

Robustheit – eine Anforderung an intralogistische Systeme

Robustness – a Requirement related to intralogistic Systems

Christian Wildner

Fachgebiet Fabrikbetrieb
Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Ilmenau

Zuletzt häuften sich Erwähnungen des Begriffs 'Robustheit' in Veröffentlichungen, die die Intralogistik betreffen. Der vorliegende Beitrag bietet einen Überblick über einige dieser Sichtweisen, beleuchtet ergänzend eine Reihe relevanter Aspekte und begründet den Vorschlag einer Ausrichtung von 'Robustheit' in der Intralogistik auf die Verringerung unternehmerischer Risiken.

[Schlüsselwörter: robust, Intralogistik, zuverlässig, verfügbar, Redundanz, Risiko]

The term 'robustness' is mentioned with an increasing frequency in the latest papers referring to intralogistics. This text gives an overview over some of these perspectives, discusses some relevant aspects and motivates to aim 'robustness' at the reduction of business risks.

[Keywords: robust, intralogistics, dependable, available, redundancy, risk]

1 EINLEITUNG

Der Begriff 'Robustheit' taucht seit einigen Jahren immer wieder in die Intralogistik betreffende Veröffentlichungen auf. Viele, wenn auch nicht alle dieser Veröffentlichungen behandeln das Prinzip der autonomen Steuerung bzw. Selbststeuerung. Im umgangssprachlichen Deutsch meint 'robust' als Adjektiv oder Adverb das Gegenteil von 'anfällig' oder 'empfindlich'. Intuitiv naheliegend erscheint hierbei die inhaltliche Verwandtschaft zur Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie. Es fällt allerdings auf, dass für die in der Literatur als robust beschriebenen intralogistischen Systeme gleichzeitig kaum Aussagen über deren Verfügbarkeit oder Zuverlässigkeit gemacht werden. Das führt zu der Frage, welche tatsächlichen Unterschiede sich zwischen den als 'robust' deklarierten Betrachtungsobjekten und denjenigen ergeben, die gemeinhin als 'verfügbar' oder 'zuverlässig' gelten.

Angesichts dessen erscheint ein empirisches Vorgehen naheliegend, das sich auf einem Vergleich des beobachteten Betriebsverhaltens eines als robust beschriebenen Systems mit dem eines möglichst ähnlichen, verfügbaren gründet. Dieser Ansatz scheitert allerdings an elementaren Schwierigkeiten: veröffentlichte Daten zum Betriebsverhalten von robusten intralogistischen Systemen liegen bislang nicht bzw. nicht in ausreichendem Maß vor. Zudem tritt noch ein weiteres grundlegendes Problem zu Tage: die knappen Ausführungen zum Robustheitsbegriff in den Veröffentlichungen sind keineswegs inhaltlich deckungsgleich, sondern weichen hinsichtlich ihrer Bedeutung voneinander ab. Offensichtlich existieren unterschiedliche Verständnisformen von 'Robustheit'.

Eine detailliertere Untersuchung dieser inhaltlichen Unterschiede ist auch durch die These motiviert, dass es in Zukunft nötig sein wird, Vergleiche zwischen z.T. sehr unterschiedlichen technischen Lösungen anzustellen: Lösungen, die sich einerseits darin unterscheiden, welche autonomen bzw. selbststeuernden Systeme sie umfassen – andererseits auch danach, ob sie sich grundsätzlich auf zentral gesteuerte oder autonome bzw. selbstgesteuerte Systeme beziehen. Hierbei spielt die Abwägung sowohl besonderer systemspezifischer Leistungen eine Rolle wie auch ggf. die hierdurch begründeten besonderen Kosten. Ein eindeutiger, schärferer Robustheitsbegriff würde derlei Vergleiche unterstützen, indem er prägnant relevante Zusammenhänge und Eigenschaften verdichtet und unmissverständlicher zum Ausdruck bringt. Die Intralogistik verfügt bereits über ein entwickeltes und tradiertes Regelwerk, in das der Robustheitsbegriff bislang keineswegs in verbindlich-vereinheitlichter Weise – etwa in Form einer Richtlinie oder einer Norm – Eingang gefunden hat. Es stellt sich hierbei insbesondere eine Frage nach der 'begrifflichen Kompatibilität': Inwiefern können die mit 'Robustheit' konnotierten Inhalte sich mit den Mitteln der bereits vorliegenden Betrachtungsformen darstellen lassen – sollte es sich bei 'Robustheit' im Wesentlichen um eine Akzentuierung gewisser, einzelner Aspekte handeln – oder auf welche Weise es ggf. ange-

bracht erscheint, die bestehenden Sichtweisen und Theorien zu erweitern.

2 ZUVERLÄSSIGKEIT UND VERFÜGBARKEIT IN DER INTRALOGISTIK

Zur Zuverlässigkeits-/Verfügbarkeitstheorie existieren eine Reihe internationaler sowie nationaler Normen, wie auch Richtlinien des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI). Letztere sind teilweise allgemein auf technische Systeme bezogen, teilweise speziell für die Anwendung auf Transport- und Lageranlagen bzw. intralogistische Systeme formuliert. Bis auf eine Ausnahme [VDI 4486, 2012], auf die weiter unten eingegangen wird, unterscheiden sich die einzelnen Ausführungen [DIN 40 041, 1990] [VDI 4001-2, 2006] [VDI 3581, 2004] nur in wenigen Details, für die stellvertretend folgende [DIN EN 60300-1, 2003] an dieser Stelle aufgeführt wird:

„Verfügbarkeit ist die Fähigkeit einer Einheit, zu einem gegebenen Zeitpunkt oder während eines gegebenen Zeitintervalls eine geforderte Funktion unter gegebenen Bedingungen erfüllen zu können, vorausgesetzt, dass die erforderlichen äußeren Hilfsmittel bereitgestellt sind.“

Diesen unterschiedlich betitelten Standards [DIN EN 60300-3-15, 2009] [VDI 4001-2, 2006] [VDI 3581, 2004] gemein sind darüber hinaus ebenfalls die Berücksichtigung von Aspekten der Instandhaltung sowie die redundanter Strukturen.

