt vielleicht nur die Information, wie lange ein Transport dauert. Andere Systeme dagegen benötigen wesentlich detaillierte Informationen, die z.B. auch die Interaktion mit anderen Systemen umfassen.

Ein zentraler Aspekt von digitalen Zwillingen ist die Fähigkeit, verschiedene Aspekte eines Systems mit einer einheitlichen Schnittstelle zu beschreiben. Sie umfassen zum einen Daten, die von dem Objekt der realen Welt stammen, aber auch Algorithmen, die ihr Gegenstück aus der realen Welt und dessen Verhalten akkurat beschreiben. Häufig handelt es sich dabei um Simulationsmodelle, die z.B. funktionale oder physische Eigenschaften des digitalen Zwillings simulieren. Werden diese Simulationsmodelle mit realen Daten ausgeführt, dann verhält sich der digitale Zwilling idealerweise genauso wie sein reales Gegenstück. Dies schafft die Möglichkeit, reale Tests durch virtuell durchgeführte Erprobungen zu ersetzen. Und das ermöglicht, automatisch Verbünde von Autonomen Systemen virtuell zu integrieren, diese im Hinblick auf geforderte Eigenschaften und Verhaltensweisen zu testen und deren Verhalten im Fehlerfall abzusichern.

Technisch erfordert dies einen virtuellen Raum, der digitale Zwillinge von unterschiedlichen Systemen integriert und ausführt. Dafür müssen digitale Zwillinge gemeinsame Schnittstellen besitzen, die eine Integration ihrer Simulationsmodelle ermöglichen. Das *Functional Mockup Interface* (FMI) (vgl. Blochwitz et al. 2011) ist eine Technologie, die dies grundsätzlich ermöglicht. Es führt Modelle in diskreten Zeitschritten aus und definiert den Datenaustausch zwischen Modellen anhand von definierten Ports. Simulationsmodelle werden als *Functional Mockup Units* gekapselt, die Simulationsmodelle und gegebenenfalls schon numerische Gleichungslöser beinhalten. Optional ist eine Simulation mehrerer Modelle mit einem gemeinsamen Gleichungslöser möglich. Um die Genauigkeit der gekoppelten Simulation zu erhöhen, können numerische Ereignisse, wie z.B. Sprünge in Funktionswerten, kommuniziert werden, sodass die Simulation um diese Werte herum von dem Gleichungslöser mit einer höheren Genauigkeit berechnet werden kann.

Durch eine kombinierte Simulation lässt sich das Verhalten komplexer Systemverbünde vorhersagen. Ebenfalls kann die Auswirkung einer Entscheidung auf die Qualität der eigenen Zielerreichung und auf die Zielerreichung von anderen Systemen mittels einer Simulation bewertet werden. Da in einem Verbund Autonomer Systeme alle Systeme jederzeit unabhängig voneinander Entscheidungen treffen können, ist es wichtig, dass alle Systeme eines Verbunds digitale Zwillinge besitzen, die sich zur Laufzeit integrieren lassen. Erst dann können alle beteiligten Autonomen Systeme die Auswirkungen ihrer Entscheidungen auf alle anderen Systeme berechnen und so überprüfen und gegebenenfalls zwischen der Erreichung eigener Ziele und der Erreichung von übergeordneten Zielen abwägen.

Die Kapselung von Simulationsmodellen in kompilierten *Functional Mockup Units* gewährleistet ebenfalls einen gewissen Schutz des enthaltenen geistigen Eigentums. Dieser Schutz ist jedoch nicht allumfassend und kann umgangen werden, wenn ausreichend Aufwand investiert wird. Müssen Simulationsmodelle auf sensible Algorithmen zurückgreifen, muss daher auch bei der Verwendung von digitalen

Zwillingen deren Schutz gewährleistet sein. Virtuelle Integrationsräume müssen daher auf vertrauenswürdigen Servern ausgeführt werden, die einen Schutz der digitalen Zwillinge vor dem Diebstahl geistigen Eigentums gewährleisten.

Neben der technischen Integration von Simulationsmodellen muss bei der Integration von digitalen Zwillingen sichergestellt sein, dass die ausgetauschten Daten zueinander passen. Auch wenn mithilfe des FMI-Standards eine durchgängig integrierte Simulation realisiert werden kann, scheitert ein solches Unterfangen in der Praxis oft am notwendigen Datenaustausch zwischen den unterschiedlichen Simulationsmodellen. Digitale Zwillinge müssen daher sicherstellen, dass alle relevanten Daten in einheitlichen Formaten bereitgestellt werden und dass bereitgestellte Daten auch von anderen Zwillingen in der gleichen Art verstanden werden. Dafür muss die Bedeutung eines Datenwertes klar definiert sein. Dies erfordert ein semantisches Verständnis der Bedeutung aller Daten. Ontologien bieten hierfür eine Lösung. Sie erlauben es, die Bedeutung von Daten maschinenlesbar zu definieren und dynamisch auszuwerten. Auch hier gibt es unterschiedliche Aktivitäten, die Ontologien bereitstellen und pflegen. Genannt seien hier eCI@ss³ und das IEC Common Data Dictionary⁴, die beide den fehlerfreien Datenaustausch zwischen Systemen unterschiedlicher Hersteller ermöglichen sollen. Beide Ontologien charakterisieren zentrale Elemente und deren Eigenschaften. Wenn sich die von digitalen Zwillingen bereitgestellten Daten auf Elemente der Ontologien beziehen, kann eine Software feststellen, ob es sich dabei um das gleiche Element handelt oder nicht. Neben der Gleichheit lassen sich in Ontologien auch weitere Eigenschaften von Elementen festhalten.

