

3/2013

Management von Behälterkreisläufen auf Basis der Verkehrsflussdynamik?

Eine Analogiebetrachtung
von Messgrößen und Systemstrukturen

Kerstin Noatzsch, Rainer Souren

Ilmenauer Schriften zur
Betriebswirtschaftslehre



Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übertragung, des Nachdrucks und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, bleiben vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© VERLAG proWiWi e. V., Ilmenau, 2013

Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre
www.tu-ilmenau.de/is-ww

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Norbert Bach, Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Gernot Brähler,
Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Anja Geigenmüller, Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren

ISSN 2192-4643

ISBN 978-3-940882-42-4

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013200206

Ilmenauer Schriften
zur Betriebswirtschaftslehre
3/2013

Management von Behälterkreisläufen
auf Basis der Verkehrsflussdynamik?
Eine Analogiebetrachtung
von Messgrößen und Systemstrukturen

Kerstin Noatzsch¹, Rainer Souren²

¹ Dipl.-Verk.wirtsch. Kerstin Noatzsch, Wissenschaftliche Mitarbeiterin
des Fachgebiets Nachhaltige Produktionswirtschaft und Logistik an der TU Ilmenau

² Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren, Leiter des Fachgebiets
Nachhaltige Produktionswirtschaft und Logistik an der TU Ilmenau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	II
1 Einleitung.....	1
2 Theorie der Verkehrsflussdynamik	2
2.1 Einordnung des Verkehrsflusses als makroskopische Größe.....	2
2.2 Messgrößen der Verkehrsflussdynamik	3
3 Analogien zwischen Behälter- und Verkehrsfluss	8
3.1 Definition des Behälterflusses	8
3.2 Messgrößen zur Charakterisierung des Behälterflusses	9
4 Kreislaufmodelle für Mehrwegbehälterflüsse	17
4.1 Kreislaufsysteme für Mehrwegbehälter und Fahrzeuge	17
4.2 Ein Kreisverkehr-Modell für den Mehrwegbehälterfluss.....	21
5 Resümee und Ausblick.....	24
Literaturverzeichnis	26

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für Stationen eines Mehrwegbehälterkreislaufs.....	18
Abbildung 2: Simulation des Verkehrsflusses in einem geschlossenen Kreislauf (,Ring Road')	20
Abbildung 3: Modellhafte Struktur einer geschlossenen Ringstraße und eines Kreisverkehrs mit vier gepaarten Ein- und Ausfahrten	21
Abbildung 4: Strukturmodell für den Behälterfluss basierend auf einem Kreisverkehr, exemplarisch mit vier Stationen inklusive Zu- und Abflüssen	22

1 Einleitung

In zahlreichen natürlichen und künstlichen Systemen existieren Flüsse. So fließt nicht nur in natürlichen Flüssen Wasser, sondern auch in Rohrleitungssystemen Flüssigkeit oder Gas, elektrischer Strom durch Leitungen und Geld auf Finanzmärkten. Kennzeichnend ist die „fließende Bewegung“, d. h. ein „stetiger, ununterbrochener Fortgang“¹ in eine bestimmte Richtung. Im produzierenden Gewerbe spielen vor allem Material- und Produktflüsse entlang der Supply Chain eine wichtige Rolle. Ihre Steuerung ist Gegenstand der Logistik und erfolgt mit dem Ziel, dass sich die richtigen Objekte im richtigen Zustand zur richtigen Zeit am richtigen Ort befinden (4-R-Konzept).² Dazu müssen sie transportiert, also bewegt, gelagert und bereitgestellt werden, was meist in Behältern oder Verpackungen geschieht.

Mehrwegbehälter, wie z. B. Getränkeflaschen oder spezielle Ladungsträger der Automobilindustrie, zeichnet die besondere Problematik aus, dass sie nicht nur das Packgut transportieren, sondern sich zeitweise als eigenständige Objekte innerhalb der Supply Chain bewegen. Eine Aufgabe des Behältermanagements bzw. der Behälterlogistik ist es, diesen Fluss zu steuern, damit die Mehrwegbehälter (in denen die richtigen Objekte im richtigen Zustand transportiert werden) ebenfalls zur richtigen Zeit am richtigen Ort sind und der Behälterfluss sich weder anstaut noch abreißt.

Flusseigenschaften von Behältersystemen werden in der Literatur bisher nur selten thematisiert. Bevor solche Flusssysteme für Behälter eigenständig untersucht und modelliert werden, liegt es nahe, Parallelen zu anderen Forschungsgebieten zu suchen, in denen bereits Flussmodelle existieren, und zu untersuchen, inwiefern Eigenschaften und Verhaltensweisen von diesen auf den Behälterfluss übertragbar sind. Langfristiges Ziel ist dabei, Flussmodelle zu finden, die auf Behälterflusssysteme anwendbar sind und somit Analysen und Prognosen des Behälterflusses ermöglichen.

Als analoge Objekte kommen unter Umständen granulare Stoffe (z. B. fließender Sand, Kies oder Reis) in Frage, da sich (im Gegenteil zu Flüssigkeiten) trennbare Objekte (Teilchen) darin bewegen. Behälter sind allerdings größer als die Teilchen granularer Materie und weisen oft einen Abstand zueinander auf. Ihr Fluss ähnelt insofern eher dem Verkehrsfluss einzelner Fahrzeuge, der seinerseits Analogien zu Flüssigkeiten und granularen Flüssen aufweist.³ Deshalb wird in diesem Arbeitsbericht der Verkehrsfluss als Vergleichseinheit herangezogen, und es werden Analogien zwischen dem seit Anfang des 20.

¹ [Http://www.duden.de/rechtschreibung/Fluss](http://www.duden.de/rechtschreibung/Fluss). Der Begriff Fluss wird in der wissenschaftlichen Literatur als allgemein bekannt angenommen und – abgesehen vom Fluss als Gewässer – selten explizit definiert, sondern lediglich anhand dieser Eigenschaften charakterisiert.

² Vgl. dazu die 4 R der Logistik nach z. B. Pfohl 1972, S. 28f., bzw. Pfohl 2010, S. 12. Andere Autoren benennen auch 6 R (vgl. z. B. Jünemann 1989, S. 18) oder 7 R (vgl. Seeck 2010, S. 16).

³ Vgl. dazu z. B. Helbing 1997b, S. 240–257.

Jahrhunderts umfassend erforschten Verkehrsfluss und dem Behälterfluss herausgearbeitet. Dies geschieht auf begrifflicher, formaler und auch struktureller Ebene, wobei sich letztere speziell auf Kreislaufstrukturen bezieht.

In Kapitel 2 werden zunächst die theoretischen und formalen Grundlagen zur Beschreibung und Charakterisierung des Verkehrsflusses vorgestellt. In Kapitel 3 soll anfangs eine Definition für den Behälterfluss in Anlehnung an die des Verkehrsflusses erstellt werden. Anschließend folgen überwiegend formale Analogieüberlegungen, die die Übertragung der Messgrößen des Verkehrsflusses auf den Behälterfluss fokussieren. Inhalt des Kapitels 4 sind strukturelle Analogieüberlegungen für Kreislaufsysteme, die zunächst spiegelbildlich untersuchen, ob bestimmte Verkehrskreisläufe existieren, die Behälterkreisläufen ähneln. Im Anschluss wird daraus ein Strukturmodell für Behälterkreisläufe entwickelt, das einem Kreisverkehr nachempfunden ist, aber auch Unterschiede einbezieht. Abschließend werden in Kapitel 5 die Erkenntnisse des Arbeitsberichts zusammengefasst und Ansatzpunkte für die weitere Forschung auf diesem Gebiet aufgezeigt.

2 Theorie der Verkehrsflussdynamik

2.1 Einordnung des Verkehrsflusses als makroskopische Größe

Der Begriff Verkehrsfluss wird zumeist in Bezug auf den Straßenverkehr verwendet. ‚Fließender Verkehr‘ bedeutet im allgemeinen Sprachgebrauch (bspw. in den Verkehrsnachrichten), dass sich Fahrzeuge ohne Stau oder Stocken auf der Straße bewegen. In wissenschaftlichen Abhandlungen werden mit dem Begriff Verkehrsfluss zwei unterschiedlich weitreichende Inhalte beschrieben. Im weiteren Sinn bezeichnet der Begriff den Verlauf des sich auf der Straße abspielenden Verkehrs, ohne die einzelnen Fahrzeuge zu fokussieren. Im engeren Sinn ist er eine – in Abschnitt 2.2 genauer definierte – Messgröße, die die Anzahl der Fahrzeuge angibt, die in einem Zeitintervall einen bestimmten Ort passieren.⁴ Sowohl im weiten als auch im engeren Sinn ist der Verkehrsfluss ein Betrachtungsgegenstand der Verkehrsflussdynamik als Teilgebiet der Verkehrsdynamik, das sich mit der Bewegung von Fahrzeugen auf der Straße beschäftigt.⁵ Für die Forschung auf dem Gebiet der Verkehrsflussdynamik werden die zu untersuchenden Daten und Modelle in der Literatur nach unterschiedlichen Kriterien eingeteilt.

⁴ Vgl. Hall 2001, S. 2-5; Treiber/Kesting 2010, S. 15.

⁵ Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 52. Treiber/Kesting unterscheiden hier bewusst die Verkehrsflussdynamik von der weniger spezifischen Bezeichnung Verkehrsdynamik. Die Verkehrsdynamik umfasst zudem weitere ‚dynamische‘ Themengebiete wie die Verkehrsplanung, bei der z. B. die Dynamik des Verkehrs bezüglich Verkehrsmittel- oder Routenwahl eine Rolle spielt. Der Verkehrsfluss (auch Verkehrsstrom) i. w. S. ist hier vor allem als Einflussfaktor oder Ergebnis anderer Untersuchungen von Bedeutung.

Die wohl am meisten verwendete Einteilung ist die Unterscheidung in mikroskopische und makroskopische Verkehrsflussmodelle.⁶

In **mikroskopischer Sichtweise** wird das Verhalten einzelner Verkehrsteilnehmer betrachtet, die als ‚Fahrer-Fahrzeug-Einheiten‘ individuelle Eigenschaften aufweisen und heterogen sind. So können durch mikroskopische Modelle individuelle Fahrstile und Wechselwirkungen der Einheiten (z. B. durch Bremsen oder Spurwechsel) abgebildet und analysiert werden. Typische mikroskopische Größen sind z. B. die Geschwindigkeit und Position einzelner Fahrzeuge, (Sicherheits-)Abstände zum Vordermann oder auch die Sensitivität, mit der jeder Fahrer agiert.⁷

Aus den individuellen Größen jeder Fahrer-Fahrzeug-Einheit können durch geeignete Aggregation **makroskopische Größen** ermittelt werden, die Aussagen zum gesamten Verkehrsfluss zulassen. So lässt sich die mittlere Geschwindigkeit des Verkehrs aus den Geschwindigkeiten der einzelnen Fahrzeuge bestimmen.⁸ Zu den derart ermittelten makroskopischen Größen zählen zudem der Verkehrsfluss im engeren Sinn sowie die Verkehrsdichte, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

Die makroskopische Sichtweise geht davon aus, dass sich der Verkehrsfluss in seiner Gesamtheit ähnlich zu strömenden Gasen oder Flüssigkeiten oder einem granularen Fluss verhält. Sie basiert deshalb auf physikalischen Grundlagen der Hydrodynamik aus der Strömungslehre. Die einzelnen Fahrer-Fahrzeug-Einheiten interessieren nicht, es kommt vielmehr auf „die kollektive Gesamtdynamik“⁹ an. Nachteile dieser Sichtweise sind die fehlende Betrachtung der Individualität der Fahrer und damit eine Homogenisierung heterogener Größen. Für viele Belange (z. B. zur Prognose der Verkehrsdichte zu bestimmten Tageszeiten) ist es jedoch nicht nötig, die Individualität einzubeziehen. Das ist auch hier der Fall, da im Folgenden ausschließlich das Verhalten des Verkehrsflusses i. w. S. interessiert.