Zuverlässigkeit bzw. Verfügbarkeit kann darüber hinaus auch allgemein als Qualitätsmerkmal eines Systems oder Prozesses aufgefasst werden [DIN EN ISO 9000, 2005] [DIN 40 041, 1990]. Dieser Umstand ermöglicht es, Methoden der Prozessbeschreibung im Sinne der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie anzuwenden. Ein Beispiel hierfür bildet die oben erwähnte Ausnahme [VDI 4486, 2012]:

„Die Leistungsverfügbarkeit gibt den anforderungs- und termingerechten Erfüllungsgrad von zwischen Vertragspartnern (Hersteller und Anwender) vereinbarten Prozessen unter Einhaltung der vereinbarten Rahmenbedingungen an. Dies bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Abrufs die zur Leistungserstellung notwendigen Ressourcen verfügbar sind, und zwar unabhängig von auftretenden Unsicherheiten, das heißt Schwankungen des Bedarfs oder von Störungen.“

3 SYSTEMORIENTIERTE ROBUSTHEIT

3.1 IEEE: ROBUSTNESS

Die überwiegende Mehrheit der Erwähnungen des Robustheitsbegriffs in der Fachliteratur mit Bezug auf Anwendungen in der Intralogistik erfolgt im Zusammenhang mit Betrachtungen von insbesondere autonom- bzw.

selbststeuernder Systeme, in deren Kontext zwar häufig – dann allerdings nur sehr knappe Anmerkungen auftauchen. Ergänzende Erkenntnisse ergeben sich durch die Betrachtung des Entwicklungspfades, den das Prinzip der autonomen Steuerung bis zu seinen ersten Anwendungen in physischen Systemen der Intralogistik genommen hat. Ein wichtiger Schritt in dieser Entwicklung bestand in der Umsetzung in Form von Software-Agenten (z.B. [Jennings, Sycara, & Wooldridge, 1998]), welche den Gegenstand internationaler Forschungsaktivitäten darstellen. Eine einflussreiche Institution zur internationalen Standardisierung stellt das „Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)“ – nach eigener Aussage „a leading consensus building organization that nurtures, develops and advances global technologies [IEEE, 2013]“ dar. Die vom Berufsverband IEEE publizierten „standards“ verfügen wohl nicht über die Verbindlichkeit einer internationalen Norm, können aber in ihrer internationalen Geltung mit den nationalen VDI-Richtlinien verglichen werden. Eine Bestimmung des Begriffs „robustness“ findet sich in einer Veröffentlichung des IEEE:

„robustness. The degree to which a system or component can function correctly in the presence of invalid inputs or stressful environmental conditions. See also: error tolerance; fault tolerance [IEEE Std 610.12, 1990].“¹

Ein naheliegender Ansatz zur Überführung der Logik der IEEE-Beschreibung auf das bestehende Theorie- und Regelwerk der Intralogistik ist es, die geforderte korrekte Funktionsweise eines Systems angesichts „invalid inputs“ mit der Forderung nach Funktionsfähigkeit auch bei eingetretenen Störungen zu übersetzen.

Hierbei gilt es allerdings klarzustellen, dass eine Störung in der Sichtweise der genormten Zuverlässigkeitstheorie als eine „fehlende, fehlerhafte oder unvollständige Erfüllung einer geforderten Funktion (...)“ [DIN 40 041, 1990] verstanden wird. Die korrekte Funktion einer Betrachtungseinheit, während diese zeitgleich einer Störung unterliegt, ist dementsprechend schlichtweg ein Paradoxon, ein logischer Widerspruch in sich.

3.2 FEHLERTOLERANZ

Eine andere Möglichkeit, die IEEE Definition von „robustness“ auf intralogistische Systeme zu übertragen, besteht darin, sich an den erwähnten Begriffen „error tolerance“ und „fault tolerance“ zu orientieren.

¹ In der Englisch-sprachigen Literatur existieren ausgehend von diesem Verständnis von Robustheit weitere begriffliche Entwicklungen und Übertragungen im informationstechnischen Zusammenhang – beispielsweise bzgl. der Domäne des Internets [Gall, 2003].

“error tolerance. The ability of a system or component to continue normal operation despite the presence of erroneous inputs. See also: fault tolerance; robustness [IEEE Std 610.12, 1990].”

“fault tolerance.

(1) The ability of a system or component to continue normal operation despite the presence of hardware or software faults. See also: error tolerance; fail safe; fail soft; fault secure; robustness.

(2) The number of faults a system or component can withstand before normal operation is impaired.

(3) Pertaining to the study of errors, faults, and failures, and of methods for enabling systems to continue normal operation in the presence of faults. See also: recovery; redundancy; restart [IEEE Std 610.12, 1990].”

Zur genaueren inhaltlichen Bestimmung der Begriffe „error“ und „fault“ lässt sich beispielsweise ein vorliegendes Konzept zur mechatronischen Zuverlässigkeit [Bertsche, Göhner, Jensen, Schinköthe, & Wunderlich, 2009] (siehe Abbildung 1: mechatronisches Zustandsmodell der Zuverlässigkeit [Göhner, Zimmer, Arnaout, & Wunderlich, 2004]) nutzen:

Der einwandfreie oder ‚fehlerfreie‘ Zustand eines mechatronischen Systems wird mit „0“ gekennzeichnet (siehe Abbildung 2: mechatronisches Zustandsmodell der Zuverlässigkeit [Göhner, Zimmer, Arnaout, & Wunderlich, 2004]). Nun wird angenommen, eine gewisse Funktion des Systems würde vorübergehend von diesem nicht ausgeführt, etwa weil die Situation bzw. die Umwelt dies derzeit nicht erfordert. Fällt unter diesen Umständen eine Komponente des Systems aus, die zur Ausübung der Funktion nötig ist („fault“), wechselt das System vom fehlerfreien in den fehlerhaften Zustand „1“. Wenn angesichts dessen zu einem späteren Zeitpunkt die entsprechende Funktion vom Gesamtsystem ausgeübt werden soll, schlägt dies fehl („call function/error“), und das System wechselt vom fehlerhaften in den Zustand „2“, welcher das System als gestört beschreibt. Mittels der Durchführung geeigneter Reparaturmaßnahmen („repair“) lässt sich das System aus den Zuständen „1“ oder „2“ wieder zurück in den fehlerfreien Zustand „0“ versetzen [Bertsche, Göhner, Jensen, Schinköthe, & Wunderlich, 2009, S. 28ff].

Die Bedeutung der Begriffe „fault“ und „error“ des mechatronischen Zustandsmodells der Zuverlässigkeit entspricht in wesentlichen Aspekten die der Begriffe „Fehler“ und „Störung“ der Zuverlässigkeitstheorie [DIN 40 041, 1990].

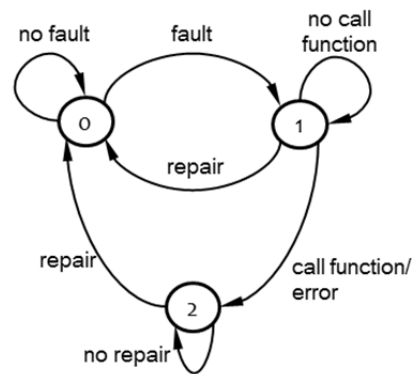


Abbildung 1: mechatronisches Zustandsmodell der Zuverlässigkeit [Göhner, Zimmer, Arnaout, & Wunderlich, 2004]

Bei der entsprechenden Übertragung des IEEE-Verständnisses von Robustheit ist zu beachten, das „error tolerance“ sich zunächst nicht allgemein auf den Versuch einer Funktionsausübung bei mindestens einer gestörten relevanten Komponente beziehen kann, sondern alleine den Umgang mit bereits fehlerbehafteten Anweisungslogiken adressiert. Interpretiert man „to continue normal operation“ als gänzlich unbeeinträchtigter Funktionsausübung, kann es sich bezüglich eines betrachteten Gesamtsystems bei „error tolerance“ nur um eine Variante der „fault tolerance“ handeln, da „error“ äquivalent zur Störung in der Verfügbarkeitstheorie mit Bezug auf die Prozessrealisierung (s.o.) eine Ausübung der geforderten Funktion ausschließt.