Mit Ontologien lassen sich z.B. auch die Fähigkeiten von Autonomen Systemen beschreiben. Durch die Gleichheitsrelation können Fä-

3 eCI@ss Klassifikation und Produktbeschreibung: www.eclass.eu vom 20.8.2018.

4 IEC 61360 – Common Data Dictionary (CDD): <https://cdd.iec.ch/cdd/iec61360/iec61360.nsf/TreeFrameset?OpenFrameSe> vom 20.8.2018.

higkeiten aus unterschiedlichen Ontologien aufeinander abgebildet werden. Auf diese Weise kann man der Situation begegnen, dass zwei unterschiedliche Systeme auch unterschiedliche Ontologien für die Dienstbeschreibung nutzen können. Durch die Definition einer Abbildung kann dennoch ein gemeinsames Verständnis der angebotenen Fähigkeiten realisiert werden.

ZUSAMMENFASSUNG

Zusammenfassend kann man ausführen, dass Autonome Systeme mit ihrer Fähigkeit zur selbständigen Entscheidung und Kooperation den Menschen in verschiedenen Bereichen unterstützen oder sogar ablösen werden. Für die Realisierung vollständig Autonomer Systeme sind jedoch noch einige Herausforderungen zu meistern, die Gegenstand aktueller Forschung sind. Diese umfassen einen einheitlichen Kommunikationsstandard; Fähigkeitenmodelle und Ontologien, die Fähigkeiten und Schnittstellen beschreiben; die Möglichkeit, zur Laufzeit das Verhalten integrierter Systeme zu testen; die Fähigkeit, die Auswirkungen von Entscheidungen auf das System und seinen Kontext vorherzusagen und die Möglichkeit, Autonome Systeme und Verbünde aus diesen zur Laufzeit abzusichern.

Diesen Herausforderungen stehen signifikante Potenziale Autonomer Systeme gegenüber. Autonome Systeme haben wirtschaftlich das Potenzial, bestehende Abläufe deutlich effizienter zu gestalten und z.B. die Produktion von kleinen Stückzahlen so zu gestalten, dass diese wirtschaftlich wird. Auch können sie Menschen von Routineaufgaben wie z.B. dem Autofahren entlasten, sodass diese etwas Produktiveres tun oder entspannen können. Gesellschaftlich können Autonome Systeme z.B. Mobilitätsdefizite beheben und es Menschen ermöglichen, länger in ihrer häuslichen Umgebung zu leben, ohne auf Pflege angewiesen zu sein. Ebenfalls lassen sich Autonome Systeme überall dort einsetzen, wo aufgrund lebensfeindlicher Bedingungen ein Einsatz von Menschen schwierig oder nicht möglich ist.

LITERATUR

- Blochwitz, Torsten/Otter, Martin/Arnold, Michael/Bausch, Constanze/Clauß, Christoph/Elmqvist, Hilding/Junghanns, Andreas/Mauss, Jakob/Monteiro, Manuel/Neidhold, Thomas/Neumerkel, Dietmar/Olsson, Hans/Peetz, Jörg-Volker/Wolf, Sebastian (2011): „The Functional Mockup Interface for Tool Independent Exchange of Simulation Models“, Konferenzbeitrag, Proceedings of the 8th Modelica Conference, 8th International Modelica Conference, Dresden, 20.-22.3.2011, <http://www.ep.liu.se/ecp/063/013/ecp11063013.pdf> vom 20.8.2018.
- Guarino, Nicola/Oberle, Daniel/Staab, Steffen (2009): „What is an Ontology?“, in: Steffen Staab/Rudi Studer (Hg.), Handbook on Ontologies, Berlin: Springer, S. 1-17.
- Kuhn, Thomas (2017): „Digitaler Zwilling“, in: Informatik-Spektrum 40/5, S. 440-444.
- Schneider, Daniel/Trapp, Mario (2013): Conditional Safety Certification of Open Adaptive Systems. ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems 8/2, Artikel 8.
- Steinebach, Martin/Krempel, Erik/Jung, Christian/Hoffmann, Mario (2016): „Datenschutz und Datenanalyse. Herausforderungen und Lösungsansätze“, in: Datenschutz und Datensicherheit – DuD 40/7, S. 440-445.
- Vesely, William E./Goldberg, Francine F./Roberts, Norman H./Haasl, David F. (1981): Fault Tree Handbook. NUREG-0492, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission.

