

Industrie 4.0 in der Entsorgungslogistik am Beispiel eines Müllheizkraftwerkes – Modellierung und exemplarische Simulation mit Petri-Netzen

Fourth Industrial Revolution in the Recycling and Waste-disposal Industry Using an Example of a Waste-to-energy Plant – Modelling and Exemplary Simulation with Petri Nets

Hubertus Franke, Torsten Czenskowsky, Thomas Felsch,
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Salzgitter (Germany),
hu.franke@ostfalia.de, t.czenskowsky@ostfalia.de, th.felsch@ostfalia.de

Abstract: Legislation requires a sustainable lifecycle management, which offers companies the opportunity to establish themselves on the market. These companies find themselves in competition with each other and using the newest technological developments for securing the future market position. Therefore, the consequences of the fourth industrial revolution effect the recycling and waste disposal industry. In this article it is roughly shown, which fields of application in the range of “Industry 4.0” regarding to the recycling industry are possible. Furthermore, this article set out how a selected range within a closed waste-to-energy plant can be modelled and simulated with petri nets. The aim of the present document is to describe the foundations of the disposal logistics system, to exploring the possibilities of the fourth industrial revolution in this functional logistic sector and to model and simulate selected fields with petri nets.

1 Einleitung

Jeden Tag fallen in Deutschland verschiedenste Abfälle an: Hausmüll, Kunststoffreste, Papier, Gewerbeabfälle u. a. m. Für jede dieser Abfallarten ist eine eigene Entsorgungslösung zu finden (vgl. hierzu Dutz 1997, S. 235 ff.; Fortmann und Kallweit 2000, S. 125 ff.; Göpfert 2008, S. 154 ff.; Huber und Laverentz 2012, S. 133 ff.). Ihre Kosten sollen branchenabhängig bei 1 bis 3 % vom Umsatz und zwischen 5 und 15 % der Gesamtlogistikkosten liegen (vgl. Göpfert 2008, S. 162). Geschlossene Stoffkreisläufe als Gegenstand der sogenannten Rückführ- bzw. Entsorgungslogistik bilden die Basis einer an grünen bzw. nachhaltigen Aspekten orientierten Logistik. (vgl. Hausladen 2011, S. 1; Piontek 2016, S. 282) Die Entsorgungslogistik als jüngster Ableger der funktionalen Logistikauffassung hat sich so erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt. Ihr wird die Aufgabe der Gestaltung von

Rückstandsströmen zugewiesen. Im Mittelpunkt stehen alle logistischen Maßnahmen zur Vorbereitung und Realisierung der Entsorgung. Daher beinhaltet die Entsorgungslogistik alle planenden, steuernden und ausführenden Tätigkeiten, die sich auf die Verwendung, Verwertung und Beseitigung der jeweiligen Entsorgungsobjekte beziehen (vgl. Dutz 1997, S. 236; Hausladen 2011, S. 73; Huber und Laverentz 2012, S. 133).

Der Begriff „Industrie 4.0“ wird primär für Produktions- und begleitende Logistikprozesse angewendet, ist aber auch auf die Entsorgungslogistik übertragbar. Die Industrie 4.0 beschäftigt sich unter anderem mit Robotersystemen, die mittels einer vernetzten Kommunikation „semi-intelligent“ Entscheidungen treffen und Prozesse koordinieren können. Diese können in der Entsorgungslogistik bereits vielfältig eingesetzt werden. Es ist daher hilfreich, eine Modellierungsmethode zu verwenden, die sowohl die Interaktion der Roboter beschreibt, als auch die Basis für mögliche Simulation liefert. Petri-Netze bieten einen Ansatz, der diesen Anforderungen entspricht. In der vorliegenden Publikation soll daher über eine Petri-Netz-Simulationsumgebung gezeigt werden, wie Müll-Sortier-Roboter dezentral, (semi-)intelligent miteinander Sortierprozesse „verhandeln“.

1.1 Konkrete Zielsetzung

Zielsetzung des vorliegenden Beitrages ist es daher, die Entsorgungslogistik zu schildern, die Möglichkeiten von Industrie 4.0 in diesem funktionalen Logistikbereich auszuloten und die Chancen zur Modellierung von Entsorgungsprozessen aufzuzeigen. In einem geschlossenen Stoffkreislauf soll daher exemplarisch eine mögliche (semi-)intelligente Interaktion von Müll-Sortierrobotern genauer untersucht werden. Hier bietet sich die Möglichkeit, eine kooperierende und kommunizierende Roboterkommunikation zu beschreiben und zu simulieren, wo Roboter Müllobjekte nach Priorität auswählen und ein „Greifen“ über eine automatisierte Kommunikation „verhandeln“.