2.2 Messgrößen der Verkehrsflussdynamik

Die makroskopischen Größen der Verkehrsflussdynamik, die den Verkehrsfluss i. w. S. beschreiben, können in **zeitbezogene** (zeitliche) und **raumbezogene** (räumliche) Größen eingeteilt werden.¹⁰ Dies bedingt unterschiedliche Erfassungsmethoden für die (realen oder simulierten) Daten, aus denen die Werte der Messgrößen ermittelt werden können. Die Auswahl der nachfolgend beschriebenen Datenerfassungsmethoden sollte in Ab-

⁶ Siehe z. B. Helbing 1997b, S. 68; Lee/Lee/Kim 2001, S. 056126-1. Einige Autoren erweitern diese Einteilung um mesoskopische Modelle, die die Verbindung zwischen mikroskopischen und makroskopischen Ansätzen berücksichtigen.

⁷ Vgl. May 1990, S. 11f.; Helbing 1997b, S. 68 und 109ff.

⁸ Vgl. v. a. Treiber/Kesting 2010, S. 54. Dabei muss beachtet werden, dass nicht jede Aggregation sinnvoll ist. Individuelle Fahrereigenschaften wie die Wunschgeschwindigkeit oder der Fahrstil bspw. bringen aggregiert keine sinnvollen Aussagen zum kollektiven Fahrverhalten.

⁹ Helbing 1997b, S. 68.

¹⁰ Vgl. Gerlough/Huber 1975, S. 7–13; Hall 2001, S. 2-2–2-11; Treiber/Kesting 2010, S. 15ff.

hängigkeit von den interessierenden Größen erfolgen, denn nicht jede Größe kann aus jeder Art von Daten ohne Einschränkung bestimmt werden.¹¹

Methoden der Datenerfassung des Verkehrsflusses

Zeitbezogene Daten werden grundsätzlich über eine **Zeitspanne** an einem **festen Ortpunkt** erhoben. Dies kann z. B. über manuelle Zählung, pneumatisch mit auf der Fahrbahn liegenden Schläuchen, per Radar oder optisch mit Hilfe von Infrarotsensoren oder Lichtschranken erfolgen. Die heutzutage am meisten verwendete Technik ist der Einbau von Induktionsschleifen (Detektoren) in die Straße. Deshalb dient im Folgenden der Begriff Detektor als Synonym für eine stationäre Messstelle. Hier werden vor allem die Anzahl der Fahrzeuge und ihre Passierzeitpunkte gemessen, wobei aus letzteren weitere Daten wie Geschwindigkeiten und Fahrzeuglängen berechnet werden können.

Raumbezogene Daten werden zu einem **festen Zeitpunkt** oder in einer **Zeitspanne** über einen längeren **Straßenabschnitt** aufgenommen. Zum einen gibt es die Möglichkeit, mittels Kameras aus erhöhter Perspektive (z. B. aus Hubschraubern) die Verkehrssituation zu fotografieren, zu filmen oder eine Fotoserie über mehrere Zeitpunkte zu erstellen. Hiermit können zu verschiedenen Zeitpunkten alle Fahrzeuge und ihre Positionen innerhalb eines Streckenabschnitts erfasst werden, wodurch ebenfalls u. a. die Geschwindigkeiten bestimmt werden können. Zum anderen werden Messfahrzeuge (sog. floating cars oder moving observers) eingesetzt, die während des ‚Mitschwimmens‘ im Verkehr Daten aufzeichnen. Diese Methode wird zum Teil auch als dritte Kategorie der Datenerfassung verstanden.¹² Zu den meist sehr detaillierten Daten des einzelnen floating car zählen seine Geschwindigkeit, seine Position sowie die Anzahl der passierten und passierenden Fahrzeuge. Gleichzeitig ist es möglich, die Reisezeit eines Fahrzeugs als „die Zeitspanne, die ein Fahrzeug für die Durchfahrt eines Streckenabschnitts .. benötigt“¹³, zu bestimmen.¹⁴ Aus den erfassten mikroskopischen Daten können die nachfolgend definierten makroskopischen Messgrößen bestimmt werden.

¹¹ Siehe zur ausführlichen Beschreibung der Datenerfassung vor allem Hall 2001, S. 2-2ff., und Treiber/Kesting 2010, S. 7–13.

¹² Vgl. Gerlough/Huber 1975, S. 12f.; Hall 2001, S. 2-4. Floating cars können gemeinsam mit dem Film und der Fotoserie auch differenziert als raumzeitliche Datenerfassung (Zeitspanne und Straßenabschnitt) aufgefasst werden (vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 7ff.).

¹³ Treiber/Kesting 2010, S. 267. Die Reisezeit im Verkehr ist hauptsächlich mikroskopisch relevant und wird deshalb hier, wie auch größtenteils in der Literatur, makroskopisch nicht weiter betrachtet.

¹⁴ Vgl. auch Gerlough/Huber 1975, S. 12f.; Hall 2001, S. 2-4.

Verkehrsfluss im engeren Sinn

Die wohl bedeutendste **zeitbezogene** Größe ist der bereits zuvor angesprochene **Verkehrsfluss** Q^F , der die Anzahl der Fahrzeuge N^F angibt, die innerhalb des Zeitintervalls Δt einen festen Ort x passiert:¹⁵

$$Q^F(x, t) = \frac{N^F}{\Delta t} \quad (1).$$

Der Verkehrsfluss wird typischerweise in Fahrzeugen pro Stunde oder Minute (Fz/h oder Fz/min) gemessen, da überwiegend Vergleiche zu bestimmten Tageszeiten angestellt werden.¹⁶

Geschwindigkeit

Wie schnell der Verkehr fließt, kann mit der **zeitbezogenen** makroskopischen **Geschwindigkeit** V_t^F angegeben werden, die sich als Mittelwert der (mikroskopischen) Geschwindigkeiten v_α der einzelnen Fahrzeuge α ergibt,¹⁷ die in einem Zeitraum einen Messpunkt überfahren. Von außen sind die (mikroskopischen) Geschwindigkeiten messbar, wenn sich am Messpunkt zwei Detektoren in kurzem Abstand hintereinander befinden oder der Messpunkt mit einem Radar ausgestattet ist.¹⁸ Das arithmetische Geschwindigkeitsmittel (*time mean speed*) für N^F Fahrzeuge, die im Zeitraum der Messung Δt über die Messstelle x fahren, wird gemäß folgender Formel berechnet:¹⁹

$$V_t^F(x, t) = \bar{v}_\alpha = \frac{1}{N^F} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_0+N^F-1} v_\alpha \quad (2).$$

Dabei ist α_0 das erste Fahrzeug und $(\alpha_0 + N^F - 1)$ das letzte Fahrzeug. Die Streuung der Geschwindigkeit innerhalb des betrachteten Zeitraums $\sigma_v(x, t)$ kann über die zeitbezogene Geschwindigkeitsvarianz Var_t^F (mittlere quadratische Abweichung vom Geschwindigkeitsmittel) bestimmt werden:²⁰

¹⁵ Das Hochzeichen F für ‚Fahrzeuge‘ wird hier hinzugefügt, um die Größen bzw. Formeln für den Verkehrsfluss später von den Größen und Formeln für den Behälterfluss unterscheiden zu können. Bei Größen, die vom Betrachtungsobjekt unabhängig sind, wie die Zeit t und der Ort x , wird auf das Hochzeichen verzichtet.

¹⁶ Vgl. Gerlough/Huber 1975, S. 7; Helbing 1997a, S. 3737; Hall 2001, S. 2-5; Treiber/Kesting 2010, S. 15. Die Autoren verwenden die Symbole N bzw. ΔN und T bzw. Δt unterschiedlich. In dieser Arbeit werden N und Δt gewählt, da es eine absolute Zahl an Fahrzeugen ist, die über einen Zeitabschnitt gezählt wird.

¹⁷ Bei Symbolen, die die Fahrzeuge über den Index α integrieren, wird das Hochzeichen F weggelassen.

¹⁸ Mit zwei Detektoren wird die Zeit gemessen, in der der Weg zwischen den beiden Detektoren zurückgelegt wird und dann (meist schon vor Ort) mit der allgemein bekannten Formel $v = s/t$ die Geschwindigkeit berechnet. Hierfür wird davon ausgegangen, dass die Geschwindigkeit auf dieser kurzen Strecke annähernd konstant ist. Mit nur einem Detektor müsste die Geschwindigkeit hingegen über eine geschätzte durchschnittliche Fahrzeuglänge berechnet werden, was schlechtere Ergebnisse liefert.

¹⁹ Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 15f.

²⁰ Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 16.

$$\text{Var}_t^F(v) = \sigma_v^2(x, t) = \overline{v_\alpha^2} - \overline{v_\alpha}^2 = \frac{1}{N^F} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_0+N^F-1} v_\alpha^2 - \left(\frac{1}{N^F} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_0+N^F-1} v_\alpha \right)^2 \quad (3).$$

Alternativ ist es möglich, die **raumbezogene** makroskopische **Geschwindigkeit** (*space mean speed*) V_s^F der Fahrzeuge mittels folgender Formel zu bestimmen:

$$V_s^F(t) = \frac{1}{N^F(t)} \sum_{\alpha=1}^{N^F(t)} v_\alpha(t) \quad (4).$$

Dabei werden die Geschwindigkeiten $v_\alpha(t)$ aller Fahrzeuge $N^F(t)$ gemittelt, die sich zum Messzeitpunkt t in einem fixierten Straßenabschnitt befinden.²¹ Die raumbezogene Geschwindigkeitsvarianz Var_s^F wird analog zu Formel (3) bestimmt.

Der Zusammenhang zwischen raumbezogener und zeitbezogener Geschwindigkeit ergibt sich unter Berücksichtigung der zeitbezogenen und raumbezogenen Geschwindigkeitsvarianzen aus Formel (3) zu:²²

$$V_s^F = V_t^F - \frac{\text{Var}_t^F(v)}{V_t^F} \quad (5),$$

bzw.

$$V_t^F = V_s^F + \frac{\text{Var}_s^F(v)}{V_s^F} \quad (6).$$

Der Unterschied zwischen den zwei Geschwindigkeiten ist vor allem auf Straßenabschnitten mit Ampeln, bei Stop-und-Go-Wellen oder Stau von Relevanz, da die beiden Geschwindigkeiten auf der betrachteten Strecke dann stark variieren können. Für den freien Verkehr auf Autobahnen ist der Unterschied nahezu unbedeutend, da hier die Geschwindigkeitsvarianzen geringer sind.²³

Verkehrsdichte

Die **Verkehrsdichte** gibt die Anzahl der Fahrzeuge pro Streckenabschnitt (z. B. pro m oder km) an. Sie ist grundsätzlich eine räumliche Größe, lässt sich jedoch aus zeit- oder raumbezogenen Größen ermitteln. Deshalb wird auch hier zwischen der **zeitbezogenen** und der **raumbezogenen Dichte** unterschieden.

Die Ermittlung der **zeitbezogenen Verkehrsdichte** erfolgt anhand des **Belegungsgrades** (occupancy), der eine weitere **zeitbezogene** Größe darstellt. Er ist dimensionslos und gibt den Anteil einer Zeitspanne an, den ein fester Punkt, üblicherweise ein Detektor, von Fahrzeugen belegt ist. Diese relative Belegungsdauer O^F wird mit der Formel

²¹ Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 20.

