

Konzept zur Integration eines kontinuierlichen Materialflussmodells in die Virtuelle Inbetriebnahme durch Signalgenerierung

Concept for the integration of a continuous material flow model in virtual commissioning by generation of signals

Annika Kienzlen, Alexander Verl, Institut für Steuerungstechnik der
Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Universität Stuttgart, Stuttgart
(Germany), annika.kienzlen@isw.uni-stuttgart.de, alexander.verl@isw.uni-
stuttgart.de

Abstract: Simulation models for virtual commissioning of plants are of increasing importance in the digital factory. Considering whole plants, there are many piece goods whose movement has to be modelled. The existing models for the material flow are usually either too unprecise or too complex to be used for virtual commissioning. The complexity is leading to high computation times which exceed the short cycle of the control system. Therefore, a macroscopic flow model was developed in previous work which doesn't depict single goods but a continuous density distribution instead. Hence, it is effective for material flow intensive plants. However, it doesn't provide signals for the sensors of the production system and therefore cannot interact with the control system directly. This paper shows possibilities to compute signals from the density distribution to integrate the macroscopic flow model in virtual commissioning. Beforehand, the macroscopic flow model and signals in control engineering are presented.

1 Motivation

Mit steigender Komplexität von Anlagen und wachsendem Anteil an mechatronischen Komponenten, wird insbesondere das Steuerungssystem einer Anlage aufwendiger. Für die Inbetriebnahme eines Steuerungssystems müssen nicht nur einzelne Maschinen, sondern auch deren Interaktion berücksichtigt werden. Die Maschinen sind über den Materialfluss verbunden. Um ein Steuerungssystem in einer Anlage mit vielen Stückgütern auszulegen und zu testen, muss die genaue Bewegung der Stückgüter bekannt sein, die durch die Interaktion untereinander und mit der Umgebung entsteht. Beispielsweise in Anlagen zur Flaschenbefüllung bewegen sich die einzelnen Flaschen mit hoher Geschwindigkeit (Al-Hawari et al. 2010), trotzdem ist die exakte Be-

wegung der Flaschen entscheidend für den korrekten Prozess, der durch das Zusammenspiel aus Sensoren und Aktoren wiedergespiegelt wird. Hier kann die Virtuelle Inbetriebnahme (VIBN) eingesetzt werden (VDI/VDE 3693), um die Funktionsweise des Steuerungssystems vor der realen Inbetriebnahme und der Produktion zu testen und zu optimieren (Barth et al. 2015). Es existieren verschiedene Materialflussmodelle (vgl. Abb. 1), die je nach Anforderung im Kontext der Produktion eingesetzt werden können (Scheifele et al. 2016; Kienzlen und Verl 2020). Das logische Materialflussmodell stellt die Ablaufreihenfolge dar (Hoher 2017), beim ereignisbasierten Modell wird diese durch zeitliche Schritte ergänzt (Rybicka 2017). Bei beiden Modellen handelt es sich um ein- bis zweidimensionale Modelle, die nicht die exakten Trajektorien der einzelnen Stückgüter abbilden, sondern eine Abfolge der Verteilungen. Das kinematische Materialflussmodell (KMM) bewegt die Stückgüter anhand vordefinierter Trajektorien (Scheifele et al. 2016) und berücksichtigt keine Kollisionen. Das physikbasierte Modell (PMM) berechnet die höchste Detailgenauigkeit inklusive Kollisionen. Aus diesem Grund ist jedoch der größte Rechenaufwand notwendig, der mit der Anzahl der Stückgüter weiter zunimmt (Spitzweg 2009). Je mehr Kollisionen zwischen Stückgütern auftreten, desto aufwendiger wird die Berechnung. Darüber hinaus ist diese nicht deterministisch (Scheifele et al. 2016). Es ist somit nicht möglich, ein Szenario mit sehr vielen Stückgütern im Steuerungstakt zu berechnen. Hier setzt das makroskopische Flussmodell (MFM) an, bei dem der Materialfluss über die räumliche und zeitliche Verteilung der Stückgüter berechnet wird (Hoher et al. 2012). Der Berechnungsaufwand ist abhängig von der Größe des betrachteten Bereichs und der Diskretisierung, jedoch unabhängig von der Stückgüteranzahl. Das Modell stellt folglich eine Alternative bei der Betrachtung der räumlichen Bewegung von großen Mengen an Stückgütern dar. Vorige Arbeiten zeigen gute Ergebnisse beim Vergleich mit Realdaten (Hoher et al. 2012; Göttlich et al. 2014). Allerdings existieren bisher kaum Methoden zur Generierung von diskreten Signalen aus der kontinuierlichen Dichteverteilung des MFMs, ohne die eine Simulation nicht geeignet für die VIBN ist.