1.2 Methodisches Vorgehen

Zur Erreichung des Ziels wird nach der Einleitung im ersten Abschnitt im zweiten Teil die Entsorgungslogistik erörtert. Die Möglichkeiten von Industrie 4.0 in der Entsorgung werden anschließend aufgezeigt. Im darauf folgenden Abschnitt wird die Modellierung und Simulation von Entsorgungsprozessen exemplarisch dargestellt. Als Modellierungsgrundlagen sollen spezielle Petri-Netze gewählt werden. Es kann somit die (semi-)intelligente Kommunikation in einem Industrie 4.0-Szenario verdeutlicht werden. Als Entwicklungsumgebung wird ©renew (vgl. Kummer et al. 2004) gewählt. Diese Entwicklungsumgebung bietet die Möglichkeit, das modellierte Robotersystem zusätzlich zu simulieren. Eine Ergebniszusammenfassung, ein Fazit und ein Ausblick runden den Beitrag schlussendlich ab.

2 Grundlagen der Industrie 4.0 in der Entsorgungslogistik

Auf die Entwicklung der Entsorgungslogistik wirken verschiedene Einflussfaktoren. Dazu gehören innerbetriebliche Rahmenbedingungen, bei denen z. B. die Verknappung von Deponiekapazitäten zu steigenden Entsorgungskosten führt.

Ebenso verändern sich Kundenanforderungen, indem zunehmend umweltverträgliche Produkte verlangt werden. Insbesondere aber haben verschiedene gesetzliche Regelungen, wie z. B. das Kreislaufwirtschafts- und Abfall-, das Produkthaftungs- oder das Umwelthaftungsgesetz, dazu geführt, dass der Materialeinsatz in der Güterherstellung verringert und für die eingesetzten Stoffe eine Mehrfachnutzung angestrebt wird (vgl. Knoch 1997, S. 239).

„Industrie 4.0“ stellt die vierte industrielle Revolution dar und bedeutet die Kommunikation und Vernetzung zwischen Personen, Maschinen und Gegenständen auf der Basis des „Internet der Dinge“ als virtuelle Repräsentation dieser Objekte. In der Entsorgungslogistik kann diese Vernetzung über verschiedene IT-Systeme realisiert werden. So können die Fahrzeuge miteinander oder mit dem Werk „kommunizieren“ und ressourcenschonend gesteuert, die Übertragung von Dokumenten zwischen den Werken oder mit Behörden digitalisiert oder die Anlagen und Sortierroboter über Algorithmen gesteuert werden. Für weiterführende Informationen aus dem Bereich Industrie 4.0 wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. Bauernhansl und ten Hompel 2014; Manzei et al. 2016; Roth 2016).

2.1 Prozesse in geschlossenen Entsorgungskreisläufen eines Müllheizkraftwerkes

Für geschlossene Stoffkreisläufe bieten spezialisierte Dienstleister Services für Transport-, Lagerungs- und Umschlagprozesse an. Bezüglich der „Verwendung“ und „Verwertung“ ist für sogenannte „Wertstoffe“, die vorwiegend in geschlossenen Stoffkreisläufen anfallen, eine verbesserte Vorsortierung und damit eine erhöhte Recyclingquote anzustreben. Die Objekte dieser primär gewerblichen Rückstände (z. B. Elektroschrott, Kunststoff, Holz) können durch ein Mess-Wiege-System mit Scannern, Kameras und Waagen erfasst, analysiert und dadurch effizienter sortiert werden. In Abhängigkeit von den zu sortierenden Materialien ist ggf. eine Sortierung durch Roboter möglich, die miteinander kommunizieren können.

