

# Nachhaltige Optimierung der Distributionslogistik mittels Simulation in einer regionalen Brauerei

Liz Lucia Hofmeister  
Pierre Grzona  
Matthias Thüerer

Professur Fabrikplanung und Intralogistik, Fakultät Maschinenbau, TU Chemnitz, Chemnitz

**K**urzbeschreibung: Sowohl ökonomische als auch ökologische Nachhaltigkeit erfordern einen transparenten Blick auf die zu erwarteten als auch realisierten Emissionen, die während der unterschiedlichen Stufen im Wertschöpfungsprozess entstehen können. Die Distributionslogistik bietet hierfür noch entsprechendes Potenzial wie am Beispiel einer regionalen Brauerei gezeigt werden kann. Im Artikel wird dies anhand von 4 Maßnahmenpaketen mittels Simulationsstudien untersucht. Dabei werden die CO<sub>2</sub>e-Emissionen als Vergleichsgrößen genutzt.

[Simulation, Nachhaltigkeit, Letzte Meile]

## 1 EINLEITUNG

Die zunehmende Globalisierung und Digitalisierung der Wirtschaft haben bereits tiefgreifende Veränderungen in der Logistik und im Supply Chain Management bewirkt. Unternehmen stehen aber weiterhin vor der Herausforderung, ihre Lieferketten nicht nur effizient, sondern auch nachhaltig zu gestalten. (Bretzke 2014)

Dies betrifft insbesondere die Lebensmittel- und Getränkeindustrie, in der sowohl hohe Transportvolumina bestehen als auch die Notwendigkeit eines präzisen Bestandsmanagements, um die Produktqualität zu gewährleisten und Verschwendung von Ressourcen zu vermeiden. Gleichzeitig erfordert der steigende gesellschaftliche und politische Druck zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen eine Transformation logistischer Prozesse. (Hannen 2021)

Die Logistikbranche ist für einen signifikanten Anteil der globalen Treibhausgasemissionen verantwortlich. Trotz Reduktion der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen je km in der Zeit seit 1995 bis 2023 um 9,5% erhöhte sich im selben Zeitraum die Gesamtemission des Straßengüterverkehrs um 14,6%. Einspareffekte durch effizientere Motorentechnik wurden durch erhöhte Fahrleistungen überkompensiert. (Umweltbundesamt 2025) Maßnahmen zur Emissionsreduzierung sind sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht von zentraler Bedeutung. Dabei existieren eine Vielzahl von Handlungsfeldern auf technologischer, organisatorischer, aber auch planerischer Ebene. Im Rahmen der Forschungsarbeit sollen am Beispiel einer lokalen

Brauerei diese Handlungsfelder beim Transport der Produkte zum Kunden untersucht werden. Als Vergleichsgröße soll hierbei der CO<sub>2</sub>e-Ausstoß dienen, um die unterschiedlichen Effekte bewerten und vergleichen zu können.

### 1.1 CO<sub>2</sub> BILANZIERUNG ALS VERGLEICHSWERKZEUG

Die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung stellt ein zentrales Instrument für die Umsetzung nachhaltiger Unternehmensstrategien dar. Sie ermöglicht die systematische Erfassung von Treibhausgasemissionen (THG), um fundierte Entscheidungen zur Reduktion dieser Emissionen zu treffen. Dabei unterscheidet die CO<sub>2</sub>-Bilanzierung zwischen Scope 1, den direkten Emissionen aus unternehmens-eigenen Quellen, und Scope 2, den indirekten Emissionen aus der Nutzung eingekaufter Energie. Diese Differenzierung bildet die Grundlage für internationale Standards wie das Green-house Gas Protocol und die ISO 14064-1. (Lohre et al. 2015)

Scope-1-Emissionen resultieren direkt aus den betrieblichen Aktivitäten des Unternehmens, wie der Nutzung von Heizungsanlagen, in Produktionsprozessen oder dem Kraftstoffverbrauch von firmeneigenen Fahrzeugen. Scope-2-Emissionen hingegen entstehen durch die Nutzung externer Energiequellen wie Strom, Wärme oder Dampf. Zusätzlich sind noch die Scope 3-Emissionen zu beachten, also die indirekten Emissionen des Unternehmens aus Quellen, die das Unternehmen nicht kontrolliert oder besitzt. Da diese Emissionen überwiegend von der Energiequelle des Lieferanten abhängen, sind sie indirekter Natur, aber dennoch maßgeblich für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck eines Unternehmens mitverantwortlich. (Gogolin und Klaas-Wissing 2015)

Es zeigt sich hier schon, dass sich je nach betrachtetem Scope Umfang sich unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Bilanzen ergeben können, insbesondere beim Vergleich zwischen Unternehmen, um bspw. die Wirksamkeit von Verbesserungsmaßnahmen zu bewerten. Dementsprechend sorgfältig sind die Systemgrenzen und Untersuchungsumfänge abzugrenzen.