Das „fault tolerance“- Konzept verfügt über ein entsprechendes Pendant in der Zuverlässigkeitstheorie in Form des Konzepts der Fehlertoleranz [DIN 40 041, 1990]. Das Prinzip der Redundanz (siehe unten) stellt ein elementares Mittel zur Realisierung von Fehlertoleranz dar.

3.3 BETRIEBSBEDINGUNGEN

Eine andere Möglichkeit ergibt sich, wenn man die Ausführungen der IEEE zu „specified requirements“ aufgreift. Hierbei wird unter „stressful“ bzw. „stress“ insbesondere „(...) at or beyond the limits of its specified requirements“ [IEEE Std 610.12, 1990] verstanden. Entsprechend übertragen auf die Zuverlässigkeits- bzw. Verfügbarkeitstheorie, ergibt sich im Zusammenhang mit Robustheit die Forderung nach einer Unempfindlichkeit „gegenüber Veränderungen in den Nutzungsbedingungen“ [Bandow, Kohlmann, & Wenzel, 2008]. Dieser Ansatz lässt sich beispielsweise für die Entwicklung eines allgemeinen Anforderungsmodells für die Spezifikation von Steuerungsproblemen in dezentralen Materialflusssystemen vertiefen (Libert, 2011, S. 75ff).

Angesichts dieses Ansatzes drängt sich unweigerlich die Frage danach auf, welche Betriebssituationen mit welcher Priorität in diesem Zusammenhang zu betrachten

sind. Diese Grundfrage lässt sich in folgende Teilfragen aufgliedern: Welches sind die relevanten Betriebsbedingungen? Sind es zwangsläufig (nur) die wahrscheinlichen? Sind es die ‚denkbaren‘? Welche Hilfsmittel und Annahmen zur Ergründung der denkbaren sind zu nutzen bzw. nutzbar? Gibt es demgegenüber auch undenkbar bzw. ‚nicht vorgedachte‘ [Wilke, 2005, S. 21] Betriebsbedingungen?

Hierzu ist anzumerken, dass die Betrachtung von Nutzungs- oder Betriebsbedingungen bzw. Betriebsituationen unweigerlich in enger Verknüpfung zu der Betrachtung von möglichen Fehlern oder Störungen steht: Ein unerlässliches Kriterium dafür, ob die Betrachtung eines bestimmten möglichen Settings von Betriebsbedingungen relevant unter dem Gesichtspunkt der ‚Robustheit‘ ist, bildet die Frage, ob die Erfüllung der vom System geforderten Funktion gefährdet wird oder nicht. Diese Feststellung mag zwar für solche Fälle wenig hilfreich sein, für die eine annähernd vollständige Beschreibung eines geforderten Funktionsumfangs schwierig ist – für alle übrigen Fälle entfaltet sie jedoch unweigerlich einen wesentlichen Nutzen bei der Identifikation relevanter Zusammenhänge.

In eine ähnliche Richtung wie der oben erwähnte [Bandow, Kohlmann, & Wenzel, 2008] weist der folgende Ansatz:

„Im Zusammenhang mit selbstorganisierten Systemen ist ein Verständnis der Robustheit als ein definiertes Verhalten des Systems (...) zielführend. In diesem Sinne führt eine vollständige Beschreibung des Systemverhaltens zu einem robusten System, da stets eine definierte Reaktion ausgelöst wird [Nopper J. R., 2010, S. 227].“

Hierzu ist anzumerken, dass beim Entwurf von automatisierten Systemen, die endlich viele Zustandsübergänge aufweisen [Favre-Bulle, 2004, S. 274], die ‚Definition‘ im Sinne einer eindeutigen Bestimmung jeglicher möglichen Verhaltensform eines Systems auf zweierlei

Art und Weise unter Anwendung von Sonderformen von Petri-Netzen durchgeführt wird: Mittels sog. Erreichbarkeitsgraphen [Favre-Bulle, 2004, S. 280f], kann einerseits geprüft werden, ob sämtliche vorgesehenen Systemzustände in Folge einer Anzahl von Zustandsübergängen grundsätzlich erreicht werden können. Andererseits ermöglichen sie die Identifikation solcher Systemzustände, die nicht mehr ohne äußeren Eingriff durch das System verlassen werden können – sog. ‚Deadlocks‘ bzw. ‚Verklemmungen‘.

Derlei Methoden werden allgemein eingesetzt, um Fehler bzw. „faults“ entworfenen bzw. vorliegender Steuerungen aufzudecken, wobei Petri-Netze allgemein als umfangreich dokumentierte Beschreibungsmittel der Automatisierungstechnik [VDI/VDE 3681, 2005] gelten.

3.4 ALLGEMEINE REDUNDANZ

Das Prinzip der Redundanz findet im Zusammenhang mit der ‚Robustheit‘ eines Systems häufig Erwähnung. Teilweise beschränkt sich die Begründung für die Existenz einer entsprechenden, vorliegenden ‚Robustheit‘ auch alleine auf das Vorhandensein redundanter Komponenten:

„Robustheit: Durch das Auflösen des zentralen Leitrechners und somit eines Single Point of Failures sind die Auswirkungen bei einem Ausfall von dezentralen Automatisierungskomponenten in der Regel lokal begrenzt [Haußner, Elger, & Trautmann, 2010, S. 251].“

„Durch die redundante Speicherung ist das System robuster, da auch bei Ausfall eines Routingagenten andere weiterhin Routen berechnen können [flw, 2012].“

Zu Erscheinungsformen der Redundanz existieren Ausführungen in der gültigen Normung [DIN 40 041, 1990]. Eine mögliche Darstellungsform für in einem Gesamtsystem vorhandene Formen von Redundanz zeigt Abbildung 2 (siehe Abbildung 2: Modell redundanter Funktionen und Teilsysteme – ausführlich).

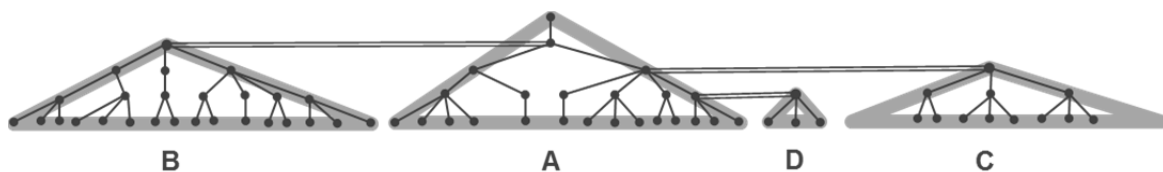


Abbildung 2: Modell redundanter Funktionen und Teilsysteme - ausführlich

Die mit „B“, „A“, „D“ und „C“ beschrifteten grauen Dreiecke stellen hierbei abgrenzbare Teilsysteme dar. Jedes Teilsystem verfügt über eine Anzahl von Elementen, welche in der Darstellung durch die Punkte der untersten Ebene repräsentiert werden. Jedes Element erfüllt eine Teilfunktion. Die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Elementen eines Teilsystems entsprechen dem

strukturellen Aufbau des Teilsystems. Sie stellen dar, welche Teilfunktionen in welcher Form im jeweiligen Teilsystem zu übergreifenderen Teilfunktionen aggregiert werden. Der oberste Punkt des Teilsystems „A“ repräsentiert die vom Gesamtsystem geforderte (Gesamt-) Funktion. Es soll nun davon ausgegangen werden, dass dieses Teilsystem „A“ aufgrund seines Aufbaus in der Lage ist,

die geforderte Funktion zu erfüllen. Die doppelten Querlinien, die von einzelnen Elementen des Teilsystems „A“ zu den übrigen Teilsystemen „B“, „C“ und „D“ führen sollen vorhandene Redundanzen darstellen: die entsprechende Teilfunktion des Elements des Teilsystems „A“ soll auch durch das jeweilig andere Teilsystem „B“, „C“ oder „D“ ausgeführt werden können.