Unterstützt durch künstliche Intelligenz (KI) können sich die Roboter durch maschinelles Lernen schnell an neue Sortier- und Greifaufgaben anpassen. In offenen Kreisläufen kann Industrie 4.0 bereits an der Quelle eingesetzt werden: Durch Füllsensoren in Mülltonnen sowie durch internetbasierte Abholaufträge z. B. für Sperrmüll sind Entsorgungsbetriebe in der Lage, starre Abfuhrhythmen durch eine bedarfsorientierte Abholung zu ersetzen. Weitere Anwendungsmöglichkeiten aus dem Bereich der Industrie 4.0 sollen hier aufgrund des Umfangs dieser Arbeit nur kurz dargestellt werden:

1. Informationsfluss intern und extern: Digitalisierung der Prozesse und Hinterlegung in der Cloud
2. Schnittstellen zu den Geschäftspartnern: Vernetzung mit den Partnern
3. Transport/Verkehr: Flottenmanagement, Onboard-Navigationssysteme, Elektro-Lkw
4. Vorsortierung: Mess-Wiege-System, Greifsystem (KI)
5. Management von Maschinenausfällen: Früherkennung, Wartung
6. Datenerfassung: Sensorsysteme, Videoüberwachung
7. Bedarfsorientierte Müllabfuhr: Füllsensoren, internetbasierte Abholaufträge

Für einen geschlossenen Kreislauf von Wertstoffen zeigt Abbildung 1 exemplarisch den Prozess mit Nutzung eines Wertstoffhofes. Neben der „Digitalisierung“ (1), der „Vernetzung“ (2) und verschiedenen Maßnahmen im Bereich „Transport/Verkehr“ (3) ist in der Sortierung der Einsatz von „Mess-Wiege-Systemen“ und „Greifsystemen auf KI-Basis“ (4) denkbar. *Dieser Punkt dient als Kernbetrachtung in dieser Publikation.* Im Bereich „Verwendung/Verwertung“ sind die Verfahren „Früherkennung/Wartung“ (5) und „Sensorsysteme/Videüberwachung“ (6) einsetzbar.

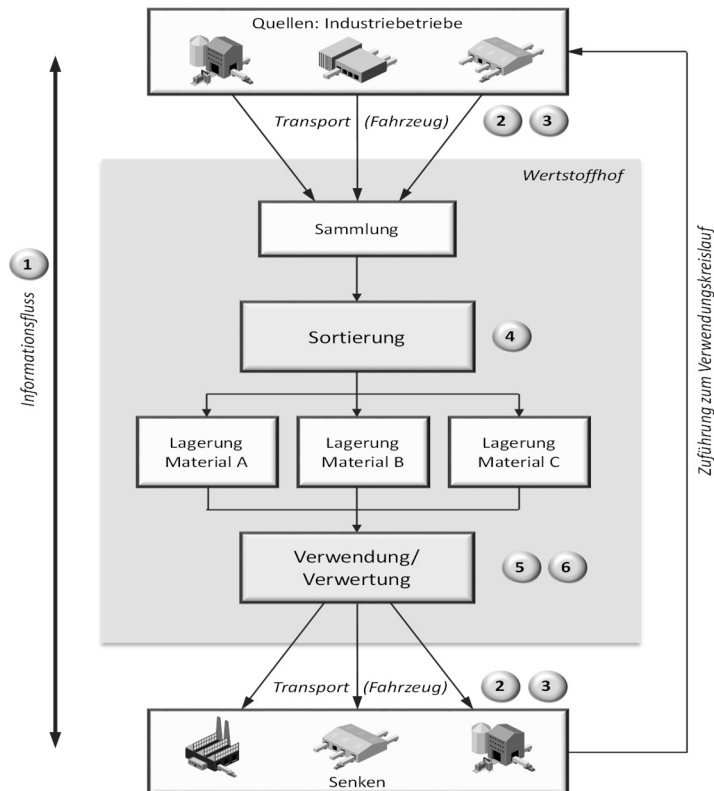


Abbildung 1: Geschlossener Stoffkreislauf (Wertstoffe)

2.2 Petri-Netze zur Modellierung und Simulation

Petri-Netze bedienen eine Modellierungstechnik, die sich seit Jahrzehnten für die Veranschaulichung von Systemen, insbesondere Logistiksystemen, etabliert hat. Durch Petri-Netze können Konstruktionen von Systemen, die informationstechnische Komponenten erhalten, modelliert werden (vgl. Baumgarten 1996). Sie sind sehr gut geeignet, um Strukturen und Prozesse in der Entsorgungslogistik zu beschreiben. Strukturell bestehen Petri-Netze aus zwei Sorten von Elementen. Zum einen aus Stellen, die grafisch durch einen Kreis oder eine Ellipse dargestellt werden, zum anderen aus Transitionen, die als Quadrat oder Rechteck dargestellt werden (vgl. Reisig 2010, S. 22). Diese Elemente werden durch gerichtete Kanten verbunden,