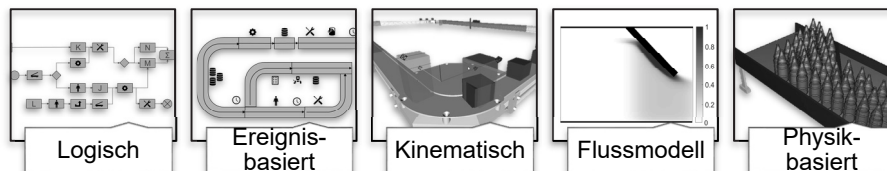


Abbildung 1: Materialflussmodelle nach (Scheifele et al. 2016; Hoher 2017; Kienzlen und Verl 2020)

2 Modellierung mit dem Flussmodell

Die Modellierung des MFM ist in (Göttlich et al. 2014) beschrieben. Es basiert auf den Annahmen, dass nur identische Stückgüter vorhanden sind und dass die Stückgüteranzahl konstant bleibt. Mathematisch wird die Dichte $\rho(x, t)$ mit Zeit t und Ort x über eine partielle Differentialgleichung beschrieben:

$$\partial_t \rho + \nabla \cdot (\rho(v^{dyn}(\rho) + v^{stat}(x))) = 0, \text{ mit } \rho(x, 0) = \rho_0(x), \quad (1)$$

wobei $\mathbf{x} = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2, t \geq 0$.

Die Umgebung wird als ein statisches Geschwindigkeitsfeld \mathbf{v}^{stat} berücksichtigt, beispielsweise mit positiven Geschwindigkeiten durch Bandförderer und negativen durch Hindernisse. Im Bereich der maximalen Dichte ρ_{max} , bei der die Stückgüter kollidieren, wirken Abstoßkräfte als dynamisches Geschwindigkeitsfeld

$$\mathbf{v}^{dyn}(\boldsymbol{\rho}) = H(\rho - \rho_{max}) \cdot I(\boldsymbol{\rho}) \text{ mit } H(\rho - \rho_{max}) = \begin{cases} 0, & \rho < \rho_{max} \\ 1, & \rho \geq \rho_{max} \end{cases}. \quad (2)$$

Die Abstoßkraft $I(\boldsymbol{\rho})$ setzt erst ein, wenn die Heavisidefunktion $H(\rho)$ aktiv wird. Dies wiederum geschieht, wenn die Dichte in einem Bereich nahe der maximalen Dichte kommt abhängig von der stetigen, numerischen Realisierung der Heavisidefunktion. Die Abstoßkraft wird mittels einer Glättung beschrieben, wobei der Faltungskern $\boldsymbol{\eta}$ und der Faktor ϵ (Regulierung der Stärke der Abstoßkraft) verwendet werden:

$$I(\boldsymbol{\rho}) = -\epsilon \frac{\nabla(\boldsymbol{\eta} * \boldsymbol{\rho})}{\sqrt{1 + \|\nabla(\boldsymbol{\eta} * \boldsymbol{\rho})\|_2^2}}, \epsilon > 0. \quad (3)$$

In der Regel wird die Ausgangsdichteverteilung $\rho_0(x)$ aus den Positionen der Stückgüter erstellt wie sie auch für das KMM oder das PMM genutzt werden. Ein Stückgut wird dabei als bivariate Normalverteilung skaliert mit der maximalen Dichte in die Dichteverteilung überführt. Aufgrund der Nichtlinearität und Nichtlokalität in der Gleichung werden numerische Methoden zur Berechnung der Lösung benötigt. Es wird daher $\mathbf{x} = (x_1, x_2)$ in Zellen mit Breite $\Delta x_1, \Delta x_2$ und mit Mittelpunkt $x_{j,k}$ diskretisiert. In der hier verwendeten Notation wird davon ausgegangen, dass für x_1 und x_2 die gleiche Standardabweichung eingesetzt wird. Die Ausgangsdichteverteilung ergibt sich aus der Summe aller Normalverteilungen der Stückgüter mit der jeweiligen Position $x_{i,0}$ zum Zeitpunkt $t = 0$ (Göttlich und Pfirsching 2018):

$$\rho_0(x) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2\rho_{max}\pi\sigma_0^2} e^{-\frac{1}{2\sigma_0^2}(x-x_{i,0})^2}. \quad (4)$$