Ein entsprechendes Modell kann reale Zusammenhänge nur sehr eingeschränkt wiedergeben: Entsprechende Redundanzen können beispielsweise von Produkt zu Produkt variieren – oder hängen möglicherweise von der aktuellen Auslastung der Teilsysteme ab und wären somit veränderlich über die Zeit. Nicht dargestellt sind darüber hinaus beispielsweise auch einzelne Elemente, auf deren Teilfunktion mehrere Teilsysteme, also nicht nur ein einzelnes, zugreifen. Ebenfalls nicht in der dargestellten Fassung enthalten sind Teilsysteme, die einerseits über eine Redundanzfunktion verfügen, andererseits aber diese nicht mangels entsprechender Elemente bis auf die unterste Ebene nötiger Teilfunktionen vollständig ausüben können – sondern auf weitere entsprechende Redundanzen angewiesen sind.

Abbildung 3 (siehe Abbildung 3: Modell redundanter Funktionen und Teilsysteme – vereinfacht) stellt das in Abbildung 2 (siehe Abbildung 2: Modell redundanter Funktionen und Teilsysteme – ausführlich) dargestellte Gesamtsystem in vereinfachter Form dar. Deutlich wird hierbei, dass es zur Erfassung der in einem Gesamtsystem vorhandenen Redundanz nicht ausreicht, nur die Anzahl der Querlinien bzw. der entsprechend nutzbaren Teilsysteme (entlang der x-Koordinate) zu erfassen. Vielmehr sind Redundanzen auch danach zu bewerten, von welchem ‚Aggregationsniveau‘ die Teilfunktionen sind, auf die sie sich beziehen (Positionen der doppelten Querlinien bzgl. der y-Koordinate).

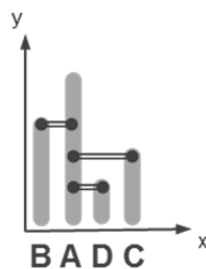


Abbildung 3: Modell redundanter Funktionen und Teilsysteme - vereinfacht

3.5 FUNKTIONALE UND IDENTISCHE REDUNDANZ

Im Zusammenhang mit ‚Robustheit‘ werden ergänzend auch weitere Formen, nämlich die ‚identische‘ und die ‚funktionale‘ Redundanz unterscheiden [Windt, Hütt, & Meyer, 2012, S. 494f]:

„If an element is an exact copy of another one, this is classified as an identical redundancy.“ (...)

„If an element can fulfill the function of another element but is not identical, this is described as a functional redundancy. An example for this might be a machine A which is able to perform an operation that machine B can also perform yet they are not the same type of machine [Windt, Hütt, & Meyer, 2012, S. 495].“

Puffer lassen sich in diesem Zusammenhang ebenfalls als Konstrukte der Redundanz betrachten [Windt, Hütt, & Meyer, 2012, S. 495] – sie werden sowohl als identische als auch als funktionale Form der Redundanz klassifiziert. Entsprechend dieser Sichtweise handelt es sich bei möglichen Variationen einer Fahrroute ebenfalls um Redundanz, nämlich um eine funktionale Form [Windt, Hütt, & Meyer, 2012, S. 495].

Im Zusammenhang mit Fahrrouten ist es zudem hilfreich davon auszugehen, dass angesichts einer geforderten Transport-Funktion der Transportweg selbst ein zur Funktionserfüllung nötiges Mittel darstellt. Existieren mehrere mögliche Transportwege, kann man dementsprechend von einer vorliegenden Redundanz bzw. von ‚vermaschter‘ Redundanz [DIN 40 041, 1990] sprechen.

Beschreibt man einen Puffer eines logistischen Systems genauer, sehen einige Autoren ihn als dimensionierten Warteraum [Arnold & Furmans, 2009, S. 112], während andere einen Puffer als einen Bestand betrachten [Pfohl, 2010, S. 87]. Bezüglich eines vorgelagerten Systems ist ein Puffer dann von Vorteil, wenn er über freien, befüllbaren Raum verfügt und er somit dem System die Möglichkeit verschafft, Einheiten ohne Rücksicht auf die aktuelle Auslastung eines anderen Nachfolgers abzugeben. Hinsichtlich eines nachgelagerten Systems ist hingegen ein Puffer dann von Vorteil, wenn er über einen Bestand an Einheiten verfügt, der gleichmäßige ununterbrochene vollständige Auslastung ermöglicht. Betrachtet man freie Pufferplätze bzw. gepufferte Einheiten als Ausprägungsformen der Redundanz, impliziert man damit entsprechende Forderungen an die Steuerungen der vor- und nachgelagerten Systeme, was einer isolierten Systembetrachtung im Grunde widerspricht. Die Möglichkeit, Systemfunktionen in ‚bedingter‘ Form zu beschreiben – etwa der Art: Die Systemfunktion umfasst dieses und jenes, vorausgesetzt, entsprechende Transporteinheiten für die Bearbeitung und entsprechende, freie Räume liegen für die Einheitenabgabe vor – wird i. Allg. nicht explizit genutzt.

Sieht man von diesen Puffer-spezifischen Betrachtungen einmal ab, so stellt sich angesichts des Konzepts der ‚funktionalen‘ Redundanz die Frage, inwiefern es sich hierbei neben der Abgrenzung zur ‚identischen‘ Redundanz tatsächlich um ein inhaltlich neues Konzept handelt – oder ob es nicht vielmehr angebracht wäre, weiterhin von Redundanz in einer allgemeinen Ausprägungsform zu sprechen.

Insbesondere im Zusammenhang mit der Erbringung von Nachweisen entsprechender Systemeigenschaften im Rahmen von Geschäftsbeziehungen zwischen Herstellern und Anwendern [Maier, 2012] kam es in der jüngeren Vergangenheit zur Entwicklung der VDI-Richtlinie zur Leistungsverfügbarkeit [VDI 4486, 2012], d.h. zu einer prozessorientierten Betrachtungsweise relevanter Aspekte der Verfügbarkeit. Versteht man ‚Prozess‘ in Anlehnung an Vorgehensweisen der Prozessanalyse hierbei als das, was tatsächlich unter spezifischen betrieblichen Bedingungen passiert, verringert sich gegenüber einer systemorientierten Betrachtung die Gefahr, relevante Einflüsse und Bedingungen verallgemeinernd außer Acht zu lassen.