²² Siehe zur Herleitungen dieser Gleichungen Gerlough/Huber 1975, S. 8; Hall 2001, S. 2-6ff. Die Autoren stützen ihre Ausführungen auf *Wardrop, J.G.: Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research, London 1952.*

²³ Vgl. Hall 2001, S. 2-7f.

$$O^F(x, t) = \frac{1}{\Delta t} \sum_{\alpha=\alpha_0}^{\alpha_0+N^F-1} (t_{\alpha}^1 - t_{\alpha}^0) \quad (7)$$

ermittelt. Hierbei werden für jedes Fahrzeug α die Zeiten erfasst, zu denen es mit der Fahrzeugfront (t_{α}^0) und dem -heck (t_{α}^1) den Detektor passiert. Diese werden wie in der Geschwindigkeitsformel über alle Fahrzeuge summiert, und die Summe wird durch die abgelaufene Zeit dividiert.²⁴

Vom Belegungsgrad des Detektors sind Aussagen zur zeitbezogenen Verkehrsdichte ableitbar, denn je dichter der Verkehr ist, desto länger ist der Detektor belegt. HELBING stellt eine entsprechende Methode zur Bestimmung der Dichte vor: Wenn die Fahrzeuge auf der Straße ohne Lücke („Stoßstange an Stoßstange“) hintereinander fahren würden, dann wäre die „Stoßstangendichte“ durch das Reziproke der mittleren Fahrzeuglänge L^F bestimmt: $q_{ss}^F = \frac{1}{L^F}$ mit $L^F = \bar{l}_{\alpha}$. Wird zusätzlich unterstellt, dass sich die **Verkehrsdichte** $q^F(x, t)$ proportional zum Belegungsgrad verhält, ergibt sie sich gemäß folgender Formel:²⁵

$$q^F(x, t) = O^F(x, t) \cdot q_{ss}^F(x, t) = \frac{O^F(x, t)}{L^F(x, t)} \quad (8).$$

Diese Formel führt allerdings nicht zwingend zu einem plausiblen Wert, falls die Extremwerte des Belegungsgrades (0 oder 1) vorliegen. Aus einem Belegungsgrad von 0 folgt unmittelbar eine Verkehrsdichte von 0, woraus die Folgerung gezogen würde, dass die Straße nicht befahren ist. Es wäre aber auch möglich, dass dort gerade der Verkehr gestaut ist, also eine sehr hohe Verkehrsdichte herrscht und genau auf dem Detektor kein Fahrzeug steht.²⁶ Wenn hingegen in einem Stau ein Fahrzeug auf dem Detektor stünde, würde ein Belegungsgrad von 1 gemessen, der für die Dichte die Stoßstangendichte implizieren würde. Dies entspricht nicht der Realität, da normalerweise (außerhalb von Unfällen) auch im Stau ein Sicherheitsabstand eingehalten wird. Aufgrund dieser Probleme erscheint eine zeitbezogene Ermittlung der Verkehrsdichte wenig zweckmäßig.

Stattdessen sollte die Dichte raumbezogen bestimmt werden, zumal die Dichte naturgemäß eine räumliche Größe (wie z. B. die physikalische Dichte in kg/m^3) ist. Die Messung der raumbezogenen Dichte kann durch die Zählung der Fahrzeuge auf einem bestimmten Streckenabschnitt Δx zu einem festen Zeitpunkt t mit den zu Anfang des Kapitels beschriebenen Methoden zur Erfassung raumbezogener Daten erfolgen. Alternativ zur direkten Datenerfassung kann die **raumbezogene Verkehrsdichte** anhand einer

²⁴ Vgl. Hall 2001, S. 2-8f.; Treiber/Kesting 2010, S. 15.

²⁵ Vgl. Helbing 1997b, S. 82ff. Er verwendet außerdem den Index i für die betrachtete Spur der Straße. Diese soll hier jedoch vorerst keine Rolle spielen.

²⁶ Ein Fahrzeug, das den Detektor belegt, wird hierbei als ganze Einheit betrachtet. Es wird nicht etwa in zwei Achsen o. ä. unterteilt.

‚hydrodynamischen Formel‘ bestimmt werden, die den Verkehrsfluss Q^F ins Verhältnis zur mittleren Geschwindigkeit V^F setzt:²⁷

$$\rho^F(x, t) = \frac{Q^F(x, t)}{V^F(x, t)} \quad (9).$$

Dabei sollte die **raumbezogene Geschwindigkeit** (*space mean speed*) verwendet werden, um die raumbezogene Dichte zu bestimmen. Wird stattdessen die zeitbezogene mittlere Geschwindigkeit verwendet, kann es zu systematischen Fehlern kommen und die Dichte falsch eingeschätzt werden.²⁸

3 Analogien zwischen Behälter- und Verkehrsfluss

3.1 Definition des Behälterflusses

Auch wenn in der Literatur zum Behältermanagement logistische Planungsgegenstände im Vordergrund stehen, wird der Begriff Behälterfluss an sich bisher nur vereinzelt thematisiert.²⁹ Stattdessen rückt mit dem Behälterkreislauf bereits eine konkrete Art des Flusssystem in den Fokus des Behältermanagements.³⁰ Einen Zusammenhang zwischen Verpackungskreisläufen³¹ und Flusssystemen stellt SOUREN her. Er vergleicht den „Kreislauf von Verkaufsverpackungen mit einem dynamischen, möglichst weitgehend geschlossenen Flusssystem“³² und weist auf Ähnlichkeiten zu verschiedenen Kreisläufen von Flüssigkeiten hin.³³ Da der Verkehrsfluss sich aus makroskopischer Sichtweise ebenfalls wie strömende Flüssigkeiten oder granulare Flüsse verhält, soll hier in Anlehnung an die Definition des Verkehrsflusses eine allgemeine **Definition** für den **Behälterfluss i. w. S.** gefunden werden: Als Betrachtungsgegenstand des Behältermanagements verkörpert

²⁷ Vgl. Helbing 1997b, S. 81; Treiber/Kesting 2010, S. 17f.

²⁸ Vgl. nochmals die Aussagen zum Unterschied zwischen zeit- und raumbezogenen Geschwindigkeiten gemäß den Formeln (5) und (6). Da sich die Messung der einzelnen Fahrzeuggeschwindigkeiten für die raumbezogene Geschwindigkeit schwierig gestaltet, stellen u. a. TREIBER/KESTING mehrere Näherungsverfahren für die Dichte und die raumbezogene Geschwindigkeit vor, die hier jedoch nicht weiter vertieft werden sollen. Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 17ff.

²⁹ Vgl. z. B. Raum 2005; Hofmann/Bachmann 2006a, S. 168, und das Informationsportal für Behältermanagement (http://www.behaeltermanagement.com/de/was_ist_behaeltermanagement.html, Abrufdatum: 08.10.12).

³⁰ Nach HOFMANN/BACHMANN sind Behälterkreisläufe „das zentrale Betrachtungsobjekt des Behälter-Managements“ (Hofmann/Bachmann 2006b, S. 18).

³¹ Der Unterschied zwischen den Begriffen Verpackung und Behälter soll an dieser Stelle nicht diskutiert werden. Sie werden hier synonym verwendet. In Verbindung wird der Begriff Behälterfluss (statt Verpackungsfluss) verwendet, da im Verlauf des Arbeitsberichts vor allem Mehrwegbehälterkreisläufe im Fokus stehen.

³² Souren 2012, S. 330.

³³ Vgl. Souren 2012, S. 330f.

der Behälterfluss den Verlauf der in logistischen Systemen³⁴ stattfindenden Behälterbewegungen, ohne einzelne Behälter zu fokussieren.

Die makroskopische Sichtweise des Verkehrsflusses, wonach nicht die einzelnen Objekte im Mittelpunkt stehen, sondern der gesamte Fluss, ist auch für den Behälterfluss von Bedeutung. Auch für Behälter interessiert das Gesamtverhalten unter Einbeziehung makroskopischer Größen, und es können lokale Phänomene im Fluss erfasst und analysiert werden, wie z. B. das Anstauen oder das Fehlen von Behältern. Überdies lässt sich auch eine makroskopische Messgröße Behälterfluss im engeren Sinn modellieren, was im nachfolgenden Abschnitt geschieht.

Zuvor sei jedoch darauf hingewiesen, dass mikroskopische Überlegungen hingegen nicht immer zweckmäßig übertragen werden können, da zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Elementen des Verkehrs- und Behälterflusses bestehen. Die beiden für Fahrzeuge mit Fahrern typischen Merkmale Heterogenität und Individualität sind bei Behältern nicht oder nur teilweise gegeben. Ein Behälterfluss mit heterogenen Behältern ist grundsätzlich denkbar, wenn verschiedene Arten von Behältern transportiert werden. Jedoch ist die Heterogenität viel geringer als beim Verkehrsfluss, da sich i. d. R. nicht jeder einzelne Behälter von allen anderen unterscheidet, sondern es Gruppen gleichartiger Behälter gibt. Noch weniger zutreffend ist die Individualitätseigenschaft für Behälter. Individuen haben Bedürfnisse und handeln so, dass sie den größten Nutzen im Sinn der Bedürfnisbefriedigung erzielen.³⁵ Behälter können weder selbst handeln, noch treten Wechselwirkungen zwischen ihnen auf. Sie sind also keine Individuen und beinhalten – im Gegensatz zu Fahrzeugen mit Fahrern – auch keine Individuen. All ihre Bewegungen und Eigenschaften werden von außen gesteuert.

Die maßgeblichen Gründe, die für eine mikroskopische Sichtweise des Verkehrs sprechen, haben also für Behälter keine Bedeutung. Lediglich für die Erfassung einzelner Behälterdaten, vor allem an welchem Ort sie sich zu welcher Zeit befinden, ist die mikroskopische Sichtweise zweckmäßig. Die Daten können dann angemessen aggregiert werden, um wie beim Verkehrsfluss makroskopische Messgrößen und damit Aussagen zum Verhalten der ‚Masse der Behälter‘ abzuleiten.

3.2 Messgrößen zur Charakterisierung des Behälterflusses

Die im vorigen Abschnitt hergestellte Analogie zwischen dem makroskopischen Behälter- und Verkehrsfluss bildet die Grundlage für Analogieüberlegungen auf der formalen Ebene. Es ist zu untersuchen, ob die wesentlichen Größen der Verkehrsflussdynamik auf den Behälterfluss übertragen werden können, um ihn aussagekräftig zu charakterisie-

³⁴ Logistische Systeme bzw. Logistiksysteme werden in der Literatur unterschiedlich definiert, jedoch steht nahezu immer die Verknüpfung und das Management logistischer Prozesse im Vordergrund (vgl. z. B. Huber/Laverentz 2012, S. 5; Fleischmann 2008, S. 3). Detaillierte Ausführungen zu Logistiksystemen sind u. a. bei Pfohl 2010, S. 14ff. zu finden.

³⁵ Vgl. zum ökonomischen Individuum z. B. Rolle 2005, S. 174; Kirchgässner 2008, S. 301f.

ren.³⁶ Dabei wird versucht, den physikalischen Charakter der aus Abschnitt 2.2 bekannten Größen beizubehalten.

Wie beim Verkehrsfluss auf der Straße soll hier zunächst der allgemeine Behälterfluss Gegenstand der Überlegungen sein. Kreisläufe sollen in diesem Abschnitt hingegen noch nicht besonders berücksichtigt werden, da die konkrete räumliche Gestalt wenig Einfluss auf die grundlegenden Eigenschaften des Behälterflusses hat. Die in diesem Abschnitt vorgenommenen Operationalisierungen des Behälterflusses könnten sich somit bspw. auch nur auf Teile des Kreislaufs beschränken. Deshalb wird nachfolgend allgemein Bezug auf die Supply Chain genommen und erst in Kapitel 4 der Behälterkreislauf näher betrachtet.