Die maximale Dichte beschreibt die maximal mögliche Anzahl an Stückgütern pro Flächeneinheit (Göttlich und Pfirsching 2018). Sie ist daher abhängig von der Form der Stückgüter. Das MFM kann bisher nur Stückgüter mit quadratischem (q) oder rundem (z) Querschnitt abbilden. Für einen runden Querschnitt mit Radius r berechnet sich die maximale Dichte nach (Degond et al. 2017)

$$\rho_{max,z} = \frac{1}{2\sqrt{3}r^2}, \quad (5)$$

da bei dichtester Packung von Zylindern ein Stückgut eine hexagonale Fläche mit Seitenlänge r besetzt (vgl. Abb. 2a). Bei quadratischem Querschnitt (Validierung in (Prims et al. 2019)) können die Stückgüter ohne Lücken positioniert werden. Die maximale Dichte ist demzufolge wie in Abbildung 2a skizziert bei der Seitenlänge a

$$\rho_{max,q} = \frac{1}{a^2}. \quad (6)$$

Neben den Positionen der einzelnen Stückgüter (als Erwartungswert in der Normalverteilung) beeinflussen folglich die Standardabweichung der verwendeten Normalverteilung und die Diskretisierung die Ausgangsdichteverteilung. Je größer die Standardabweichung, desto größer ist der Bereich, in dem ein Stückgut berücksichtigt wird. Voraussetzung ist, dass die Standardabweichung so gewählt wird, dass die Auswirkungen der Normalverteilung über ein Stückgut hinausgehen, sonst entsteht keine kontinuierliche Dichteverteilung, sondern punktuelle Spitzen je Stückgut (Göttlich und Pfirsching 2018). Überdies sollte die Standardabweichung größer als die Diskretisierung Δx sein. Konkret bedeutet dies für zylindrische Stückgüter

$$4\sigma_0 > 2r > \Delta x, \quad (7)$$

damit höchstens 95,4 % der Normalverteilung den Bereich des zylindrischen Stückguts umfassen. Bei unterschiedlicher Diskretisierung kann es sinnvoll sein, auch unterschiedliche Standardabweichungen zu wählen. Je feiner die Diskretisierung, desto genauere Werte können in den einzelnen Zellen abgelesen werden (vgl. Abb. 2b).

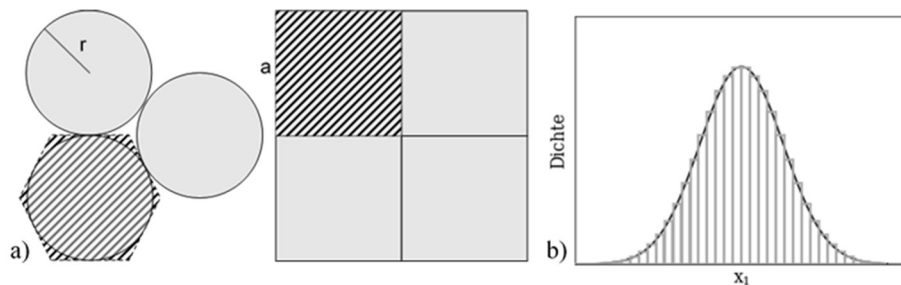


Abbildung 2: a) Skizze zur Bestimmung der maximalen Dichte b) Eindimensionale Normalverteilung eines Stückguts inklusive Diskretisierung (grau)

Die Dichteverteilung im zweidimensionalen entspricht einer Matrix, deren Werte die Wahrscheinlichkeit eines Stückguts in der entsprechenden Zelle beschreiben. Anschaulich lässt die Dichteverteilung sich als Heatmap abbilden (vgl. Abb. 3 rechts).