welche grafisch durch einen Pfeil dargestellt werden. „Eine Kante modelliert niemals eine Systemkomponente, sondern immer eine abstrakte, manchmal nur gedankliche Beziehung zwischen Komponenten; beispielsweise logischer Zusammenhang“ (vgl. Reisig 2010, S. 1-22). Stellen können mit beliebig vielen Marken belegt sein, diese Markierung stellt den Zustand eines Systems dar. Die Dynamik eines Petri-Netzes entsteht durch das Schalten von Transitionen: Beim Schalten entnimmt die Transition die Markierungen aus einer Stelle und gibt sie an die nächste Stelle weiter. In der Regel können Transitionen nur dann schalten, wenn alle auf die Transition gerichteten Stellen mit mindestens einer Marke belegt sind. Für tiefere Informationen wird auf die grundlegende Literatur verwiesen, wie z. B. (Baumgarten 1996).

2.2.1 Petri-Netze zur Modellierung in der Entsorgungslogistik

Die Entsorgungslogistik, auch Re-Logistics genannt, ist ein wichtiger Teilbereich der klassischen Logistik, wo lediglich der Materialfluss in der Regel in eine umgekehrte Richtung verläuft. Da die logistischen Abläufe ähnlich wie in anderen Logistikbereichen verlaufen, würde eine Modellierung auch ähnlich verlaufen. Dort ist die Modellierung mit Petri-Netzen sehr häufig vertreten, während sie in der Entsorgungslogistik noch nicht zum Einsatz kam. Gemäß den grundlegenden Ausführungen in Kapitel 2.3 eignen sie sich dennoch gerade für das zuvor beschriebene Szenario einer Müll-Roboter-Interaktion, um Entsorgungsprozesse, gemäß Abbildung 1 zu beschreiben. Der Nachteil ist allerdings, dass ab einem gewissen Detaillierungsgrad Petri-Netze sehr überladen und für Menschen schwer überschaubar werden. Aufgrund dieser Komplexität und um den Rahmen dieser Veröffentlichung nicht zu sprengen, ist auf eine vollständige Beschreibung der Abläufe aus Abbildung 1 durch Petri-Netze verzichtet worden. Es soll hierbei lediglich in Kapitel 3 ein Teilbereich aus Abbildung 1, nämlich die Sortierung durch einen Sortierroboter, gemäß Kapitel 2.1 Punkt (4) beschrieben werden.

2.2.2 Die Petri-Netz-Simulationsumgebung

Die Entwicklungsumgebung ©renew (vgl. Kummer et al. 2004) ist ein grafischer Editor für verschiedene Arten von Petri-Netzen, insbesondere Prädikat-Transitions-Netze (PrT-Netze). PrT-Netze mit individuellen Marken sind Erweiterungen von einfachen Petri-Netzen. Sie werden auch als "coloured petri nets" bezeichnet. Hier werden den Marken Werte zugeordnet, wodurch man sie unterscheiden und mit ihnen rechnen kann.

Mit Hilfe der Entwicklungsumgebung ©renew können beliebige Petri-Netze gesamt, aber auch in Einzelschritten visualisiert und simuliert werden. In Abbildung 2 ist beispielhaft aufgeführt, wie eine Transition mit der Bezeichnung „ $f(x,y)$ “ eine nachfolgende Stelle mit einem Wert „ $x+y$ “ bedient, der aus den eingehenden Stellen die Variable „ x “ mit den Werten „7“ oder „3“ und „ y “ mit dem Wert „4“ versieht. Als Ergebnis kann also „11“ oder „7“ entstehen. Es findet nur ein Schaltvorgang statt. Das Ergebnis ist hier nichtdeterministisch. Für weiterführende Informationen wird auf die einschlägige Literatur verwiesen (vgl. Kummer et al. 2004).