Datenerfassung des Behälterflusses

Die Unterscheidung der makroskopischen Größen in raum- und zeitbezogene Größen kann analog zum Verkehrsfluss vorgenommen werden. Die damit korrespondierenden Methoden zur Datenerfassung lassen sich teilweise auf den Behälterfluss übertragen. Grundsätzlich sollte die Erfassung von (mikroskopischen) Einzelbehälterdaten erfolgen, die dann wie beim Verkehrsfluss zu makroskopischen Daten aggregiert werden.

Für die Aufnahme **zeitbezogener Daten** können Behälter an einem festen Ortspunkt bzw. an einer Stelle der Supply Chain durch manuelle Zählung, mit Infrarotsensoren oder Lichtschranken und – abhängig von der Behälterart – auch mit Detektoren erfasst werden. Schwer vorstellbar sind hingegen die pneumatische und die radarbasierte Erfassung, da Behälter üblicherweise kleiner als Fahrzeuge sind und sich nicht selbst bewegen, sondern ein Transportmittel benötigen. Stattdessen könnten bei der Datenerfassung Technologien wie Barcode und RFID (allgemein ‚Tags‘) verwendet werden.

Tags können während ihrer Bewegung auch **raumbezogene Daten** erfassen und speichern, die dann am Scanpunkt übergeben werden. Sie werden allerdings in der Praxis bisher überwiegend nur an hochwertigen Behältern wie Containern oder Paletten angebracht, die meist auch hochwertiges Packgut beinhalten. Weiterhin ist für die Erfassung raumbezogener Daten analog zum Verkehrsfluss die Verwendung von Kameras für Filme oder Fotoserien prinzipiell möglich. Da Behälter dabei normalerweise kleinere räumliche Bereiche (z. B. Abschnitte von Produktionsstrecken, Lagerbereiche, Warenein- und -ausgänge) als ganze Straßenabschnitte durchlaufen, lassen sich die Daten womöglich auch visuell bzw. manuell erfassen. Auch der Einsatz von ‚floating containers‘ oder ‚floating boxes‘ wäre denkbar. Solche Behälter müssten dann mit Messgeräten (z. B. Kamera oder Abstandsmesser) ausgestattet sein oder, wie oben beschrieben, mit Tags versehen werden.

³⁶ Auf die Verwendung des Begriffs ‚Behälterflussdynamik‘ wird hier allerdings verzichtet, da dieser nicht in der Literatur zu finden ist.

Wie bei den Verkehrsflussdaten hängt auch bei Behälterflussdaten die Wahl der Erfassungsmethode nicht nur von den technischen Möglichkeiten, sondern vor allem von den interessierenden Größen ab, die nachfolgend beschrieben werden.

Behälterfluss im engeren Sinn (Durchsatz)

Parallel zum Verkehrsfluss im engeren Sinn kann der Behälterfluss im engeren Sinn als zeitbezogene Größe Q^B ausgedrückt werden:³⁷

$$Q^B(x, t) = \frac{N^B}{\Delta t} \quad (10).$$

N^B bezeichnet die Anzahl der Behälter, die einen festen Ort x in einem Zeitintervall Δt passieren. Dies entspricht der aus der Produktionslogistik bekannten Messgröße Durchsatz und kann in Behältern (B) pro Zeiteinheit gemessen werden. Im Gegensatz zum Verkehr, der üblicherweise in Fz/h oder Fz/min angegeben wird, kann beim Behälterfluss abhängig vom betrachteten System auch ein tages-, wochen- oder monatsweiser Bezug wichtig sein, z. B. wenn ein Getränkeeeinzelhändler seinen Durchsatz an Flaschen oder Kästen pro Woche angibt.

Geschwindigkeit

Zwar ist es prinzipiell auch für Behälter möglich, eine (makroskopische) Geschwindigkeit als arithmetisches Mittel der mikroskopischen Geschwindigkeiten der einzelnen Behälter zu ermitteln. Allerdings leitet sich aus der fehlenden Individualitätseigenschaft die Frage ab, ob Behälter eine eigene mikroskopische Geschwindigkeit besitzen. Hierzu müssten die Behälter sich selbst bewegen können, also über einen eigenen Antrieb verfügen oder von außen angetrieben werden. Dies ist nur selten der Fall, bspw. wenn sie Rollen haben oder eine Rampe herunterrutschen. Vielmehr werden Behälter transportiert, was u. a. in größeren Behältern wie z. B. Rollcontainern, auf Fließbändern und vor allem zwischen Unternehmen sowie auf dem Weg zum Kunden mit Fahrzeugen geschieht. Dann entspricht die mikroskopische Geschwindigkeit eines Behälters der mikroskopischen Geschwindigkeit seines Transportmittels. Unter Berücksichtigung der Kopplung an Transportmittel kann die **zeitbezogene** makroskopische **Geschwindigkeit** für Behälter analog zu Formel (2) bestimmt werden.³⁸

$$V_t^B(x, t) = \overline{v_\beta} = \frac{1}{N^B} \sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_0+N^B-1} v_\beta \quad (11),$$

mit der zusätzlichen Gleichung

³⁷ Für Behälter wird nachfolgend das Hochzeichen B verwendet.

³⁸ Analog zu α für ein Fahrzeug steht β für einen Behälter.

$$v_\beta = \begin{cases} 0 & \text{falls } \beta \text{ gelagert wird} \\ v_\alpha & \text{falls } \beta \text{ von Fahrzeug } \alpha \text{ transportiert wird} \\ v_\beta & \text{falls } \beta \text{ sich selbst bewegt} \end{cases} \quad (12)$$

für die mikroskopische Geschwindigkeit. Die Gleichungen berücksichtigen dabei explizit auch den Fall, dass die Behälter (zwischen-)gelagert werden und ihre Geschwindigkeit entsprechend Null beträgt. Die zeitbezogene Geschwindigkeit gibt an, wie schnell sich die Behälter im Durchschnitt (über die Zeit) an einer bestimmten Stelle bewegen.³⁹

Die **raumbezogene** makroskopische **Geschwindigkeit** für Behälter ist das arithmetische Mittel der mikroskopischen Geschwindigkeiten der einzelnen Behälter zu einem Zeitpunkt in einem räumlichen Bereich. Dieser Bereich kann beliebige Ausmaße annehmen, z. B. einen Lagerabschnitt oder eine Produktionslinie, ein gesamtes Unternehmen oder einen Abschnitt der Supply Chain. Falls die Geschwindigkeiten der einzelnen Behälter v_β im betrachteten Raum erfassbar sind, lässt sich die raumbezogene Geschwindigkeit analog zur Formel (4) unter Einbezug der Formel (12) bestimmen:

$$V_s^B(t) = \frac{1}{N^B(t)} \sum_{\beta=1}^{N^B(t)} v_\beta(t) \quad (13).$$

Falls die Einzelgeschwindigkeiten im Raum nicht ermittelt werden können, kann wie beim Verkehrsfluss die Beziehung

$$V_s^B = V_t^B - \frac{\text{Var}_t^B(v)}{V_t^B} \quad (14)$$

analog zu Formel (5) zur Übertragung der zeitbezogenen in die raumbezogene Geschwindigkeit verwendet werden.⁴⁰

Werden die Geschwindigkeiten der Behälterflüsse verschiedener Tageszeiten oder Wochentage verglichen, kann für verschiedene Orte oder räumliche Bereiche der Supply Chain festgestellt werden, wo Leerzeiten bzw. Engpässe in einem bestimmten Zeitraum entstehen (vergleichsweise sehr hohe Geschwindigkeit bei wenig Daten), und zu welchen Zeiten an welchen Orten Behälter zwischengelagert werden müssen, weil sich in Stoßzeiten zu viele dort befinden (viele Daten mit vergleichsweise geringer Geschwindigkeit). Für eine derartige Steuerung des Behälterflusses ist die Geschwindigkeit allerdings weniger relevant als beim Verkehrsfluss.

³⁹ Da meist mehrere Behälter zusammen transportiert oder gelagert werden, haben sie dieselbe Geschwindigkeit und werden möglicherweise gleichzeitig oder kurz nacheinander am Messpunkt erfasst. Beim Verkehrsfluss hingegen begrenzt meist die Anzahl der Fahrstreifen deutlich stärker die Anzahl der Fahrzeuge, die gleichzeitig den Messpunkt (Detektor) passieren können.

⁴⁰ Gleichmaßen gilt auch die entgegengesetzte Übertragung gemäß Formel (6) und die Berechnung der Geschwindigkeitsvarianzen nach Formel (3).

Reisezeit (Durchlaufzeit)

Wie erläutert, spielt die konkrete (makroskopische) Geschwindigkeit der Behälter an einem Ort oder zu einem Zeitpunkt – im Gegensatz zum Verkehrsfluss – eine untergeordnete Rolle. Vielmehr gilt das Interesse eines Unternehmens der Zeit, die die Behälter benötigen, um von einer Stelle der Supply Chain zu einer anderen bewegt zu werden. Es interessiert also weniger der in einer kurzen Zeitdauer zurückgelegte ‚Weg pro Zeiteinheit‘, sondern es wird die benötigte Zeit für einen bestimmten Weg gesucht. Diese sei als **Reisezeit** T_{xy}^B vom Ortspunkt x zum Ortspunkt y bezeichnet.

Im Gegensatz zum Verkehr, wo die Reisezeit eher mikroskopisch bedeutsam ist,⁴¹ soll sie für Behälter wie alle anderen Messgrößen aus makroskopischer Sichtweise betrachtet werden. Demgemäß ergibt sich die **makroskopische Reisezeit** als mittlere Dauer der Überwindung eines bestimmten Raumes (Ortsabschnitts) durch die Behälter, inklusive aller Aktivitäten, die in diesem Raum stattfinden:

$$T_{xy}^B = \bar{r}_\beta = \frac{1}{N^B} \sum_{\beta=\beta_0}^{\beta_0+N^B-1} r_\beta \quad (15).$$

Dabei werden in die Reisezeit nicht nur Transportzeiten, sondern u. a. auch Lagerzeiten, Umladezeiten sowie Zeiten für das Befüllen und Entleeren der Behälter einbezogen, was dem verkehrswissenschaftlichen Konzept der komplexen Reisezeit nahe kommt.⁴² r_β wird als komplexe Reisezeit eines einzelnen Behälters von x nach y erfasst.⁴³ Sie kann in Zeiteinheiten wie z. B. Minuten (*min*), Stunden (*h*) oder Tagen (*d*) angegeben werden.

Wie bei der raumbezogenen Geschwindigkeit ergibt sich bei der Reisezeit der räumliche Bereich (Ortsabschnitt) Δx durch die Festlegung von x und y als Anfangs- und Endpunkte. Die Auswahl der Behälter, für die die mikroskopische Reisezeit gemessen wird, erfolgt entweder, indem eine Anzahl N^B direkt festgelegt wird oder indem wie bei der zeitbezogenen Geschwindigkeit ein Zeitraum (Zeitabschnitt) Δt bestimmt wird, in dem alle Behälter erfasst werden, die innerhalb dieses Zeitabschnitts den Ortsabschnitt Δx durchlaufen. Im Vergleich zu den makroskopischen Geschwindigkeiten, die jeweils für einen Punkt und einen Abschnitt erfasst werden, werden also für die Reisezeit zwei Abschnitte determiniert, die durch je zwei Punkte (Start- und Endpunkt) begrenzt sind. Dieser Unterschied wird in Tabelle 1 verdeutlicht.