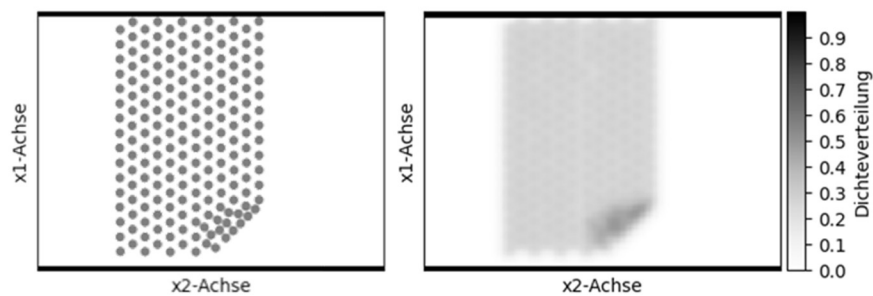


Abbildung 3: Positionen der Stückgüter und Ausgangsdichteverteilung als Heatmap

3 Signalgenerierung aus dem Flussmodell

Eine Steuerung sendet Aktorsignale an eine Maschine oder Anlage, um einen Prozess zu steuern. Die Steuerung erhält wiederum Informationen über den aktuellen Zustand des zu steuernden Prozesses über Sensorsignale, auf welche sie reagieren muss (vgl. Abb. 4). Das Zusammenspiel zwischen Aktor- und Sensorsignalen muss stimmen, damit die Steuerung ihre Funktion erfüllt. Bei der VIBN soll dies anhand einer Simulation getestet werden. Dazu wird in einer Hardware-in-the-Loop Simulation die Maschine oder Anlage durch eine Simulation ersetzt. Die Simulation muss daher Aktorsignale verarbeiten und Sensorsignale zur Verfügung stellen (Strigl 2009). Dabei müssen die Taktzeiten der Steuerung eingehalten werden. In der Materialflusstechnik werden verschiedene Sensoren zur Detektion eingesetzt (Li und Liu 2019), die auch in der Simulation abgebildet werden müssen (Spitzweg 2009).

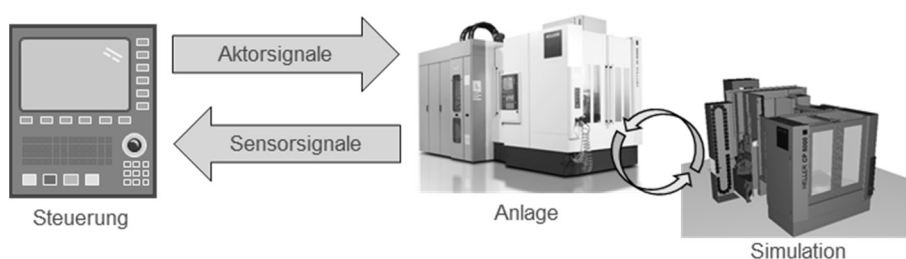


Abbildung 4: Signale zwischen Steuerung und Anlage bzw. Simulation

Aktorsignale für den Materialfluss sind insbesondere Geschwindigkeiten von Bandförderern oder ähnlichem und Geometrieänderungen wie beispielsweise die Winkeländerung eines Hindernisses. Diese Aktorsignale spiegeln sich im MFM im statischen Geschwindigkeitsfeld wieder. Die Änderungen der Geschwindigkeit in der Stärke des Feldes und die Geometrieänderungen in der Richtung des Feldes. Da die Schritte im MFM unabhängig von den vorherigen sind, kann prinzipiell in jedem Zustand die Ausgangssituation verändert und neu gestartet werden. Die Auswirkungen durch dynamische Änderungen wurden bisher jedoch nicht untersucht.

Für das MFM wurden bisher kaum Methoden zur Berechnung von Sensorsignalen beschrieben, daher sollen die Möglichkeiten zur Generierung aus dem MFM hier betrachtet werden. Die Funktionsweise der Sensoren ist dabei unerheblich für die Simulation. Es werden lediglich Informationen über die Positionen der Stückgüter betrachtet, andere Daten wie Temperatur oder Qualität werden im MFM nicht abgebildet. Da nicht einzelne Stückgüter erfasst, sondern kontinuierliche Dichteverteilungen beschrieben werden, können diese nicht analog zu KMM oder PMM berechnet werden. In den folgenden Unterkapiteln wird beschrieben wie verschiedene Sensorinformationen aus dem MFM generiert werden können. Der Fokus liegt dabei auf zylindrischen Stückgütern. Darüber hinaus wird die Darstellung in der Visualisierung für die VIBN adressiert, die ebenfalls aufgrund der kontinuierlichen Dichteverteilung erschwert wird. Die Berechnung der Signale wird anhand eines einfachen Beispiels an einem Bandförderer mit Verengung im folgenden Kapitel veranschaulicht.