Im Übrigen sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Berücksichtigung von Redundanz ebenfalls in prozessorientierten Perspektiven praktiziert wird (z.B. [Kuhn, 2008, S. 224f]).

4 PROZESSORIENTIERTE SICHTWEISE

4.1 ROBUSTER PRODUKTIONSPROZESS

Eine prozessorientierte Beschreibung von Robustheit bzgl. der Produktion liegt in Form des folgenden Ansatzes vor, welcher auch auf für allgemeine Logistikprozesse verallgemeinerbare Aspekte der Produktionslogistik eingeht:

„Ein Robuster Produktionsprozess zeichnet sich dadurch aus, dass er gegen unerwünschte Einflussgrößen [VDA , 2007, S. 18]“ – das sind solche, „die außerhalb der geplanten Toleranz“ verlaufen und die über das Potenzial verfügen, „die Leistungsfähigkeit des Robusten Produktionsprozesses negativ“ zu beeinflussen [VDA , 2007, S. 14] – „resistent ist und eine termin- und abrufgerechte Produktion mit ausgezeichneter Qualität unter Einhaltung des geplanten wirtschaftlichen Aufwandes sicherstellt [VDA , 2007, S. 18].“

Die Verfasser erwarten also von einem robusten Prozess, dass er auch angesichts einer Vielzahl möglicher Umwelteinflüsse das Soll-Ergebnis hinsichtlich relevanter Qualitätsforderungen unter Wahrung des Wirtschaftlichkeitsprinzips erfüllt. In diesem Zusammenhang können sich Qualitätsforderungen nicht zwangsläufig nur an produktbezogene Eigenschaften, sondern auch an die Qualität logistischer Leistung richten [Gottschalk, 1996]. Ob die Werte der jeweils betrachteten Kenngröße eines Prozesses sich innerhalb der vorgegebenen Toleranz bewegen, drückt allgemein die ‚Prozessfähigkeit‘, ein Begriff der statistischen Prozesskontrolle, aus [VDA , 2007, S. 101] [Gottschalk, 1996, S. 44] [Linß, 2005, S. 324ff].

4.2 ROBUSTE REGELUNG

Im Zusammenhang mit autonomen bzw. selbststeuernden Systemen existiert darüber hinaus folgende, im

weiteren Sinn prozessorientierte Sichtweise auf Robustheit:

Es „(...) wird insgesamt das übergeordnete Ziel, die Realisierung einer höheren Systemrobustheit, also die Beibehaltung beziehungsweise Rückkehr in einen stabilen Systemzustand nach Einwirkung einer Klasse von Störungen, angestrebt [Scholz-Reiter & Höhns, 2006, S. 670].“

Beim Regelungsentwurf ging man lange Zeit von der Vorstellung aus, ein realer, dynamischer Prozess könne ausreichend genau als entsprechend modellierte Komponente (Regelstrecke) in einer Konfiguration aus miteinander verbundenen Komponenten (Messglied, Regler, etc.) betrachtet werden, die sich angesichts gewisser, möglicher Umwelteinflüsse in einer erwünschten Weise – d.h. im Allgemeinen: stabil – verhalten bzw. eine entsprechende Systemantwort liefern sollen [Dorf & Bishop, 2006]. Beim Entwurf ‚robuster‘ Regelkreise geht man dagegen davon aus, dass hierbei relevante Aspekte zum Zeitpunkt des Entwurfs nicht vollständig bekannt sind und versucht diese dennoch angemessen zu berücksichtigen. Dies betrifft etwa das ‚Rauschen‘ des Messglieds, die ‚Störgröße‘ für die Einflüsse der Umwelt auf den Prozess [Sanchez-Pena & Sznaier, 1998, S. 3], sowie – bzgl. des realen, dynamischen Prozesses – mögliche Parameteränderungen, Formen des dynamischen Verhaltens, Zeitverzögerungen und Änderungen des Gleichgewichtszustands [Dorf & Bishop, 2006, S. 965]. Man spricht in diesem Zusammenhang von ‚Unsicherheiten‘ zum Entwurfszeitpunkt und setzt, um diese angesichts einer konkreten Problemstellung berücksichtigen zu können, eine gewisse, begrenzte Unsicherheitsklasse – „a bounded uncertainty set“ [Sanchez-Pena & Sznaier, 1998, S. 32] – an.

4.3 PROZESSE UND DAS „INTERNET DER DINGE“

Eine mögliche ausdrücklich prozessorientierte Sichtweise wurde bislang im Zusammenhang mit robusten autonomen bzw. selbststeuernden Systemen der Intra-logistik nicht berücksichtigt².

Autonome Akteure des sog. ‚Internets der Dinge‘ treffen die nötigen Entscheidungen über den jeweiligen Prozessverlauf situationsbezogen – was einer entsprechenden vorbestimmenden Beschreibung des Prozesses offensichtlich entgegensteht. Man könnte dementsprechend von im Vorfeld ‚unbestimmten Prozessen‘ sprechend. Für derlei unbestimmte Prozesse existieren nichts desto trotz Vorgaben für ihre Durchführung: Das Prinzip der Selbststeuerung/Autonomie bedeutet, die bislang zentral ausge-

² Ein Grund hierfür mag in der Abwertung des allgemeinen Ansatzes des zentralen Computer-gestützten Prozessmanagements gegenüber den Möglichkeiten der sog. Serviceorientierung mit Hilfe autonom bzw. selbststeuernder Systeme [ten Hompel, 2008, S. 105] liegen.

fürten Entscheidungen zu verlagern. Das Treffen einer rationalen Entscheidung erfordert die Möglichkeit zur Konstruktion eines Entscheidungsraums ebenso wie die Existenz eines Zielsystems [Bamberg, Coenberg, & Krapp, 2008, S. 26ff]. Die verallgemeinerbaren prinzipiellen Elemente eines solchen Zielsystems können als Betriebsstrategien (Libert, 2011) aufgefasst und implementiert werden. In einer konkreten Betriebssituation werden diese um weitere Informationen ergänzt, die sich aus konkreten, spezifischen Aufträgen vorliegender Transporteinheiten (TE) ergeben. Diese spezifischen Auftragsinformationen für autonome Akteure werden auch ‚Workflows‘ bzw. Vorgaben für ‚Arbeitsabläufe‘ genannt (Libert, Chisu, & Keutner, 2010):

„Das Konzept Workflow repräsentiert einen Arbeitsablauf für Transporteinheiten. Ein Arbeitsablauf kann aus einem oder mehreren Arbeitsschritten bestehen. (...) Im einfachsten Fall besteht der Arbeitsablauf aus einem einzelnen Arbeitsschritt. Dieser bezieht sich auf genau eine Funktion, die für eine TE ausgeführt werden muss. Diese Funktion kann im System von mehreren Modulen oder Diensten angeboten werden, so dass die referenzierte TE selbst entscheidet, von welchem Modul oder Dienst diese Funktion erbracht werden soll (Libert, Chisu, & Keutner, 2010, S. 85).“

Betrachtet man einen Prozess in erster Linie als einen Vorgang, für dessen Verlauf Prozessziele in Form von Soll-Vorgaben bestehen, deren Erreichungsgrad während der Prozessrealisierung und danach überprüfbar sein sollen, ergeben sich aus den oben beschriebenen Zusammenhänge entsprechende Ansätze, um für einzelne Transporteinheiten von sich ereignenden Prozess sprechen zu können. Naheliegende Soll-Vorgaben für Transporteinheiten wären etwa die Durchlaufzeit oder die Termintreue. Denkbar ist aber genauso ein entsprechendes Monitoring einzelner technischer Arbeitsmittel hinsichtlich ihrer aktuellen Auslastung, d.h. über die ‚Funktionen‘, die sie potentiell ausüben können und derzeit tatsächlich ausüben.