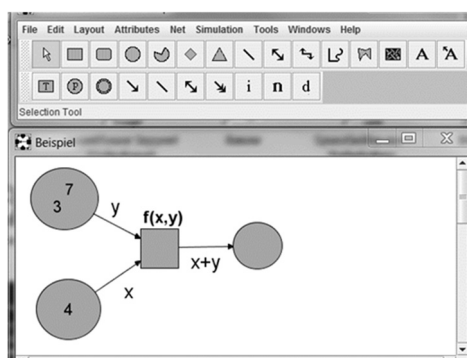


Abbildung 2: Die Petri-Netz-Simulationsumgebung

Die Entwicklungsumgebung ©renew bietet alle relevanten „Features“, um verschiedene Teilbereiche eines geschlossenen Entsorgungskreislaufes eines Müllheizkraftwerkes zu beschreiben. So können nicht nur verschiedene Petri-Netze, wie Stellen-Transitions-Netze, Bedingungs-Entscheidungs-Netze, Prädikat-Transitions-Netze, zeitbehaftete- und verschiedene Serielle-Netze modelliert und visualisiert, sondern auch in verschiedenen Modi simuliert werden. Hierbei können in einem Einzelschrittmodus oder in einer Gesamtsimulation die generierten Ergebnisse analysiert werden. Dies soll im Folgenden näher erläutert werden.

3 Simulation einer Roboterkommunikation in einem geschlossenen Stoffkreis

Gemäß Punkt (4) der Abbildung 1 soll nun exemplarisch gezeigt werden, wie durch den Einsatz von „Mess-Wiege-Systemen“ und „Greifsystemen auf KI-Basis“ in der Sortierung eine Roboterkommunikation innerhalb der Müllverbrennungsanlage erfolgen kann. In Abbildung 3 ist mit Hilfe der Petri-Netz-Simulationsumgebung ©renew der Ablauf einer Roboterkommunikation beschrieben und toolbasiert simuliert.

Als Eingabeparameter für die drei kommunizierenden Sortierroboter dienen zufällig generierte Zahlen, die als Sensor-Kennzahlen für Müllobjekte dienen. Die Höhe der Zahl soll die jeweilige Priorität für ein Aussortieren darstellen. Auf eine Darstellung der zeitlichen Reihenfolge wird im Hinblick auf die Kernelemente der Modellierung verzichtet.

Im oberen Teil der Grafik wird beschrieben, wie drei Sortierroboter auf ein gemeinsames Förderband zugreifen. Die Roboterkommunikation erfolgt über die dicken Pfeile. Die dicken Pfeile dienen in diesem Beispiel nur der Visualisierung zum besseren Verständnis und sind für die Petri-Netz-Steuerung irrelevant. Der eigentliche Kommunikationsprozess erfolgt über die dünneren Pfeile. Der reale Roboter-Greif-Ablauf wird durch ein BE-Petri-Netz (Bedingungs-Entscheidungs-Netz) im oberen Teil der Modellierung beschrieben. Ein BE-Netz enthält nur eine Steuerungsmarke vergleichbar mit einer booleschen Variablen oder eines Flags. Ein PrT-Netz enthält zudem Variablen, die für einen Steuerungsprozess relevant sind. Dies ist der Fall im unteren Teil der Grafik, wo die eigentliche Roboterkommunikation und -interaktion beschrieben wird. Sobald einer der Sortierroboter eine Steuerungsmarke in den

doppelt umrundeten Stellen erhält, bekommt er die Möglichkeit, auf das Förderband zuzugreifen, um seinen Sortiervorgang durchzuführen. Eine doppelt umrandete Stelle ist hierbei eine virtuelle Stelle, die an anderer Stelle real erscheint. So sind die virtuellen Stellen der jeweiligen Sortierroboter nichts anderes als eine redundante Kopie an der jeweiligen anderen Position des Sortierroboters. Im unteren Teil der Grafik sind die kommunizierenden Prozesse der Akteure „Sortierroboter 1“, „Sortierroboter 2“, „Sortierroboter 3“ und „Förderband“ in Form eines PrT-Petri-Netztes beschrieben. Über eine Zufallsfunktion werden den einzelnen Robotern simulierte Sensordaten von Müllobjekten zugeführt.