3.1 Bereichsinformationen

Am einfachsten ist die Bestimmung von Bereichsinformationen, hier ist das MFM besonders vorteilhaft. Signale mit Bereichsinformationen können beispielsweise Zähl- oder sonstige Waagen, Stauwippen oder Kamerazählssysteme sein. Stauwippen detektieren das Aufstauen von Objekten; als Signal wird der Neigungswinkel der Wippe übergeben. Zählwaagen berechnen aus dem Gewicht direkt die Stückgutanzahl. Diese Signale lassen sich im MFM direkt aus der Dichtebeschreibung des Materialflusses ableiten.

Der reine *zeitliche Verlauf* hinter einer bestimmten Stelle wurde bereits in (Göttlich et al. 2014) als Qualitätskriterium berechnet. Dafür werden die Ausgangsdichteverteilung ρ_0 und die Anzahl der Stückgüter N als Ausgangspunkt verwendet und darauf basierend die Anteile hinter einem Hindernis im Bereich $\Omega_b \subseteq \mathbb{R}^2$ berechnet. Die Dichteverteilung, die sich in dem Bereich Ω_b befindet, wird aufsummiert und ins Verhältnis zu der Summe über die gesamte Dichteverteilung gesetzt:

$$N_{\Omega_b}(t) = \frac{\sum_{x_{k,l} \in \Omega_b} \rho(x_{k,l}, t)}{\sum_{x_{k,l} \in \mathbb{R}^2} \rho_0(x_{k,l})} \cdot N. \quad (8)$$

Mit dem Wissen über die Gesamtanzahl an Stückgütern kann daraus die Anzahl der Stückgüter berechnet werden, was dem Ergebnis der Zählwaage oder eines Kamerazählsystems entspricht. Ergänzt durch die Einzelmasse kann die Gesamtmasse bestimmt werden und daraus der Neigungswinkel der Stauwippe. Dies kann auf andere Bereiche übertragen und erweitert werden.

Eine Sonderform der Signale in einem Bereich ist die *Kollisionserkennung*. Hierfür gibt es in der Regel in der Realität keinen Sensor, in der Simulation kann die Information aber hilfreich sein. Gemeint ist damit eine Detektion, ob Stückgüter in einem bestimmten Bereich aufeinanderstoßen. Im MFM entspricht dies einem Bereich, in dem die Heaviside-Funktion die dynamische Geschwindigkeit aktiv schaltet. Der Bereich sollte dabei größer als die Fläche eines Stückguts sein.

3.2 Informationen zu einzelnen Stückgütern

An *Lichtschranken* werden einzelne Güter detektiert, deren Signale nicht direkt in einem kontinuierlichen Modell abgelesen werden können. Um trotzdem mit dem MFM Aussagen über einzelne Güter zu treffen, können stochastische Informationen genutzt werden. Die Dichteverteilung kann dazu als eine normalisierte Wahrscheinlichkeitsverteilung betrachtet werden (Göttlich und Pfirsching 2018). Für eine Lichtschranke werden die durchkreuzten Zellen der Dichteverteilung betrachtet, für einen Flächensensoren wiederum die Zellen der Dichteverteilung in diesem Bereich. Um aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung Signale zu generieren, muss die räumliche Diskretisierung berücksichtigt werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Stückgut auf einer Linie befindet, setzt sich aus der Summe der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zellen zusammen. Daher ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit $P(x, t)$ auf der Linie L bei $x_2 = c$ zum Zeitpunkt t

$$P_L(t) = \sum_k \rho(x_{k,c}, t) \cdot \Delta x_1 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}r}. \quad (9)$$

Falls die Wahrscheinlichkeit $P(t) \geq 1$ ist, bedeutet dies nicht zwangsläufig, dass sich ein Stückgut mittig auf der Linie befindet. Dafür kann es mehrere Ursachen geben:

1. Hierbei sind die Fläche der Stückgüter bzw. die projizierte Fläche berücksichtigt. Für eine Lichtschranke ist dies irrelevant, da diese auf den Umfang und nicht den Mittelpunkt eines Stückguts anschlägt
2. Zwei halbe Stückgüter wirken sich genauso auf die Wahrscheinlichkeit aus wie ein ganzes. Dies kann sich auf den bestimmten Wahrscheinlichkeitswert auswirken, wenn sich viele Stückgüter nahe der Lichtschranke befinden.
3. Die Anfangsdichteverteilung wird insgesamt geglättet. Daher ist zumindest zu Beginn der Simulation die Dichte eines Stückguts über ein größeres Gebiet verteilt.