⁴¹ Die makroskopische Reisezeit im Verkehr wäre die mittlere Dauer der Durchfahrt eines Streckenabschnitts.

⁴² Vgl. Kummer 2010, S. 55 und S. 363. Der Begriff Reisezeit wird üblicherweise nur für den Personenverkehr verwendet, soll hier aber auf Behälter übertragen werden, da es sich, wie erläutert, nicht um eine reine Transportzeit handelt.

⁴³ r_β ergibt sich aus der Differenz der Zeitpunkte, zu denen x und y von β passiert werden.

Da für die Bestimmung der Reisezeit Orts- und Zeitabschnitte benötigt werden, liegt es nahe, sie als *raumzeitbezogene Größe* zu bezeichnen. Für die Erfassung der Reisezeiten der einzelnen Behälter können ähnliche Methoden genutzt werden wie für die Aufnahme von zeit- und raumbezogenen Daten. Es müssen für jeden Behälter, der im Zeitraum Δt den räumlichen Bereich Δx durchquert, die Zeitpunkte erfasst werden, an denen er die Punkte x und y passiert. Dies kann, wie dargelegt, z. B. durch Tags, Kameras oder auch durch eine Stoppuhr erfolgen.

Tabelle 1: Determinanten für die Bestimmung der makroskopischen Geschwindigkeiten und der Reisezeit

Größe wird mittels Determinante ermittelt (✓: ja / –: nein)	Ortspunkt x	Ortsabschnitt Δx	Zeitpunkt t	Zeitabschnitt Δt
Zeitbezogene Geschwindigkeit V_t^B	✓	–	–	✓
Raumbezogene Geschwindigkeit V_s^B	–	✓	✓	–
Reisezeit T_{xy}^B	–	✓	–	✓

Durch Reisezeiten verschiedener Abschnitte der Supply Chain kann z. B. bestimmt werden, wie lange eine Lieferung vom Produzenten zum Handel durchschnittlich dauert oder wie lange die Behälter die (Produktions-)Prozesse eines Unternehmens durchlaufen (mittlere Durchlaufzeit). Dadurch lassen sich vergleichende Aussagen treffen, wenn verschiedene Zeiträume und räumliche Bereiche betrachtet werden, bspw. zu welcher Jahreszeit Behälter durchschnittlich länger oder für welchen Abschnitt der Supply Chain die Behälter die meiste Zeit benötigen. Die makroskopische Reisezeit ist demzufolge von großer Bedeutung für den Behälterfluss, da sie die geringe Aussagekraft der makroskopischen Geschwindigkeiten kompensiert und die raumzeitliche Bewegung der Behälter im Behälterfluss besser beschreibt. Für die Charakterisierung des Verkehrsflusses sind hingegen die makroskopischen Geschwindigkeiten wesentlich, die zudem Folgerungen auf die mikroskopischen Reisezeiten der einzelnen Fahrzeuge zulassen.⁴⁴

⁴⁴ Vgl. Treiber/Kesting 2010, S. 267–274, zur ausführlichen Darstellung verschiedener Methoden zur Schätzung der Reisezeiten im Verkehr.

Die Behälterdichte

Auch die Dichte des Behälterflusses kann analog zur Verkehrsdichte zeit- und raumbezogen ermittelt werden. Aufgrund der in Abschnitt 2.2 geschilderten Probleme bei der Ermittlung der zeitbezogenen Dichte und weil für Behälter der Raum (z. B. im Sinn von Lagerraum oder Verkaufsfläche) eine noch größere Rolle spielt als bei der Verkehrsdichte, wird nachfolgend in Bezug auf Behälter ausschließlich auf die raumbezogene Dichte eingegangen.⁴⁵ Wie beim Verkehrsfluss kann die raumbezogene Dichte mit der ‚hydrodynamischen Formel‘ (Formel (9)) bestimmt werden:

$$\rho^B(x, t) = \frac{Q^B(x, t)}{V_s^B(x, t)} \quad (16).$$

Diese Formel ist für die raumbezogene Dichte jedoch ebenfalls nur korrekt, wenn die raumbezogene makroskopische Geschwindigkeit der Behälter verwendet wird.

Anders als bei der raumbezogenen Verkehrsdichte kommt der raumbezogenen Behälterdichte pro Weeinheit (z. B. B/m oder B/km) nur in Ausnahmefällen eine Bewandnis zu, z. B. wenn die Behälter auf einem Fließband hintereinander stehen.⁴⁶ Stärker als die Dichte des Flusses interessiert, wie dicht die Behälter in einem Bereich ‚stehen‘. Wenn die Abmessungen der Behälter und des untersuchten Bereichs bekannt sind, kann eine (mittlere) maximale Dichte berechnet und anhand der tatsächlichen räumlichen Beanspruchung die Kapazitätsauslastung (z. B. eines LKW oder Lagers) bestimmt werden.⁴⁷

Bezüglich des Behälterflusses werden in der Supply Chain jedoch gemeinhin nicht in Weeinheiten gemessene Distanzen betrachtet, da die konkreten räumlichen Entfernungen der Behälter zueinander wenig bedeutend sind. In Abhängigkeit vom betrachteten Bereich interessiert i. d. R. nicht die Dichte in Bezug auf Raummaße, sondern vielmehr, wie viele Behälter momentan auf diesem Abschnitt (z. B. dem Distributionsweg zwischen produzierendem Unternehmen und Handel) fließen. Statt die Dichte gemäß Formel (16) zu berechnen, sollten die Behälter in diesem Bereich der Supply Chain automatisch oder manuell gezählt und die Dichte dann als Wert ρ_{xy}^B angegeben werden. x und y begrenzen hierbei den Bereich bzw. Abschnitt der Supply Chain, für den die Anzahl der Behälter erfasst wird.

⁴⁵ Damit verliert auch der Belegungsgrad an Bedeutung, da die stationäre Messung analog zum Detektor auf der Straße hier nicht berücksichtigt wird.

⁴⁶ Meist befinden sich Behälter auf einer Fläche, oft sind sie sogar in mehreren Lagen im Raum gestapelt wie z. B. im Lager oder auf einem LKW. Dies erfordert eine zweite und dritte räumliche Dimension zur Angabe der Dichte (z. B. pro m^2 oder m^3).

⁴⁷ Sind alle betrachteten Behälter gleich groß oder werden durchschnittliche Maße angenommen, ergibt sich die maximale Dichte als das Reziproke der Behältermaße. Je nach Dimension ist die maximale Dichte (im Verkehr auch ‚Stoßstangendichte‘) das Reziproke von z. B. der Grundfläche oder des Volumens eines Behälters. Hat ein Behälter bspw. ein Volumen von $0,5m^3$, ergibt sich eine maximale Dichte von zwei Behältern pro m^3 . Die Behältermaße könnten dabei Mindestabstände o. ä. enthalten.

Vergleich der Messgrößen des Verkehrs- und Behälterflusses

In Tabelle 2 sind die Ähnlichkeiten und Unterschiede der Größen im Verkehrs- und Behälterfluss abschließend gegenübergestellt. Dabei wird zwischen makroskopischen und mikroskopischen Größen, die zur Bestimmung der makroskopischen Größen benötigt werden, unterschieden. Größen, die für die Betrachtung des jeweiligen Flusses weniger relevant sind, sind kursiv geschrieben. Demzufolge sind die wesentlichen Größen des Verkehrsflusses (i. w. S.) der Verkehrsfluss im engeren Sinn, die makroskopische Geschwindigkeit, die mikroskopische Reisezeit und die Dichte. Für die Charakterisierung des Behälterflusses (i. w. S.) sind vor allem der Behälterfluss im engeren Sinn, die makroskopische Reisezeit und teilweise die Dichte von Relevanz.

Tabelle 2: Größen des Verkehrs- und Behälterflusses im Vergleich

Größe	Ebene	Verkehrsfluss	Behälterfluss
Fluss	makroskopisch	Anzahl Fahrzeuge pro Zeit an best. Ortspunkt	Anzahl Behälter pro Zeit an best. Ortspunkt
Geschwindigkeit	mikroskopisch	<i>Geschwindigkeit eines Fahrzeugs</i>	<i>Geschwindigkeit eines Behälters</i>
	makroskopisch	Mittlere Geschwindigkeit der Fahrzeuge	<i>Mittlere Geschwindigkeit der Behälter</i>
Reisezeit	mikroskopisch	Dauer der Durchfahrt eines Streckenabschnitts für ein Fahrzeug	<i>Dauer des Durchlaufs eines Bereiches der Supply Chain für einen Behälter</i>
	makroskopisch	<i>Mittlere Dauer der Durchfahrt eines Streckenabschnitts</i>	Mittlere Dauer des Durchlaufs eines Bereiches der Supply Chain
Dichte	makroskopisch	Anzahl Fahrzeuge pro Straßenabschnitt zu best. Zeitpunkt	<i>Anzahl Behälter pro Strecke/Fläche zu best. Zeitpunkt</i>
			Anzahl Behälter pro Bereich der Supply Chain zu best. Zeitpunkt

4 Kreislaufmodelle für Mehrwegbehälterflüsse

4.1 Kreislaufsysteme für Mehrwegbehälter und Fahrzeuge

Wie in Abschnitt 3.1 beschrieben, werden Behälterflüsse meist im Zusammenhang mit Behälterkreisläufen betrachtet.⁴⁸ Für den Verkehrsfluss wird in der Literatur hingegen selten ein Bezug zu Kreisläufen hergestellt.⁴⁹ Deshalb gehen die hier angestellten Analogieüberlegungen zu Kreislaufsystemen zunächst – entgegengesetzt zu Kapitel 3 – von den Mehrwegbehältern aus und prüfen die Übertragbarkeit auf Verkehrskreisläufe.

Für Konsumgüterverpackungen stellt SOUREN ein allgemeines Kreislaufmodell vor, bei dem der Kreislauf in einen Hin- und einen Rückweg unterteilt wird. Während der Hinweg für alle Verpackungstypen gleich ist, verläuft der Rückweg für Einweg- und Mehrwegverpackungen unterschiedlich.⁵⁰ Die Besonderheit der Mehrwegverpackungen bzw. -behälter ist, dass sie – im Gegensatz zu Einwegbehältern – ihren Objektcharakter behalten, solange sie sich im Kreislauf befinden.⁵¹ Sie durchlaufen den Kreislauf üblicherweise mehrmals, wobei sie auf dem Rückweg nur leicht verändert (z. B. gereinigt) werden. Dabei ist jeder Mehrwegbehälter auch auf dem Rückweg des Kreislaufs einzeln identifizierbar (Objektbezogenheit) und kann somit mikroskopisch betrachtet werden.

Auch im Verkehrsfluss ist eine derartige Objektbezogenheit gegeben. Die Fahrzeuge verändern ihre Eigenschaften zudem ebenfalls kaum, während sie im Verkehr unterwegs sind. Ausnahmen sind analog zu den Mehrwegbehältern Reparaturen und die Reinigung der Fahrzeuge. Die Fahrzeuge dienen – normalerweise viele tausend Male – zur Beförderung oder zum Transport, sind als ‚Personen-Behälter‘ immer mit mindestens einer Person besetzt und können weitere Personen und/oder Güter aufnehmen.