5 ZWISCHENFAZIT

Die bis hierhin identifizierten und untersuchten Aspekte vorliegender Sichtweisen auf ‚Robustheit‘ lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Die Umsetzung des fault-tolerance-Konzepts macht ein System ‚robust‘.
- ‚Robuste‘ Systeme unterscheiden sich gegenüber nicht-robusten Systemen darin, dass (auch) unter anderen/weiteren Betriebsbedingungen ihre Funktionstüchtigkeit bestehen bleibt.
- ‚Fähige‘ Prozesse können als ‚robuste‘ Prozesse betrachtet werden.

- Von einem ‚robusten‘ Prozess wird erwartet, dass, sollte er sein Soll-Ergebnis einmal aufgrund des Eintritts eines nicht (genau) vorherzusehenden Ereignisses nicht erreichen, er sich ohne externen Eingriff entsprechend korrigiert.

Diese bis hier hin ausgeführten unterschiedlichen system- und prozessorientierten Sichtweisen bleiben eine wichtige Antwort in den betrachteten Zusammenhängen schuldig: Welche der unzähligen theoretisch denkbaren unerwünschten Einwirkungen in Form von „faults“, Betriebsbedingungen, Einflussgrößen oder Unsicherheiten sind im Sinne eines ‚robusten‘ Designs zu berücksichtigen?

6 ROBUSTHEIT IN ANBETRACHT VON UNSICHERHEIT

Nach dem Wirtschaftlichkeitsprinzip zu handeln bedeutet im Allgemeinen eine Handlungsoption dann zu wählen, wenn ihr Aufwand und ihr Nutzen in einem günstigen Verhältnis stehen. In der unternehmerischen Realität lassen sich allerdings Aufwand und Nutzen einer Option im Vorfeld einer zukunftsorientierten rationalen Entscheidung nur selten präzise determinieren. Vielmehr handelt es sich häufig um mit zunehmender Unsicherheit behaftete Größen – weshalb man neben Aufwand und Nutzen in diesem Zusammenhang ergänzend auch von Risiko und Chance sprechen sollte. Ein wesentlicher Einfluss, der zu immer mehr Entscheidungsunsicherheit beiträgt, rührt von der zunehmenden Dynamisierung, Turbulenz bzw. Volatilität der Märkte her. Angesichts dieser marktinduzierten Unsicherheit ergibt sich ein neuer, besonderer Druck zur Sicherheit bzw. Verlässlichkeit auf die wertschöpfenden Prozesse im Unternehmen, der Supply-Chain, des Unternehmensnetzwerks – welcher sich u.a. bereits in Form des Gesetztes zur Kontrolle und Transparenz im Unternehmensbereich (KonTraG) manifestiert hat. Angesichts dessen kann ‚Robustheit‘ als **ein Ausdruck für die Absicherung jener betriebswirtschaftlichen Wertschöpfung** verstanden werden, **die im Rahmen der Realisierung intralogistischer Prozesse erfolgt bzw. erfolgen soll** – oder anders ausgedrückt: Maßnahmen zur Erhöhung der ‚Robustheit‘ sollten darauf abzielen, unternehmerische Risiken zu vermindern.

Betrachtet man ‚Robustheit‘ in diesem betriebswirtschaftlichen Kontext wird auch klar, dass Maßnahmen oder Vorkehrungen zur Erhöhung von ‚Robustheit‘ nicht etwa alleine nach ihrer Wirksamkeit beurteilt und ausgewählt werden dürfen, sondern selbst vollständig dem Wirtschaftlichkeitsprinzip zu unterwerfen sind – d.h. in ihre Bewertung auch der für ihre Umsetzung notwendige Einsatz mit beachtet werden muss: Bei der Erhöhung bzw. Herstellung von ‚Robustheit‘ ist zwischen dem sich ergebendem Aufwand einerseits und andererseits des erreichbaren Ausmaßes an Risikominderung abzuwägen. Etwas knapper formuliert lautet diese Forderung

schlichtweg: Die Durchführung einer Maßnahme zur Steigerung von Robustheit muss sich rechnen.

Begreift man diese beiden Eigenschaften, Aufwand und Maß der Risikominderung, als die wesentlichsten Auswahlkriterien für in Frage kommende Maßnahmen zur Steigerung von ‚Robustheit‘, ist eine Eingrenzung der Betrachtung auf die im vorhergehenden Kapitel genannten Aspekte ‚robuster‘ Systeme bzw. Prozesse nicht mehr ausreichend begründet. Vielmehr lässt sich die entsprechende Liste um weitere Inhalte wie folgt erweitern:

- Vermeidung der Fehlerentstehung;
- früh- bzw. vorzeitige Aufdeckung und Behebung von Fehlern;
- Fehlertoleranz (fault-tolerance) (s.o.);
- keinerlei Beeinträchtigungen in Folge vielfältiger Betriebsbedingungen (s.o.)
- Prozessfähigkeit (s.o.);
- Prozessstabilität auch angesichts nicht (genau) vorherzusehender Ereignisse (s.o.).

Das allgemeine Risikomanagement ist Gegenstand betriebswirtschaftlicher Betrachtungen. Die Kernelemente des Risikomanagements bilden grundsätzlich die Risikoidentifikation, die Risikoanalyse/-bewertung und die Risikosteuerung [Dörner, Doleczik, & Günter, 2000, S. 202].

Neben den bereits oben angesprochen motivierenden Entwicklungen der Märkte und gesellschaftlicher Rahmenbedingungen entspricht ein Robustheitskonzept in der Intralogistik den entsprechenden Betrachtungen des Supply Chain Managements (siehe z.B. [Freiwald, 2005, S. 123ff]), wie es bereits auch m.E. für die Transportlogistik verfolgt wird [4flow AG]. Darüber hinaus führt u.a. der Trend zur Automatisierung in der Intralogistik zu immer neueren und komplexeren Systemen, von denen man sich nützliche Effekte verspricht, deren Nutzbarmachung einerseits der bestehende Wettbewerb gebietet – andererseits wird es immer schwieriger, sämtliche betrieblichen Implikationen entsprechender Systemkonstellationen zu überblicken. Als ein Beleg hierfür kann der Begriff der ‚Emergenz‘ dienen, der häufig in Veröffentlichungen über neuartige, komplexe System verwendet wird. Unter ‚Emergenz‘ wird i. Allg. die nicht ohne weiteres vorhersehbare Entstehung neuer Eigenschaften eines Systems verstanden. Eine mögliche Sichtweise auf diesen Begriff stellt die Bedeutung des Kenntnisstandes des jeweiligen System-Betrachters heraus:

„Ob etwas ‚emergent‘ ist oder nicht, steht nicht ein für allemal (...) fest, sondern ist (...) [u.a., Anm. C.Wildner] von dem theoretischen Wissen abhängig, das zur Verfügung steht [Esser, 2000, S. 3].“

Anders ausgedrückt wird der Begriff ‚Emergenz‘ dann nicht verwendet, wenn ein ausreichend guter Kenntnisstand über das entsprechende System und sein Verhalten vorliegt und letzteres vollständig erklärt werden kann.