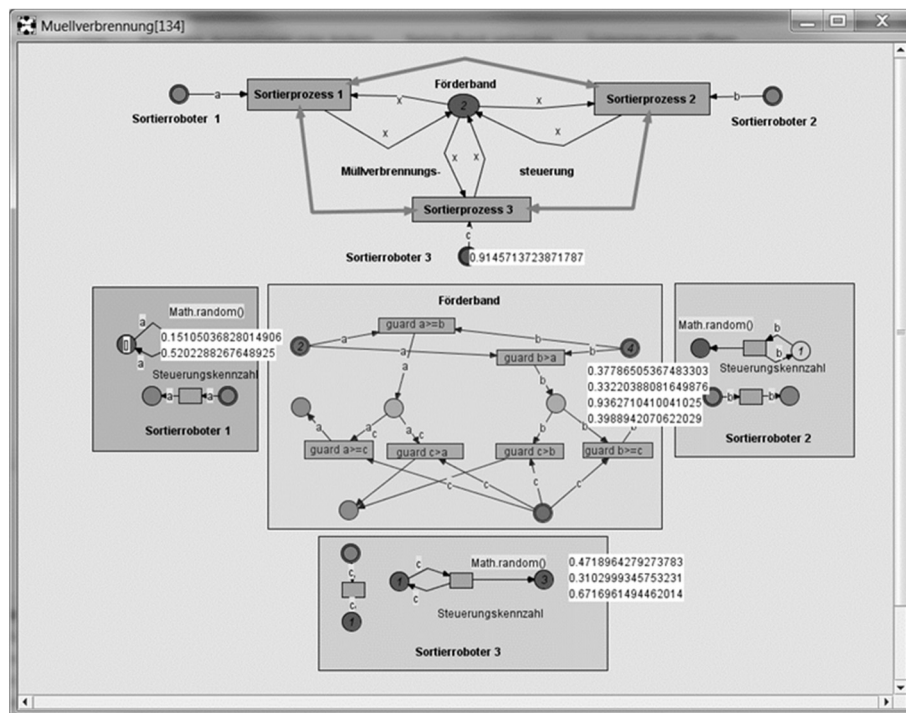


Abbildung 3: Screenshot eines Simulationslaufes bei der Roboterkommunikation

In Realität würde eine Kamera mit Bilderkennung an dem Sortierroboter die Müllobjekte identifizieren und priorisieren. Über eine gemeinsame Kommunikation über das Förderband wird dezentral entschieden, welcher Roboter den Sortierprozess durchführt. Im Gegensatz zu der bisher eingesetzten klassischen Verriegelungssteuerung können hierbei vielmehr Restriktionen berücksichtigt und implementiert werden. Auf diese Art und Weise wird neben der eigentlichen Sortier-Aufgabenerfüllung auch sichergestellt, dass sich die Roboterarme gegenseitig nicht in die Quere kommen. Die generierte Zufallszahl stellt eine kombinierte Kennzahl dar, die das Müllobjekt eindeutig katalogisiert. Diese hier zufällig erzeugten Kennzahlen sollen in Realität über Sensordaten, im Sinne einer Industrie 4.0-Steuerung, generiert werden, auf die der jeweilige Roboter zugreifen kann. In der hier aufgeführten Simulationsumgebung stellen die generierten Kennzahlen eine Art Priorisierung der Müllobjekte

dar. Vereinfacht wird hierbei davon ausgegangen, dass eine Kennzahl mit einer höheren Priorität den entsprechenden Roboter für einen ausgewählten Sortierprozess auswählt.

Abbildung 3 zeigt einen Screenshot einer zufällig gewählten Sortiersimulation einer Roboterkommunikation. Sortierroboter 1 verfügt über die Kennzahlen von zwei Müllobjekten, Roboter 2 verfügt über die Kennzahlen von 4 Müllobjekten und Roboter 3 verfügt über die Kennzahlen von 3 Müllobjekten. Nebenläufig hat Sortierroboter 3 die Sortierung eines Müllobjektes mit der Kennzahl 0.91457 zugeschrieben bekommen, denn 0.91457 ist die bisher größte Zahl (Priorität) im betrachteten Szenario in Abbildung 3. 0.91457 wird erstmalig von Sortierroboter 3 gesichtet.