Strukturmodelle

Der Mehrwegbehälterkreislauf ist ein logistisches System, das sich aus mehreren logistischen Subsystemen (Akteuren und Prozessen) zusammensetzt, die zueinander in Beziehung stehen. Die allgemeine Struktur eines logistischen Systems bzw. Netzwerks lässt sich modellhaft vereinfacht darstellen: Es besteht aus hintereinander liegenden Knoten, die hier als Stationen bezeichnet werden sollen, und aus Kanten bzw. Transportwegen, die die Stationen verbinden.⁵² Ein Kreislauf kann in diesem Zusammenhang als spezielle Netzwerkform betrachtet werden, bei der die letzte Station jeweils mit der ersten ver-

⁴⁸ Vgl. z. B. Hofmann/Bachmann 2006b; Souren 2012.

⁴⁹ Alle Ausführungen in Kapitel 2 beziehen sich auf den Verkehrsfluss allgemein (vgl. z. B. Helbing 1997b; Hall 2001; Treiber/Kesting 2010).

⁵⁰ Vgl. Souren 2002, S. 63.

⁵¹ Vgl. Souren 2002, S. 56–57, 176ff. Einwegverpackungen werden am Ende des Hinwegs wieder- oder weiterverwertet und verlieren somit ihre ursprünglichen Objekteigenschaften. Im Kreislauf fließt dann nur das Verpackungsmaterial zurück.

⁵² Vgl. u. a. Ballou 2004, S. 41f.; Fleischmann 2008, S. 3. Fleischmann nennt als Beispiele für Knoten und Kanten Lagerorte und Transportwege.

bunden und somit der Kreis geschlossen ist.⁵³ Die geometrische Form des Kreises besteht allerdings in der Realität nur selten, stattdessen nimmt das Kreislaufgebilde unterschiedliche Gestalten (wie z. B. Vielecke oder Schlingen) an.

Ein weiteres Kennzeichen des Behälterkreislaufs ist die Richtungsgebundenheit der Behälterbewegung. Dies wird durch die gerichteten Kanten dargestellt. Alle Bewegungen des betrachteten Behälterflusses müssen dieselbe Richtung haben, da sonst die makroskopische Sichtweise nicht angewendet werden kann. Außerdem ist nur so für die Behälter ein Durchlauf des gesamten Kreislaufs möglich. Falls ein Pendeln oder eine Rückwärtsbewegung zwischen Stationen ermöglicht werden soll, muss dies mit einer zusätzlichen entgegen gerichteten Kante modelliert werden, deren Behälterfluss gesondert betrachtet wird. Letzteres soll aus Vereinfachungsgründen hier zunächst keine Rolle spielen.

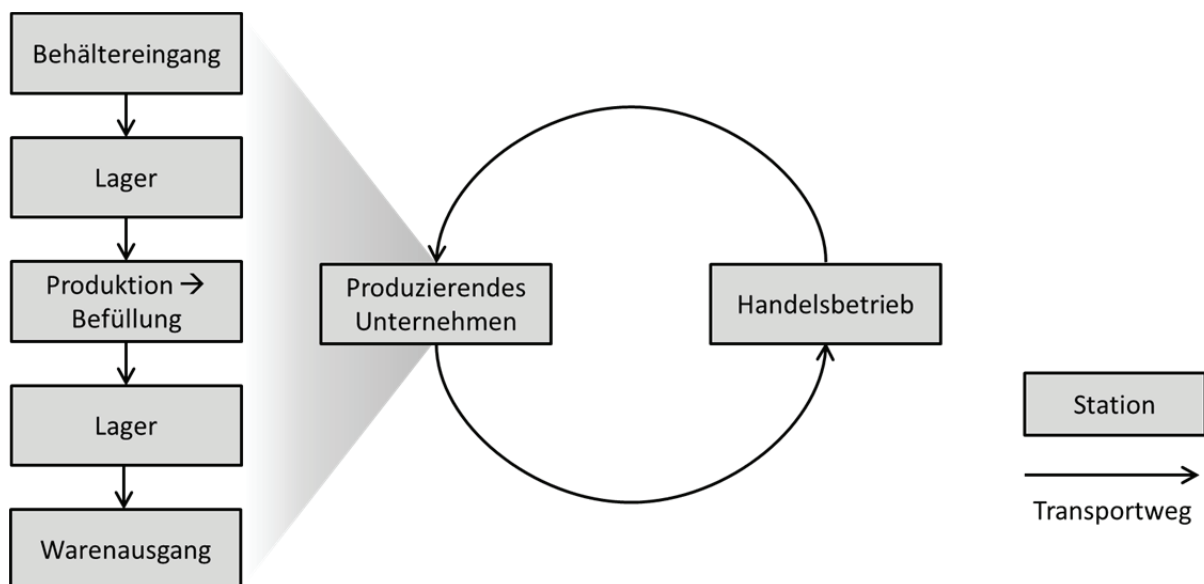


Abbildung 1: Beispiel für Stationen eines Mehrwegbehälterkreislaufs

Abhängig vom Fokus der Betrachtung kann ein Kreislauf grob bis sehr feingliedrig strukturiert werden. Eine Station kann deshalb ein großes Spektrum von Kreislaufbestandteilen, angefangen von einzelnen Produktionsschritten bis hin zum gesamten Unternehmen, abbilden. Dies ist anhand des Beispiels in Abbildung 1 verdeutlicht: Der einfache Kreislauf besteht aus zwei Stationen und zwei Transportwegen; von einem produzierenden Unternehmen werden Produkte in Mehrwegbehältern zu einem Handelsbetrieb geliefert und die Behälter dann wieder zum Unternehmen zurücktransportiert. Aus Sicht des produzierenden Unternehmens sind seine eigenen Prozesse im Rahmen des Kreislaufs von besonderem Interesse. Deshalb kann es für das Unternehmen zweckmäßig sein, die Station ‚Produzierendes Unternehmen‘ in mehrere Teilstationen zu zerlegen (vgl. Abbildung 1), innerhalb derer die Behälter befüllt, entleert, gelagert oder transpor-

⁵³ Theoretisch existieren in Kreisläufen kein Anfang und kein Ende. Oft wird jedoch ein Knoten zuerst betrachtet, wie z. B. in Behälterkreisläufen der Knoten der Abfüllung.

tiert werden. Für den Produzenten kann es dann sogar sinnvoll sein, die Teilstationen als separate Stationen des (Gesamt-)Kreislaufs zu betrachten. Aus der Perspektive des Handelsbetriebs reicht es dagegen zumeist aus, weiterhin von einem zweistufigen Kreislauf auszugehen und, wenn überhaupt, höchstens die nach außen gerichteten Teilstationen Behältereingang und Warenausgang als Untersysteme der Stufe ‚Produzierendes Unternehmen‘ zu behandeln.

Analoge Verkehrskreisläufe

Als ein Analogiegegenstand zu Behälterkreisläufen kann das anschauliche Beispiel eines Verkehrskreislaufsystems dienen, bei dem Busse im Linienverkehr (mit Abfahrt aus dem Depot, Anfahrt verschiedener Haltestellen und Rückfahrt ins Depot) verkehren.⁵⁴ Auch im Individualverkehr bewegen sich Fahrzeuge oft in Kreisläufen, bei denen der Fahrer die angefahrenen Stationen und die Fahrten dazwischen bestimmt (z. B. Wohnung – Arbeitsstätte – Einkaufsmarkt – Wohnung). Sowohl im Linienverkehr als auch im Individualverkehr sind diese Kreisläufe durch Knoten (Stationen) und Kanten (Fahrten, die die Stationen verbinden) darstellbar.

Die geschilderten Kreisläufe entsprechen jedoch nicht der makroskopischen Sichtweise des Verkehrsflusses, da sie einzelne Fahrzeuge fokussieren. Ein Kreislaufsystem im Straßenverkehr, das makroskopische Analysen ermöglicht und daher für Analogiebetrachtungen besser geeignet erscheint, ist der Kreisverkehr.⁵⁵ Die Kreisstruktur existiert hier im Gegensatz zu Buslinien und zyklischen Privatfahrten physisch. Über Ein- und Ausfahrten erfolgt der Zufluss der Fahrzeuge zum bzw. der Abfluss aus dem Kreis. Die Ein- und Ausfahrten können paarweise zu Stationen zusammengefasst werden und, ähnlich wie die verschiedenen Untersysteme des ‚Produzierenden Unternehmens‘, Teilstationen des Systems bilden. Die Fahrzeuge treten an einer (Teil-)Station (einem Knoten) in den Kreis ein und bewegen sich wie im Behälterkreislauf richtungsgebunden entlang der Straße (der Kante) von Knoten zu Knoten, bis sie den Kreis an einem Knoten wieder verlassen. Durch die gemeinsame Bewegung aller Fahrzeuge im Kreis entsteht dann der Verkehrsfluss im Kreisverkehr.⁵⁶ Dieser ist bereits als Forschungsgegenstand der Verkehrsflussdynamik behandelt worden. So sind in der Literatur neben den zahlreichen Modellen für den Verkehrsfluss allgemein auch spezielle Modelle für Kreisverkehre und Ringstraßen vorhanden.⁵⁷ Ähnlich wie die Messgrößen in den Kapiteln 2 und 3 können diese Verkehrsflussmodelle aufgrund der Parallelen zwischen Fahrzeugen und Behältern – vermutlich mit nur wenigen Modifikationen – auf Flüsse in Behälterkreisläufen übertragen werden.

⁵⁴ Vgl. z. B. Gintner 2008, S. 11.

⁵⁵ Vgl. zur Definition des Kreisverkehrs z. B. Sadjadi/Fouladvand/Shaebani 2004, S. 046132-1.

⁵⁶ Als sehr großer Kreisverkehr kann auch eine Ringstraße betrachtet werden. Hier gibt es meist mehrere Fahrstreifen, z. T. für entgegengesetzte Richtungen. Es sind auch einzelne Ein- und Ausfahrten in den Knoten möglich, z. B. wenn Einbahnstraßen in die Ringstraße münden oder von ihr abzweigen.

⁵⁷ Vgl. z. B. Ruskin/Wang 2002; Sadjadi/Fouladvand/Shaebani 2004.

Ringstraßenmodelle in der Verkehrsflussdynamik

Aus Einfachheitsgründen werden für die Erforschung komplexer Phänomene im Verkehrsfluss teilweise geschlossene Ringstraßenmodelle ohne Ein- und Ausfahrten verwendet, wie sie in der Realität nur bei Autorennbahnen vorzufinden sind.⁵⁸ Abbildung 2 zeigt ein entsprechendes Simulationsmodell.⁵⁹

Für die Darstellung eines Kreisverkehrs oder einer Ringstraße mit Einmündungen und Abzweigungen müssen entsprechende Ein- und Ausfahrten, respektive Zu- und Abflüsse, modelliert werden. Hierzu wird der einfache Ring in Abbildung 3 exemplarisch mit je vier Ein- und Ausfahrten zu einem Kreisverkehr erweitert. Die Pfeile in der Abbildung stellen die Fließrichtung des Verkehrs dar.