Wird stattdessen ein *Flächensensor* im Bereich $\Omega_A(a_1 \leq x_1 \leq b_1, a_2 \leq x_2 \leq b_2) \in \mathbb{R}^2$ eingesetzt, ergibt sich analog zu (9) bezogen auf die Fläche A statt die Linie

$$P_A(t) = \sum_{k=a_1}^{b_1} \sum_{l=a_2}^{b_2} \rho(x_{k,l}, t) \cdot \Delta x_1 \cdot \Delta x_2. \quad (10)$$

Liegt der Wert der Dichteverteilung in diesen Zellen unter einem Schwellwert ϕ , so kann angenommen werden, dass kein Stückgut vorhanden ist. Dies gilt analog für eine Lichtschranke. Ein sinnvoller Wert für den Schwellwert könnte beispielsweise mit der doppelten Standardabweichung σ_0 aus der Normalverteilung in (4) bestimmt werden:

$$\phi = \frac{1}{2\rho_{max}\pi\sigma_0^2} e^{-2}. \quad (11)$$

Aus makroskopischer Sicht verhält sich eine *Abstandsmessung* ähnlich wie eine Lichtschranke. Es müssen wiederum die Zellen in einer Linie betrachtet werden. Allerdings muss eine Wahrscheinlichkeit definiert werden, bis zu der die Abstandsmessung betrachtet wird. Dann werden der Abstand bzw. die Zellenanzahl bis zu dieser Wahrscheinlichkeit betrachtet.

3.3 Informationen über spezifische Stückgüter

Im MFM werden alle Stückgüter zusammen in eine Dichteverteilung umgerechnet, ohne dass die einzelnen eine Markierung haben. Dadurch können keine Aussagen über spezifische Stückgüter getroffen werden. Die Erfassung spezifischer Güter wie über RFID-Sensoren, Barcode-Scanner oder kamerabasierte Codeleser kann mit Hilfe des MFMs nicht wiedergegeben werden. Werden diese Informationen benötigt, ist das MFM nicht geeignet. An dieser Stelle sollten eine Kopplung oder Überführung mit einem PMM angedacht werden. Dies soll in zukünftigen Arbeiten betrachtet werden.

3.4 Visualisierung

Die Visualisierung stellt keine Sensorsignale zur Verfügung, sondern dient zur direkten Interaktion des Benutzers mit der Simulation. Sie gibt einen ersten, anschaulichen Eindruck der aktuellen Situation für die VIBN. Dies ist für das MFM besonders wichtig, da die reine Wiedergabe als Matrix mit hunderten Einträgen unübersichtlich ist. Die einfachste Visualisierung der Dichteverteilung erfolgt mit Hilfe eines *Heatmap-Diagramms* (vgl. Abb. 3). Diese Visualisierung wurde bereits

von (Hoher et al. 2012) für die Dichteverteilung eingesetzt. Die Farbgebung kann dabei je nach Anwendungszweck variiert werden.

Für die VIBN wird in der Regel eine *dreidimensionale Visualisierung* basierend auf den CAD-Daten (Computer-Aided Design) eingesetzt. Darüber hinaus ist eine dreidimensionale Darstellung häufig intuitiv verständlicher als die zweidimensionale Visualisierung. Die einzelnen Zellen der Dichteverteilung können als Quader dargestellt werden (vgl. Abb. 5). Je höher der Quader, desto größer der Dichtewert. Die Skalierung sollte in Abhängigkeit der Umgebung gewählt werden. Je nach Umgebungsgröße und Diskretisierung kann für die Visualisierung der Durchschnitt mehrerer Zellen zu einem Quader zusammengefasst werden. Die Farben aus der zweidimensionalen Darstellung können weiterhin eingesetzt werden, evtl. ergänzt durch eine Variation der Transparenz. Der Transparenzwert α variiert in der RBGA-Darstellung zwischen Null (komplett durchsichtig) und eins (komplett undurchsichtig), er kann daher direkt aus der Dichteverteilung übernommen werden.