Die Bedeutung des jeweils vorliegenden Kenntnisstands lässt des Weiteren auch im Zusammenhang mit möglichen Risiken diese nach den drei folgenden Kategorien unterscheiden [Maluf, Gawdiak, & Bell, 2005]:

- „known-known“
Die Umstände und Ursachen eines Risikos sind nicht nur vollständig bekannt – es konnten darüber hinaus auch wirksame Gegenmaßnahmen getroffen werden, die das Risiko vollständig auflösen.
- „known-unknown“
Die Existenz eines Risikos ist bekannt. Das Risiko lässt sich in gewisser Weise modellieren.
- „unknown-unknown“
Es ist schlichtweg nicht bekannt, ob ein Risiko überhaupt besteht.

Diese drei Kategorien sind in diesem Zusammenhang nicht als scharf voneinander abgegrenzt zu verstehen. Ausgehend von einem ersten Verdacht oder einem Hinweis wächst vielmehr im Verlauf intensiverer Untersuchungen die Gewissheit über ein bestehendes gewisses Risiko, was dem Übergang aus der Kategorie „unknown-unknown“ in die Kategorie „known-unknown“ entspricht. Ein ‚erster Hinweis‘ kann hierbei auch der unvermittelte Eintritt eines Schadens ‚wie aus heiterem Himmel‘ sein. Mit dem Zuwachs weiteren Wissens über das Risiko und dem Identifizieren bzw. dem Ergreifen entsprechend wirksamer Gegenmaßnahmen schließlich wird die Voraussetzung geschaffen, um mit dem Risiko-Ausschluss in die Kategorie „known-known“ übergehen zu können.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Zum Begriff der ‚Robustheit‘ sind hiermit eine Reihe unterschiedlicher Erwähnungen sowie inhaltlich verwandte Aspekte der Fachliteratur näher betrachtet. Mit dem Verweis auf das spezifische unternehmerische Risiko ist ein sinnvolles übergeordnetes Ziel im Bestreben nach ‚Robustheit‘ identifiziert, wobei auch Ansätze für den angemessenen Umgang mit unsicherem Wissen und deren Notwendigkeit dargelegt sind.

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung in der technischen Logistik und damit auch der Intralogistik ist geprägt vom Aufeinandertreffen einer Vielzahl unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen – und bemüht sich darüber hinaus auch insbesondere um Verständlichkeit gegenüber ‚dem Praktiker‘. Hieraus ergibt sich ein anhaltendes, fortwährendes Ringen um Ausdrucksformen und Begrifflichkeiten, das v.a. den betrachteten Inhalten,

daneben aber auch den unterschiedlichen fachsprachlichen Traditionen gerecht zu werden versucht. In diesem Sinne erhebt dieser Beitrag für sich nicht den Anspruch, letzte, allgemeingültige Wahrheiten über den Begriff der ‚Robustheit‘ zum Ausdruck gebracht, geschweige denn alle offenen Fragen beantwortet zu haben – sondern eher einen Schritt auf einem langen Weg in Richtung einer weitgehenden Klärung des Begriffs für die Intralogistik zu gehen.

LITERATUR

- 4flow AG. (kein Datum). *InKoRISK*. Abgerufen am 12. 08 2013 von Integrierte Terminierung und Transportplanung unterstützt durch kollaboratives Risikomanagement in der Automobilindustrie: <http://inkorisk.research4.eu/>
- Arnold, D., & Furmans, K. (2009). *Materialfluss in Logistiksystemen* (2. Ausg.). Heidelberg, Dordrecht, u. a.: Springer.
- Bamberg, G., Coenenberg, A. G., & Krapp, M. (2008). *Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre* (14. Ausg.). München: Franz Vahlen.
- Bandow, G., Kohlmann, B., & Wenzel, S. (2008). Robustheit und Modernisierung - ein Widerspruch? *Modernisierungsfibel: Retrofit und Co., Grundlagen, Projekte, Unternehmen*, S. 12-14.
- Bertsche, B., Göhner, P., Jensen, U., Schinköthe, W., & Wunderlich, H.-J. (2009). *Zuverlässigkeit mechatronischer Systeme. Grundlagen und Bewertung in frühen Entwicklungsphasen*. Berlin Heidelberg: Springer.
- DIN 40 041. (1990). *Zuverlässigkeit - Begriffe. Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 60300-1. (2003). *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 1: Zuverlässigkeitsmanagementsysteme. Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- DIN EN 60300-3-15. (2009). *Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-15: Anwendungsleitfaden - Technische Realisierung der Systemzuverlässigkeit. Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- DIN EN ISO 9000. (2005). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Deutsche Norm*. Berlin: Beuth.
- Dorf, R. C., & Bishop, R. H. (2006). *Moderne Regelungssysteme* (10. Ausg.). München: Pearson Education Deutschland GmbH.
- Dörner, D., Doleczik, & Günter. (2000). Prüfung des Risikomanagements. In D. Dörner, P. Horváth, & H. Kagermann (Hrsg.), *Praxis des Risikomanagements. Grundlagen, Kategorien, branchenspezifische und strukturelle Aspekte* (S. 193-222). Stuttgart: Schäffer-Poeschel.