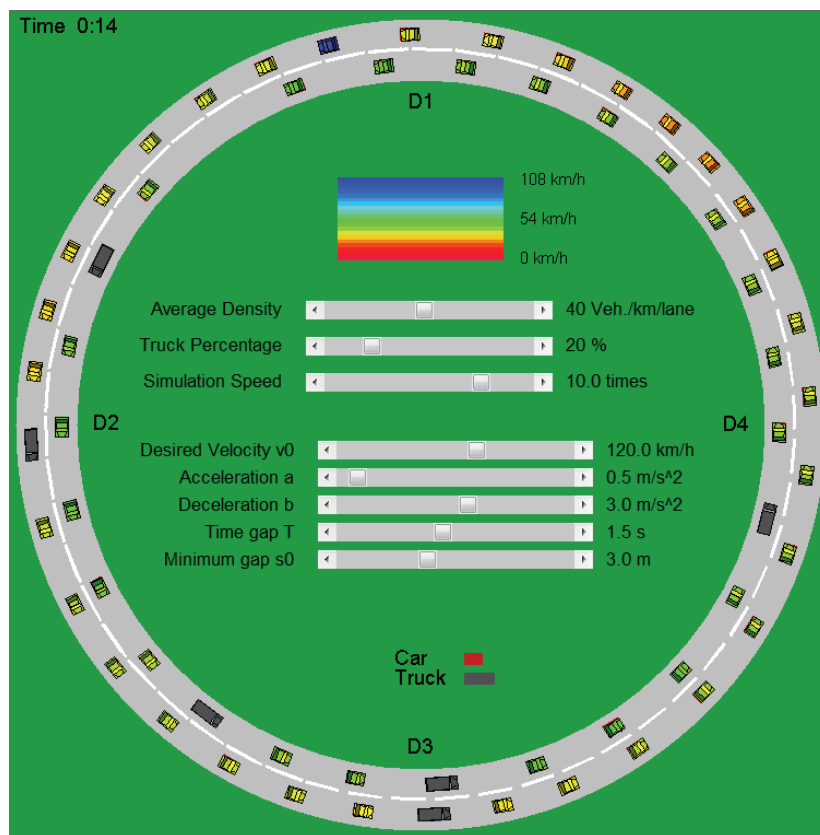


Abbildung 2: Simulation des Verkehrsflusses in einem geschlossenen Kreislauf („Ring Road“) (TREIBER 2011).

⁵⁸ Vgl. Helbing 1997b, S. 149f.; Treiber/Kesting 2010, S. 237.

⁵⁹ Auf www.traffic-simulation.de werden Simulationen für verschiedene Straßenlayouts demonstriert. Es handelt sich hier um Mikrosimulationen (d. h. das Verhalten jedes einzelne Fahrzeug wird mikroskopisch simuliert), die für viele Fahrzeuge zusammen das makroskopische Verhalten des Verkehrs abbilden. Vom Betrachter lassen sich wesentliche Stellgrößen wie z. B. die mittlere Dichte oder die Wunschgeschwindigkeit mit Reglern verändern, um zu sehen, wie der Verkehrsfluss darauf reagiert.

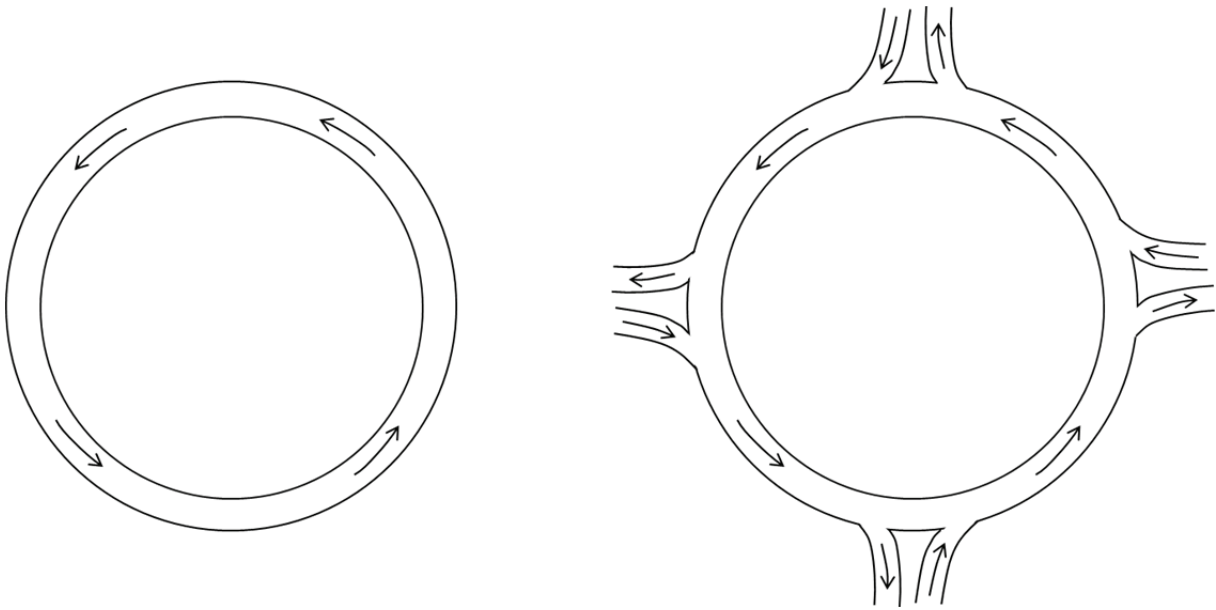


Abbildung 3: Modellhafte Struktur einer geschlossenen Ringstraße und eines Kreisverkehrs mit vier gepaarten Ein- und Ausfahrten

4.2 Ein Kreisverkehr-Modell für den Mehrwegbehälterfluss

Um aus Verkehrsflussmodellen von Kreisverkehren Erkenntnisse für den Mehrwegbehälterkreislauf übertragen zu können, wird abschließend ein modifiziertes Strukturmodell entwickelt. Der in Abbildung 3 dargestellte Kreisverkehr kann die Struktur eines Behälterkreislaufs noch nicht komplett abbilden, da er keine ‚Aufenthaltsorte‘ für die Fahrzeuge enthält und somit die Lagerung von Behältern nicht abgebildet werden kann.

Für die Modellierung des Behälterflusses in einem Kreislauf werden deshalb neben den Transportwegen in Gestalt des Kreises sowie den Zu- und Abflüssen auch ‚Aufenthaltsorte‘ an den Stationen benötigt. Ein entsprechendes Strukturmodell, in dem exemplarisch vier Stationen mit Aufenthaltsort (Schleife) und Zu- und Abflusswegen eingefügt sind, ist in Abbildung 4 dargestellt. Bei den Schleifen kann es sich bspw. um die Lagerung leerer oder voller Behälter oder das Befüllen im Rahmen eines Produktionsablaufs handeln. Während des Durchlaufens einer Schleife finden die mit den Behältern zusammenhängenden Aktivitäten (z. B. Befüllen, Leeren, Lagern) dieser Station statt. Eine Station besteht demzufolge grafisch aus einer Schleife am Kreis sowie den Wegen für Zu- und Abflüsse (vgl. nochmals Abbildung 1, in der das ‚Produzierende Unternehmen‘ auf ähnliche Weise durch mehrere Teilstationen spezifiziert wurde).

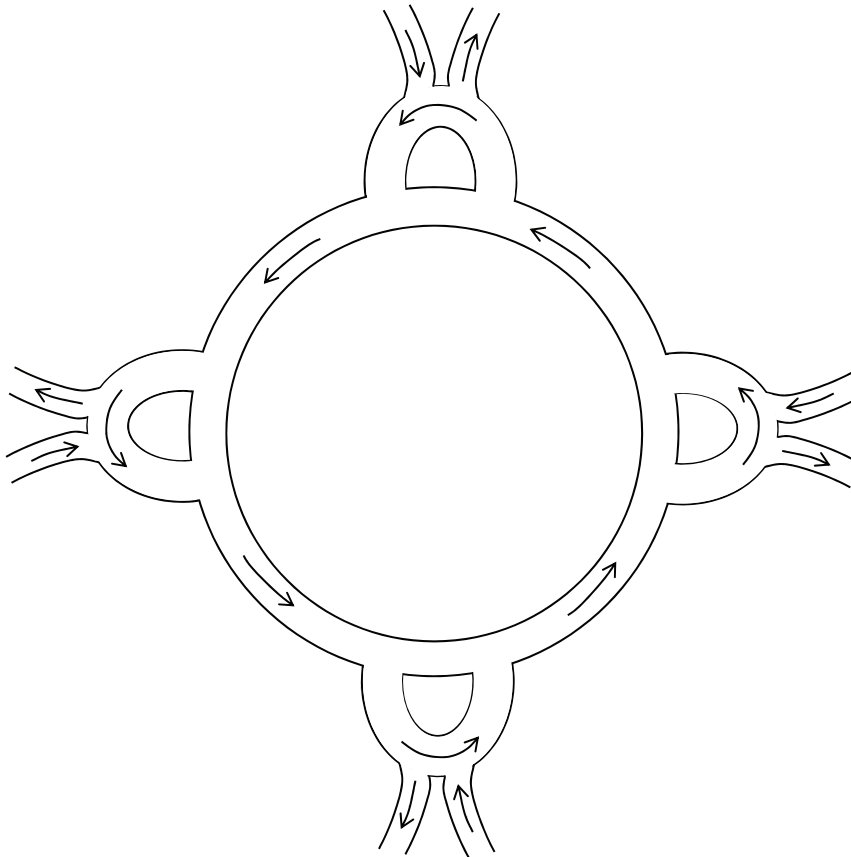


Abbildung 4: Strukturmodell für den Behälterfluss basierend auf einem Kreisverkehr, exemplarisch mit vier Stationen inklusive Zu- und Abflüssen

Die Pfeile zeigen jeweils die Fließrichtung der Behälter an. Mittels des durchgängigen Kreises im Kreisverkehr wird zusätzlich ermöglicht, dass die Behälter sich auch an einer Station vorbeibewegen, wenn sie diese nicht durchlaufen müssen, weil dort bspw. schon genügend Behälter vorhanden sind oder weil für einen Teil der Behälter statt der Lieferung an einen Zwischenhändler eine Direktlieferung an den Endkunden erfolgt.

Sowohl bei der Bewegung entlang der Transportwege als auch beim Aufenthalt in den Stationen befinden sich die Behälter innerhalb des Kreislaufs. Zu- und Abflüsse ermöglichen das Eintreten neuer Behälter in den Kreislauf sowie das Ausscheiden von Behältern, z. B. wenn Behälter kaputt sind, entsorgt werden müssen und durch neue ersetzt werden. In dem hier vorgestellten Strukturmodell wird davon ausgegangen, dass (wie im Kreisverkehr) an allen Stationen Zu- und Abflüsse existieren. Das muss in der Realität nicht zwingend der Fall sein, da insbesondere der Zufluss oft nur durch einzelne Unternehmen geregelt wird.⁶⁰ Dies kann im Modell jedoch einfach durch einen Zufluss von Null an den anderen Stationen dargestellt werden.

⁶⁰ Ein Beispiel hierfür ist der Kreislauf von spezifischen Mehrwegflaschen eines Getränkeherstellers. Die Zuflüsse der eigenen Flaschen steuert das Unternehmen selbst. Zuflüsse an den anderen Stationen (z. B. Einzelhandel oder Konsumenten) sind allenfalls durch Rückgabe von Fremdfflaschen möglich. Abflüsse durch die Entsorgung von Flaschen sind hingegen an allen Stationen wahrscheinlich.

Der Mehrwegbehälterfluss kann durch die in Abschnitt 3.2 präsentierten Messgrößen charakterisiert werden. Da diese nicht auf ein bestimmtes Layout, in dem der Behälterfluss stattfindet, festgelegt sind, müssen grundsätzlich keine kreislaufbezogenen Anpassungen vorgenommen werden; es können jedoch spezifische Messgrößen für Kreisläufe ergänzt werden. Für die Bestimmung der zeitbezogenen Größen können Daten für Zeiträume an allen Stellen des Kreislaufs erfasst werden. Die raumbezogenen Daten bzw. Größen lassen sich zu festen Zeitpunkten für Teile des Behälterkreislaufs oder den gesamten Kreislauf ermitteln. So lässt sich z. B. die raumzeitbezogene Reisezeit, also die mittlere Dauer der Überwindung eines Teils des Kreislaufs in einem Zeitraum, bestimmen. Wird diese für einen Durchlauf des ganzen Kreislaufs bestimmt, handelt es sich um die **mittlere Umlaufzeit** bzw. **Umlaufdauer** TIS (Time in Supply) der Behälter.⁶¹ Sie kann prinzipiell an jeder Stelle des Behälterkreislaufs gemessen werden, da es theoretisch weder Start noch Ende im Kreislauf gibt. In der Praxis wird häufig die Abfüllung oder die Rückgabe der Behälter als Referenzpunkt gewählt.