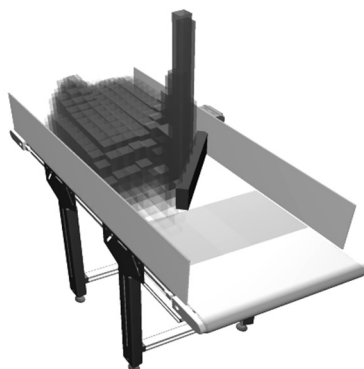


Abbildung 5: Dreidimensionale Visualisierung der Dichteverteilung

4 Veranschaulichung der Generierung von Sensorsignalen

Zur Veranschaulichung soll ein Förderband mit Verengung betrachtet werden, auf dem Flaschen bewegt werden. Die Visualisierung des zugehörigen makroskopischen Modells ist in Abbildung 5 zu sehen. Nach der Verengung befindet sich eine Zählwaage (Abb. 6 links, dunkel grob schraffiert), welche die Anzahl der Stückgüter misst. Am Übergang zu der Zählwaage befindet sich eine Lichtschranke (Abb. 6 links, helle Linie), die erkennt, wenn Stückgüter auf die Zählwaage transportiert werden. Zusätzlich gibt es einen Flächensensor (Abb. 6 links, hell fein schraffiert), der die Fläche vor der Verengung überwacht. Es befinden sich 192 Flaschen auf dem Förderband, deren Startpositionen in Abbildung 3 gezeigt sind. Die Signale werden in einem Bedienfeld gezeigt, das in Abbildung 6 rechts nach 1,4 Sekunden dargestellt ist. Die Lichtschranke wird mit Formel (9) berechnet, der Flächensensor mit Formel (10) skaliert mit der Stückgüteranzahl und der maximalen Dichte und die Zählwaage mit Formel (8). Für die Lichtschranke wurde der Schwellwert (11) mit dem Durchmesser der Flaschen als maximale Dichte verwendet.