- Esser, H. (2000). *Soziologie - Spezielle Grundlagen. Band 2: Die Konstruktion der Gesellschaft*. Frankfurt/Main: Campus Verlag.
- Favre-Bulle, B. (2004). *Automatisierung komplexer Industrieprozesse - Systeme, Verfahren und Informationsmanagement*. Wien: Springer-Verlag.
- flw. (2012). *Agentifizierung der Intralogistik*. Schlussbericht, Technische Universität Dortmund, Lehrstuhl für Förder- und Lagerwesen, Dortmund.
- Freiwald, S. (2005). *Supply Chain Design - Robuste Planung mit differenzierter Auswahl der Zulieferer* (Bd. 72). (M. Abramovici, W. Busse von Colbe, W. H. Engelhardt, R. Gabriel, G. Laßmann, W. Maßberg, et al., Hrsg.) Frankfurt am Main: Peter Lang.
- Gall, N. L. (09 2003). *Ironick - Contingency, Irony, and Solidarity*. Abgerufen am 18. 07 2013 von http://ironick.typepad.com/ironick/2005/05/my_history_of_t.html
- Geinitz, J. (1998). Unerkannte Abhängigkeiten mindern die Leistungsfähigkeit automatisierter Lager. *Marktbild Lager*, 18, S. 16-18.
- Göhner, P., Zimmer, E., Arnaout, T., & Wunderlich, H.-J. (2004). Reliability Considerations for Mechatronic Systems on the Basis of a State Model. In U. Brinkschulte, J. Becker, F. Dietmar, K.-E. Großpietsch, C. Hochberger, E. Maehle, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the Dependability and Fault Tolerance Workshop; 17th International Conference on Architecture of Computing Systems (ARC'04), March 26* (S. 106-112). Augsburg: Gesellschaft für Informatik.
- Gottschalk, E. (1996). 3.4 - Merkmalsystem zur Beschreibung und Bewertung logistischer Prozesse. In H.-P. Wiendahl (Hrsg.), *Erfolgsfaktor Logistikqualität - Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung* (S. 40-52). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Haußner, C., Elger, J., & Trautmann, A. (2010). Zusammenfassung und Fazit: Das Internet der Dinge als neues Vorgehensmodell. In W. Günthner, & M. ten Hompel (Hrsg.), *Internet der Dinge in der Intralogistik* (S. 249-255). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- IEEE. (2013). *IEEE Standards Association*. Abgerufen am 18. 07 2013 von <http://standards.ieee.org/>
- IEEE Std 610.12. (1990). *IEEE Standard Computer Dictionary. A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries 610*. New York.
- Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (01. 03 1998). A Roadmap of Agent Research and Development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, I(1)*, S. 7-38.
- (2008). Prozessorientierte Sichtweise in Produktion und Logistik. In A. Kuhn, D. Arnold, H. Isermann, A. Kuhn, H. Tempelmeier, & K. Furmans (Hrsg.), *Handbuch Logistik* (3. Ausg., S. 242-253). Berlin Heidelberg: Springer.
- Libert, S. (2011). *Betrag zur agentenbasierten Gestaltung von Materialflusssteuerungen*. (M. ten Hompel, Hrsg.) Dortmund: Praxiswissen.
- Libert, S., Chisu, R., & Keutner, K. (2010). Eine Ontologie für das Internet der Dinge. In W. Günthner, & M. ten Hompel (Hrsg.), *Internet der Dinge in der Intralogistik* (S. 79-94). Heidelberg Dordrecht u.a.: Springer.
- Linß, G. (2005). *Qualitätsmanagement für Ingenieure* (2. Ausg.). München, Wien: Carl Hanser.
- Maier, M. (2012). *Praxisgerechte AbnahmeprozEDUREN für intralogistische Systeme unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitstheorie - Fortschr.-Ber. VDI-Reihe 13 Nr. 56*. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Maluf, D. A., Gawdiak, Y. O., & Bell, D. G. (2005). On Space Exploration And Human Error - A paper on reliability and safety. *38th Hawaii International Conference on system Sciences (HICSS-38 2005), CD-ROM/Abstracts Proceedings, 3-6 January 2005*. Big Island, HI, USA: IEEE Computer Society.
- Nopper, J. R. (2010). Der Lebenszyklus eines Internet der Dinge Materialflusssystem: Betrieb. In W. Günthner, & M. ten Hompel (Hrsg.), *Internet der Dinge in der Intralogistik* (S. 223-229). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Nopper, J. R. (2011). *Eine Methodik zur Bewertung von Wandelbarkeit in der Intralogistik am Beispiel selbstorganisierter Materialflusssysteme*. (M. ten Hompel, Hrsg.) Dortmund: Praxiswissen.
- Pfohl, H.-C. (2010). *Logistiksysteme - Betriebswirtschaftliche Grundlagen* (8. Ausg.). Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer.

- Sanchez-Pena, R. S., & Sznaier, M. (1998). *Robust Systems - Theory and Applications*. New York u.a.: John Wiley & Sons, Inc.
- Scholz-Reiter, B., & Höhns, H. (2006). Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In G. Schuh, *Produktionsplanung und -steuerung - Grundlagen, Gestaltung und Konzepte* (S. 745-780). Berlin: Springer-Verlag.
- ten Hompel, M. (2008). Intralogistik - Auf dem Weg vom Prozess zum Service. In H. Baumgarten (Hrsg.), *Das Beste der Logistik. Innovationen, Strategien, Umsetzungen* (S. 101-110). Berlin Heidelberg: Springer.
- ten Hompel, M., & Schmidt, T. (2008). *Warehouse Management. Organisation und Steuerung von Lager- und Kommissioniersystemen* (3. Ausg.). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- VDA . (2007). *Produktherstellung und -lieferung - Robuster Produktionsprozess - Voraussetzungen, Standards, Controlling, Beispiele*. Oberursel: VDA Verband der Automobilindustrie.
- VDI 3581. (2004). Verfügbarkeit von Transport- und Lageranlagen sowie deren Teilsysteme und Elemente. *VDI-Richtlinie* . Berlin: Beuth.
- VDI 4001-2. (2006). Terminologie der Zuverlässigkeit. *VDI-Richtlinie 4001 - Blatt 2*. Berlin: Beuth.
- VDI 4486. (2012). Zuverlässigkeit in der Intralogistik - Leistungsverfügbarkeit. *VDI-Richtlinie* . Düsseldorf: Beuth.
- VDI/VDE 3681. (2005). Einordnung und Bewertung von Beschreibungsmitteln aus der Automatisierungstechnik. *VDI/VDE-Richtlinie*. Berlin: Beuth.
- Wiendahl, H.-P. (2002). Wandlungsfähigkeit - Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werstatttechnik online, 92 Heft 4*, S. 122-127.
- Wildner, C. (2010). Anlaufstrategien für Hochregallager bei Wiederinbetriebnahme eines ausgefallenen Regalbediengeräts. In L. U.-u. ITA (Hrsg.), *6. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)* (S. 163-174). Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum.
- Wildner, C. (2011). Diskussion optionaler Maßnahmen zur Maximierung des effektiven Durchsatzes von automatischen Zeilenregallern nach dem Ausfall einer Gasse. *7. Fachkolloquium der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Technische Logistik (WGTL)* (S. 183-193). Dortmund: Praxiswissen Service.
- Wilke, M. (2005). *Wandelbare automatisierte Materialflusssysteme für dynamische Produktionsstrukturen*. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät für Maschinenwesen.
- Windt, K., Hütt, M.-T., & Meyer, M. (2012). A Modeling Approach to Analyze Redundancy in Manufacturing Systems. In H. A. ElMaraghy (Hrsg.), *Proceedings of the 4th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual production (CARV2011), Montreal, Canada, 2-5 October 2011* (S. 493-498). Berlin u.a.: Springer.
- Die Erstellung dieses Beitrags wurde ausschließlich durch Mittel des Freistaats Thüringen ermöglicht (Haushaltsstelle, befristet).

Dipl.-Ing. Christian Wildner, M.A.,
Member of Research Staff at the Department Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Ilmenau University of Technology.

Address:
Department Industrial Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Ilmenau University of Technology, PO Box 10 05 65, 98684 Ilmenau, Germany,
Phone: +49 3677 69 3846, Fax: +49 3677 69-3840,
E-Mail: Christian.Wildner@TU-Ilmenau.de