4 Ergebnisse und Zusammenfassung

Im betrachteten Szenario ist exemplarisch gezeigt worden, dass Petri-Netze, insbesondere PrT-Netze, komplexe Sachverhalte einer Müll-Sortierroboter-Interaktion darstellen können. Hierbei macht es allerdings wenig Sinn, alle Details darzustellen, denn dies würde das jeweilige Petri-Netz derart überladen, dass eine entsprechende Visualisierung für das menschliche Auge zu unübersichtlich wird. Im Rahmen einer besseren Verständlichkeit und einer klareren Überschaubarkeit ist ebenfalls auf die Angabe von Zeiten in den Petri-Netzen verzichtet worden. Es ist daher im Laufe dieser Publikation vielmehr nur ein relevanter Teilbereich rausgegriffen worden, der im Rahmen einer Industrie 4.0 das (semi-)intelligente Zusammenspiel von Sortierrobotern mit Hilfe fiktiver Prioritätendaten in einem geschlossenen Müllheizkraftwerk beschreibt. Durch die Petri-Netz-Beschreibung konnte nicht nur der Ablauf visualisiert, es konnte dieser auch in einem „Debug-Mode“ simuliert werden, sodass verschiedene Szenarien tiefer beleuchtet werden konnten. Es hat sich also herausgestellt, dass eine klassische Verhandlung, wie sie bereits aus Multiagentensystemen bekannt ist (vgl. Franke 2014), über Petri-Netze simuliert werden kann. Weiterhin ist dargestellt worden, wie Argumente einer derartigen Verhandlung aussehen könnten. Dies ist durch die Vergabe von Prioritätenmarken simuliert worden, wobei jeweils zwei Sortierroboter, von insgesamt drei Robotern, wechselseitig ein Verhandlungsergebnis erzielen konnten, wenn einer der Roboter eine höhere Prioritätenmarke besitzt. Im Sinne einer Müllsortierung könnte dies z. B. der Fall sein, wenn bestimmte Müllobjekte, die über Sensoren erkannt worden sind, mit höherer Priorität ausgesucht werden sollten. Dies ist dann sinnvoll, wenn es sich z. B. um Sondermüll oder schwer verbrennbare Objekte handelt. Der Nutzen dieses Ansatzes liegt somit eindeutig darin, dass verschiedene komplexe Verhandlungsszenarien modelliert und anschließend sofort simuliert werden können. Aufgrund der Komplexität der Eingabeparameter ist nämlich ein klares Verhalten der Sortierroboter nicht eindeutig voraussagbar. Die Simulation bietet hier, auch aufgrund ihrer Visualisierungskomponenten, deutliche Vorteile. Gerade nichtdeterministisches Verhalten könnte über Simulationsprozesse besser untersucht werden. Ein nichtdeterministisches Verhalten liegt immer dann vor, wenn z. B. ein Sortierroboter mehrere Handlungsalternativen hat. Auch Fälle, wo Müllobjekte mit gleicher Priorität zu behandeln sind, würden über eine Simulation besser analysiert werden können. Simulierbar sind ebenfalls Fehlerszenarien, bei denen beispielsweise Roboter aufgrund bestimmter Konstellationen nicht einsetzbar

sind und generell ausfallen können. Als Vereinfachung sind hier ebenfalls wieder gezielt Prioritätenmarken eingesetzt worden, die zeitweise ausgewählte Roboter bewusst inaktiv lassen. Dadurch, dass die Roboter (semi-)intelligent interagieren, ist im Rahmen der Simulation auch eine Möglichkeit geschaffen worden, gewisse ungeplante „Überraschungen“ zu simulieren. So ist ebenfalls eine Situation untersucht worden, in der bei bestimmten Robotern nur bestimmte Müllobjekte zuzuordnen sind. Interessant ist zudem, dass andere Roboter durch eine gewisse „Verhandlung“ diese Aufgaben eigenständig übernommen haben. Eine deutliche Verbindung zu Industrie 4.0 ist da zu sehen, wo Teilbereiche eines produzierenden Systems -wie hier in der Müllverbrennung- eigenständig durch (semi-)intelligente Verhandlung Probleme dezentral lösen und in einen Gesamtkontext integrieren.

Damit wird erkennbar, dass Industrie 4.0 viele Ansatzpunkte im Bereich der Entsorgungslogistik hat. Roboterkooperationen gehören eindeutig in dieses Segment. Als Vorstufe und Basis einer Simulation bieten sich Petri-Netze mit den jeweiligen zugehörigen Simulationsumgebungen in sehr geeignetem Maße dazu an.

5 Fazit und Ausblick

Diese Simulationsumgebung bietet die Basis für die Forschung an verschiedenen Algorithmen und Kommunikationsmodellen für Sortierroboter. Es sollte somit exemplarisch verdeutlicht werden, wie ausgewählte Mess-, Wiege- und Greifsysteme in einer Vorsortierung einer Müllverbrennungsanlage zum Einsatz kommen. Der vernetzte KI-basierte Ansatz der Sortier- bzw. Greifroboter soll hierbei in einem übergeordneten Gesamtsystem eines Industrie-4.0-Ansatzes in der Entsorgungslogistik Verwendung finden.