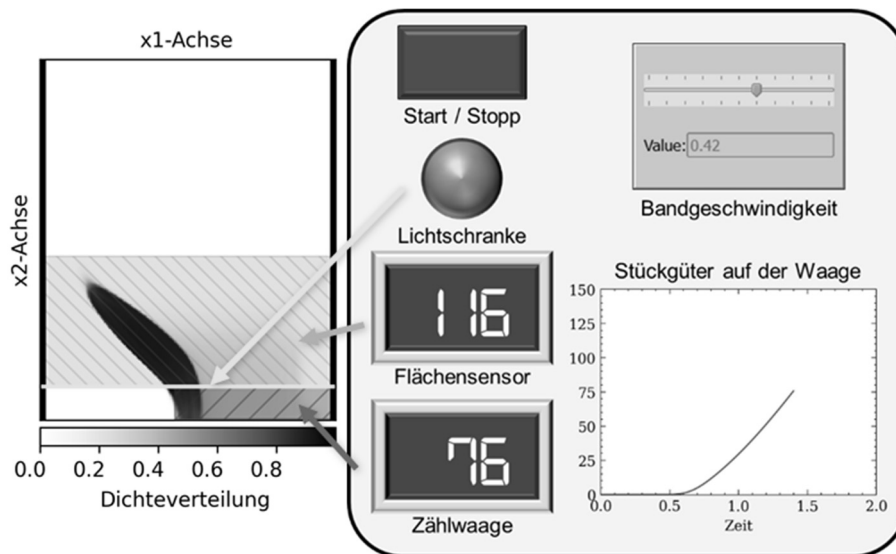


Abbildung 6: Dichteverteilung und schematisches Bedienfeld nach 1,4 Sekunden

5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Materialfluss in einer Produktionsanlage kann mit unterschiedlichen Modellen dargestellt werden; bei großen Stückzahlen ist das MFM besonders geeignet. Um ein MFM in die VIBN zu integrieren, müssen Signale aus der kontinuierlichen Dichteverteilung generiert werden. Am einfachsten zu berechnen sind Bereichssignale wie der zeitliche Verlauf hinter einer Stelle, diese können auf die Ausgangsdichteverteilung bezogen werden. Für Lichtschranken und Flächensensoren können die stochastischen Wahrscheinlichkeitsinformationen in der Dichteverteilung genutzt werden. Aus der diskretisierten Darstellung wird die Wahrscheinlichkeit als Summe mit zusätzlichem Faktor bestimmt. Demzufolge handelt es sich nicht um absolute Ergebnisse, sondern um Ergebnisse mit Wahrscheinlichkeit. Die Visualisierung kann in Heatmap-Diagrammen oder dreidimensional mit Quadern unterschiedlicher Größe und Farbintensität erfolgen. Es können bisher keine dreidimensionalen Einflüsse berücksichtigt werden, sondern lediglich die Bewegung in einer Ebene. Dies soll in zukünftigen Arbeiten betrachtet werden. In Zukunft soll zusätzlich die Kopplung zwischen einem physikbasierten und einem MFM untersucht und realisiert werden, so dass spezifische Stückgüter ebenfalls betrachtet werden können. Außerdem sollen Änderungen im statischen Geschwindigkeitsfeld untersucht werden, so dass Aktorsignale einbezogen werden können.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die Förderung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 327964174. Vielen Dank außerdem an Frau Jennifer Weißen, M. Sc. vom Institut für Mathematik der Universität Mannheim für die Unterstützung und Zusammenarbeit.

Literatur

- Al-Hawari, T.; Aqlan, F.; Al-Buhaisi, M.'a.; Al-Faqeer, Z.: Simulation-Based Analysis and Productivity Improvement of a Fully Automatic Bottle-Filling Production System: A Practical Case Study. In: Second International Conference on Computer Modeling and Simulation, Sanya, China, 2010, S. 195–199.
- Barth, M.; Puntel Schmidt, P.; Hoernicke, M.; Oppelt, M.; Wolf, G.; Hundt, L.; Stern, O.: Methoden und Modelle der Virtuellen Inbetriebnahme - Eine Übersicht der Richtlinienarbeit des GMA FA 6.11. *Automation 2015* (2015) 16.
- Degond, P.; Ferreira, M.A.; Motsch, S.: Damped Arrow–Hurwicz algorithm for sphere packing. *Journal of Computational Physics* 332 (2017), S. 47–65.
- Göttlich, S.; Hoher, S.; Schindler, P.; Schleper, V.; Verl, A.: Modeling, simulation and validation of material flow on conveyor belts. *Applied Mathematical Modelling* 38 (2014) 13, S. 3295–3313.
- Göttlich, S.; Pfirsching, M.: A micro-macro hybrid model with application for material and pedestrian flow. *Cogent Mathematics & Statistics* 5 (2018) 1, S. 1–20.
- Hoher, S.: Ein gekoppeltes Materialflussmodell zur durchgängigen Entwicklungsunterstützung von Materialflusssteuerungen: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Stuttgart, Universität Stuttgart, Dissertation, 2017.
- Hoher, S.; Schindler, P.; Göttlich, S.; Schleper, V.; Röck, S.: System Dynamic Models and Real-time Simulation of Complex Material Flow Systems. In: ElMaraghy, H.A. (Hrsg.): *Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability*. Berlin, Heidelberg: Springer 2012, S. 316–321.
- Kienzlen, A.; Verl, A.: Comparison of Material Flow Models and Acceleration of the Macroscopic Flow Model for Virtual Commissioning. In: Nketsa, A.; Baron, C.; Foucher, C. (Hrsg.): *ESM 2020*, Toulouse, 2020, 168–175.
- Li, P.; Liu, X.: Common Sensors in Industrial Robots: A Review. *Journal of Physics: Conference Series* 1267 (2019), S. 12036.
- Prims, D.; Kötz, J.; Göttlich, S.; Katterfeld, A.: Validation of Flow Models as New Simulation Approach for Parcel Handling in Bulk Mode. *Logistics Journal* (2019) 6.
- Rybicka, J.: *Modelling Flexible Manufacturing Systems through Discrete Event Simulation*. Cranfield, Großbritannien, Cranfield University, School of Aerospace, Transport and Manufacturing, PhD, 2017.
- Scheifele, C.; Lechler, A.; Verl, A.: Materialflussmodelle für die HiL-Simulation. *wt Werkstattstechnik online* 106 (2016) 3, S. 119–124.
- Spitzweg, M.: *Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen*. München: Utz 2009.
- Strigl, T.: Materialflusssimulation zur schnellen Inbetriebnahme realer Steuerungen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009) 1-2, S. 76–80.
- VDI Verein Deutscher Ingenieure VDI/VDE 3693: *Virtuelle Inbetriebnahme*. Berlin: Beuth, 2016.