Weitere zur Beschreibung von Mehrwegbehälterkreisläufen wesentliche Größen sind die Umlaufzahl und die Umlaufquote. Diese spielten in den bisherigen Ausführungen keine Rolle, da die Betrachtung der Messgrößen in Kapitel 3 keinen Kreislaufbezug hatten und weil die wesentlichen makroskopischen Größen des Verkehrsflusses keine Pendant zu diesen Größen beinhalten. Die **Umlaufzahl** UZ gibt die Anzahl der Umläufe an, die ein Behälter durchschnittlich zwischen seinem Eintreten in den und Austreten aus dem Kreislauf zurücklegt.⁶² Auch wenn sie prinzipiell für einzelne Behälter bestimmt werden kann (mikroskopische Größe), ist die Umlaufzahl meist als makroskopische Größe aufzufassen, die aus einer großen Anzahl an Behältern ermittelt wird. Dabei ist normalerweise gewünscht, dass die Behälter möglichst lange Zeit im Kreislauf bleiben und möglichst viele Umläufe inklusive Stationen absolvieren. Dies steht im Gegensatz zum Kreisverkehr, dessen Verkehrsfluss durch die Zu- und Abflüsse von Fahrzeugen geprägt ist, die i. d. R. keine volle Runde fahren.

Eine andere wichtige Messgröße für Behälterkreisläufe ist die **Umlaufquote** Q_{UML} . Sie gibt den Anteil der betrachteten Behälter an, der einen Umlauf komplett absolviert.⁶³ Da die Umlaufquote für mehrere (meist viele) Behälter zusammen ermittelt wird, ist sie ebenfalls eine makroskopische Größe. Die Beziehung zwischen der Umlaufquote und der Umlaufzahl ergibt sich in dynamischen Modellen anhand einer unendlichen Reihe wie folgt:⁶⁴

$$UZ = 1 - \frac{1}{Q_{UML}} \quad (17).$$

⁶¹ Vgl. Souren 2012, S. 341.

⁶² Vgl. Huber 1990, S. 692; Souren 2002, S. 330.

⁶³ Vgl. Souren 2012, S. 341.

⁶⁴ Vgl. Huber 1990, S. 692; Souren 2002, S. 331f.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich der Mehrwegbehälterfluss im Kreislauf mit den makroskopischen Größen des Verkehrsflusses charakterisieren lässt, wobei die mittlere Umlaufdauer als Reisezeit eines kompletten Kreislaufs besonders wichtig ist. Zusätzlich sollten für Mehrwegbehälter die spezifischen Größen Umlaufzahl bzw. Umlaufquote hinzugezogen werden, um typische Eigenschaften solcher Kreisläufe zu berücksichtigen, die als Eigenschaften des Verkehrsflusses weniger brauchbar sind.

5 Resümee und Ausblick

Im vorliegenden Arbeitsbericht wurden Analogien zwischen dem Verkehrsfluss und dem Behälterfluss dargestellt. Dabei standen der Flusscharakter und die makroskopische Sichtweise, die üblicherweise bei der Betrachtung einer großen Anzahl sich bewegender Objekte relevant ist, im Vordergrund. Da der Behälterfluss in der logistischen Literatur bisher wenig thematisiert wird, wurden vor allem vom Verkehrsfluss auf der Straße Rückschlüsse auf den Behälterfluss in logistischen Systemen gezogen.

Dafür wurden in Kapitel 2 zunächst die Definition sowie grundlegende Eigenschaften des Verkehrsflusses als Elemente der Verkehrsdynamik erläutert. Es wurde speziell auf physikalische Größen eingegangen, die den Verkehrsfluss charakterisieren. Darauf aufbauend widmete sich Kapitel 3 dem Behälterfluss, für den zunächst eine Definition in Anlehnung an den Verkehrsfluss erstellt wurde. Anschließend wurden physikalische Größen zur Beschreibung des Behälterflusses vom Verkehrsfluss übertragen. Hierbei wurde diskutiert, welche Übertragungen sinnvoll erscheinen und ob Anpassungen oder Ergänzungen notwendig sind. Die Reisezeit erschien dabei für den Behälterfluss wichtiger als die Geschwindigkeit, die allenfalls in Verkehrsflussmodellen eine zentrale Rolle spielt.

Kapitel 4 widmete sich strukturellen Analogien zwischen Verkehrskreisläufen und Mehrwegbehälterkreisläufen. Ausgehend von Analogien zwischen Fahrzeugen und Behältern wurden Kreisläufe in logistischen Systemen und Verkehrssystemen aufgezeigt und modellhaft dargestellt. Schließlich wurde ein Strukturmodell für Behälterflüsse erarbeitet, das Kreislaufkonzepte aus beiden Systemen verbindet und somit die strukturellen Eigenschaften von Behälterkreisläufen und Kreisverkehren vereint. Die in Kapitel 3 hergestellten Analogien zu den Messgrößen ließen sich auf dieses Modell übertragen. Neben der Umlaufdauer, die der mittleren Reisezeit des gesamten Behälterkreislaufs entspricht, wurden weitere mehrwegbehälterspezifische Größen (Umlaufzahl und -quote) ergänzt.

Nachdem in diesem Arbeitsbericht prinzipielle Analogien (und Unterschiede) zwischen Verkehrsflüssen und Behälterflüssen herausgearbeitet wurden, sollte in Zukunft analysiert werden, welche konkreten makroskopischen Verkehrsmodelle als Ausgangspunkt für Behälterflussmodelle verwendet werden können. Dafür können die in der Literatur bereits existierenden Verkehrsflussmodelle für Kreisverkehre genutzt werden, indem entsprechende Anpassungen für den Behälterfluss im Rahmen des Strukturmodells vor-

genommen werden. Die modifizierten Modelle lassen sich als Grundlage für Simulationsmodelle verwenden, um das Verhalten von Behälterflüssen zu untersuchen und zu prognostizieren.

Literaturverzeichnis

- Ballou, R.: Business Logistics/Supply Chain Management, 5. Auflage, Upper Saddle River 2004.
- Duden online, <http://www.duden.de/rechtschreibung/Fluss>. Zuletzt geprüft am 05.08.2013.
- Fleischmann, B.: Begriffliche Grundlagen, in: Arnold, D./Isermann, H./Kuhn, A./Tempelmeier, H./Furmans, K. (Hrsg.): Handbuch Logistik, 3. Auflage, Berlin/Heidelberg 2008, S. 3–12.
- Gerlough, D. L./Huber, M. J.: Traffic Flow Theory – A Monograph, Washington D.C. 1975.
- Gintner, V.: Modelle und Lösungsverfahren für die integrierte Ressourceneinsatzplanung im öffentlichen Personennahverkehr (Diss.), 2008.
- Hall, F. L.: Traffic Stream Characteristics, in: Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (Hrsg.): Traffic Flow Theory – A State-of-the-Art Report, 2001, S. 2-1–2-31.
- Helbing, D.: Fundamentals of Traffic Flow, in: Physical Review E, 55, (3) 1997a, S. 3735–3738.
- Helbing, D.: Verkehrsdynamik – Neue physikalische Modellierungskonzepte, Berlin/Heidelberg 1997b.
- Hofmann, E./Bachmann, H.: Behälter-Management – Entwicklung eines Konzepts zur zielorientierten Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen, in: Wolf-Kluthausen, H. (Hrsg.): Jahrbuch Logistik 2006, Korschbroich 2006a, S. 166–169.
- Hofmann, E./Bachmann, H.: Behälter-Management in der Praxis – State-of-the-Art und Entwicklungstendenzen bei der Steuerung von Ladungsträgerkreisläufen, Hamburg 2006b.
- Huber, A./Laverentz, K.: Logistik, München 2012.
- Huber, A.: Zur Schätzung der Umlaufzahl von Mehrwegflaschen. In: DMZ – Lebensmittelindustrie und Milchwirtschaft, 111, (22) 1990, S. 692–698.
- Informationsportal für Behältermanagement: Behältermanagement.
http://www.behaeltermanagement.com/de/was_ist_behaeltermanagement.html. Zuletzt geprüft am 08.10.2012.
- Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik – Systemtechnische Grundlagen mit Praxisbeispielen, Berlin u. a. 1989.
- Kirchgässner, G.: Homo oeconomicus – Das ökonomische Modell individuellen Verhaltens und seine Anwendung in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, 3. Auflage, Tübingen 2008.

- Kummer, S.: Einführung in die Verkehrswirtschaft, 2. Auflage, Wien 2010.
- Lee, H. K./Lee, H.-W./Kim, D.: Macroscopic traffic models from microscopic car-following models, in: Physical Review E, 64, (5) 2001, S. 056126-1–056126-12.
- May, A. D.: Traffic Flow Fundamentals, Englewood Cliffs 1990.
- Pfohl, H.-C.: Marketing-Logistik – Gestaltung, Steuerung und Kontrolle des Warenflusses im modernen Markt, Mainz 1972.
- Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen, 8. Auflage, Berlin u. a. 2010.
- Raum, C. (2005): Behälter wechsele dich – Computer Reseller News.
<http://www.crn.de/panorama/artikel-19769.html>. Zuletzt geprüft am 09.10.2012.
- Rolle, R.: Homo oeconomicus – Wirtschaftsanthropologie in philosophischer Perspektive, Würzburg 2005.
- Ruskin, H. J./Wang, R.: Modeling traffic flow at a single-lane urban roundabout, in: Computer Physics Communications, 147, (1) 2002, S. 570–576.
- Sadjadi, Z./Fouladvand, M. E./Shaebani, M. R.: Characteristics of vehicular traffic flow at a roundabout, in: Physical Review E, 70, (4) 2004, S. 046132-1–046132-8.
- Seeck, S.: Erfolgsfaktor Logistik – Klassische Fehler erkennen und vermeiden, Wiesbaden 2010.
- Souren, R.: Konsumgüterverpackungen in der Kreislaufwirtschaft – Stoffströme, Transformationsprozesse, Transaktionsbeziehungen, Wiesbaden 2002.
- Souren, R.: Alles im Fluss? Ansatzpunkte eines nachhaltigen Kreislaufmanagements für Verkaufsverpackungen, in: Hahn, R./Janzen, H./Matten, D. (Hrsg.): Die gesellschaftliche Verantwortung des Unternehmens – Hintergründe, Schwerpunkte und Zukunftsperspektiven, Stuttgart 2012, S. 321–347.
- Treiber, M. (2011): Microsimulation of Road Traffic Flow. www.traffic-simulation.de.
Zuletzt geprüft am 14.03.2013.
- Treiber, M./Kesting, A.: Verkehrsdynamik und -simulation – Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik, Berlin/Heidelberg 2010.

Ilmenauer Schriften zur Betriebswirtschaftslehre

**Institut für Betriebswirtschaftslehre der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der
Technischen Universität Ilmenau**

www.tu-ilmenau.de/is-ww

Herausgeber

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Norbert Bach

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Gernot Brähler

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Anja Geigenmüller

Univ.-Prof. Dr. rer. pol. habil. Rainer Souren

ISSN 2192-4643

ISBN 978-3-940882-42-4

URN [urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013200206](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013200206)