Der hier untersuchte Petri-Netz-Ansatz bietet deutliche Vorteile gegenüber anderen bisherigen Ansätzen:

1. Sowohl der Materialfluss (eigentlicher Müllsortierprozess), als auch die Roboterkommunikation können in einem zusammenhängenden System beschrieben und visualisiert werden.
2. Nebenläufige Aspekte, wie asynchron ablaufende Prozesse, können anschaulich dargestellt werden.
3. Petri-Netze sind in ausgewählten Bereichen bis zu einer bestimmten Komplexität mathematisch validierbar.
4. Petri-Netz-Entwicklungsumgebungen bieten die Möglichkeit einer Simulation der Schaltvorgänge und somit der Abläufe in der Kommunikation und Interaktion der realen Sortierroboter.
5. Insbesondere mehrere gleichwertige Handlungsmöglichkeiten können über Petri-Netze visualisiert und vor allem simuliert werden.

Demgegenüber steht der Nachteil, dass Petri-Netze sehr schnell für den menschlichen Betrachter überladen und wenig überschaubar werden. Dieser Nachteil kompensiert sich aber dadurch, dass Petri-Netz-Strukturen hervorragend von Rechnern analysiert und verarbeitet werden können. Der Einsatz von Multiagentensystemen ist hierbei weiterhin im Auge zu behalten.

Abschließend soll festgehalten werden, dass der hier beschriebene Ansatz das Potenzial für tiefer greifende Untersuchungen bietet. So könnten z. B. in einem vernetzten Ansatz auch eine Kommunikation der Roboter mit anderen Teilbereichen der Müllverbrennung, wie z. B. mit dem eigentlichen Verbrennungsprozess, über Petri-Netze beschrieben und auch simuliert werden.

Literatur

- Bauernhansl, T.; ten Hompel, M.: Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Wiesbaden: Springer Verlag 2014.
- Baumgarten, B.: Petri-Netze. Grundlagen und Anwendungen. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akad.-Verl. 1996.
- Dutz, E.: Entsorgungslogistik. In: Bloech, J.; Ihde, G. (Hrsg.): Vahlens Großes Logistiklexikon. München 1997, S. 235-239.
- Franke, H.: Agent based environments using Petri-Net-Profiles in construction sites. 3rd Annual International Conference on Industrial, Systems and Design Engineering, Athens (Greece), 2014.
- Fortmann, K.; Kallweit, A.: Logistik. Stuttgart: Kohlhammer 2000.
- Göpfert, I.: Entsorgungslogistik. In: Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik. Management logistischer Netzwerke und Flüsse; [A-Z]. 4. aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Gabler 2008, S. 154-163.
- Hausladen, I.: IT-gestützte Logistik. Systeme - Prozesse - Anwendungen. Wiesbaden: Gabler 2011.
- Heesch, S.: Entsorgung von Müll – Erzeugung durch Müll – 40 Jahre Müllheizkraftwerk Bremen, Herausgeber: swb Entsorgung GmbH, Bremen 2009.
- Huber, A.; Laverentz, K.: Logistik. München: Vahlen 2012.
- Kummer, O.; Wienberg, F.; Duvigneau, M.; Schumacher, J.; Köhler, M.; Moldt, D.; Rölke, H.; Valk, R.: An extensible editor and simulation engine for Petri nets: Renew. In: Cortadella, J.; Reisig, W. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets 2004. 25th International Conference, ICATPN. Proceedings, volume 3099 of Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 2004, S. 484-493.
- Knoch, J.: Technik der Entsorgungslogistik. In: Bloech J. (Hrsg.): Vahlens großes Logistiklexikon. München: Beck 1997, S. 239-243.
- Manzei, C.; Schleupner, L.; Heinze, R. (Hrsg.): Industrie 4.0 im internationalen Kontext. Kernkonzepte, Ergebnisse, Trends. Berlin, Offenbach, Wien, Zürich: VDE Verlag GmbH, Beuth 2016.
- Piontek, J.: Bausteine des Logistikmanagements. Supply Chain Management. E-Logistics. Logistikcontrolling. Green Logistics. Logistikinstrumente. 5. Aufl. Herne: NWB Verlag 2016.
- Reisig, W.: Petrinetze. Modellierungstechnik, Analysemethoden, Fallstudien. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien 2010.
- Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Berlin: Springer Gabler 2016.
- Schulte, C.: Logistik. Wege zur Optimierung der Supply Chain. 6. Aufl. München: Vahlen 2013.