## 1.2 DIE HERAUSFORDERUNG DER LETZTEN MEILE

Die Letzte Meile ist der finale Abschnitt der Lieferkette zwischen dem Break-Bulk Point (BBP) und dem Empfänger. Sie wird durch optimierte Transportwege, spezielle Übergabeprozesse und effiziente Zeitplanung geprägt, damit Waren schnell und zuverlässig beim Endkunden ankommen. (Brabänder 2020)

Die Letzte Meile ist essenziell ein One-to-Many-Verteilprozess, bei dem vom BBP aus zahlreiche Zieladressen bedient werden. Der BBP fungiert dabei als zentraler Knotenpunkt, an dem große Transportbündel aufgebrochen und für spezifische Touren reorganisiert werden. Die Zustellpunkte reichen von Einzelhandelsfilialen bis zu Haustüren der Endkunden und erfordern differenzierte, hochgradig koordinierte Planungsansätze. Die Herausforderungen sind vielschichtig und umfassen vor allem erhebliche Kostendruckpunkte. Dieser letzte Abschnitt der Lieferkette verursacht bis zu 50 % der gesamten Transportkosten. Die Hauptursache hierfür liegt in der Vielzahl individueller Zustellpunkte, die hohe Stoppkosten nach sich ziehen, sowie in der geringen Produktivität pro Stopp und Tour, wodurch Effizienzprobleme weiter verschärft werden. (Wellbrock et al. 2022)

Darüber hinaus führen die Umweltauswirkungen und sozialen Kosten zu weitreichenden Implikationen. Der Transport ist mit erheblichen CO<sub>2</sub>-Emissionen, Feinstaubbelastung und Lärmemissionen verbunden. Die extensive Nutzung mautfreier öffentlicher Infrastrukturen sowie die durch Verkehrsstau verursachten Verzögerungen resultieren in einer signifikanten Minderung der Produktivität und steigern gleichzeitig die operativen Kosten. Verkehrsstaus erhöhen zudem die Emissionen und erschweren eine effiziente Logistik erheblich. Ein weiteres Problem ist die Allokation der Kosten und Emissionen. Die gerechte Verteilung dieser Belastungen auf Sendungen und Empfänger erfordert komplexe Modellierungsansätze, insbesondere vor dem Hintergrund der heterogenen Lage der Zustellpunkte. Fortschrittliche Technologien können hier zu einer präzisen Kostenermittlung und zur Entwicklung gerechter Verteilmechanismen beitragen. Zur Optimierung existieren bereits mehrere vielversprechende Ansätze. Eine Verlagerung von Verteiltouren in die Nachtstunden sowie die Implementierung von Crowd-Logistik können helfen, Verkehrsstaus zu vermeiden und Ressourcen effizienter zu nutzen. Versandhändler können Mindestbestellmengen einführen, um die Konsolidierung von Sendungen und die Tour-Produktivität zu verbessern. Regulatorische Maßnahmen seitens des Gesetzgebers wie die Einführung von Umweltzonen oder Diesel-Fahrverbote tragen ebenfalls dazu bei, die Emissionen zu senken und nachhaltigere Logistikpraktiken zu etablieren. (Brabänder 2020)

Insgesamt repräsentiert die „Letzte Meile“ einen der komplexesten und kostenintensivsten Abschnitte der modernen Logistik und kann je nach Branche und Produkt

auch Transportwege von mehreren hundert Kilometern beinhalten. Durch den strategischen Einsatz innovativer Technologien, nachhaltiger Ansätze und optimierter Prozesse kann jedoch eine erhebliche Effizienzsteigerung erzielt werden.

## 2 METHODIK

Wie beschrieben, sind für die Betrachtung der Emissionen geeignete Systemgrenzen zu definieren, um durch die verschiedenen Scope Levels vergleichbare Aussagen zu erzielen. Durch Maßnahmen wie beispielsweise das Outsourcen einzelner Leistungen kann hier eine Verschiebung zwischen den verschiedenen Scopes auftreten. Dies gilt es in einer vergleichenden Betrachtung zu vermeiden. Für den hier untersuchten Fall kommen die Analytische Berechnung und Klassifikation der Kundengruppen auf Basis von historischen Daten zu Kundenbestellungen, sowie der Einsatz einer Supply Chain Simulationsumgebung, um Aussagen zu möglichen Szenarien zu treffen (Melnik et al. 2024).

Bei *Lohre et al.* finden sich eine Vielzahl an Handlungsfelder für die Steigerung der Nachhaltigkeit in der Logistik. Der Fokus in dieser Untersuchung soll hierbei auf die ökologische Nachhaltigkeit gelegt werden, sodass hier als zentraler Vergleichswert die CO<sub>2</sub>e-Emissionen sinnvoll sind, um die Einflüsse verschiedener Maßnahmen auf das Untersuchungsobjekt zu vergleichen.

In den Untersuchungen werden hierbei 4 Maßnahmenpakete (MP) miteinander verglichen:

- Routenoptimierung
- Auslastungsoptimierung
- Optimierung der Bestellmengen
- Wechsel zu alternativen Antrieben

Die erste Maßnahme sollte die Transportstrecke reduzieren bzw. den Anteil an möglichen Leerfahrten reduzieren. Mit Maßnahme 2 soll erreicht werden, dass die verfügbare Transportkapazität besser ausgenutzt wird, beispielsweise durch mehr Stationen im Verteilverkehr. Die dritte Maßnahme beschreibt die Möglichkeit etwaige Bestellmengen der Kunden besser an die Gegebenheiten anzupassen, das heißt einerseits die Auslastung der Transportmittel zu erhöhen, aber auch durch eine Verschiebung der Bestellungen in der zeitlichen Ebene besser optimierte Routen zu erhalten. Maßnahme 4 spiegelt den Wechsel zu anderen Energieträgern für die Transportmittel wider bspw. in Form von Elektro-LKW.

## 2.1 BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEGENSTANDS

Im Rahmen dieser Arbeit steht die Brauerei Reichenbrand GmbH & Co. im Zentrum der Untersuchung und unterstützt diese mit entsprechender Datenbereitstellung. Die Brauerei wurde im Jahr 1874 von Karl-Friedrich Hofmann im Chemnitzer Stadtteil Reichenbrand gegründet und steht seit 1895 unter der Führung der Familie Bergt. Michael Bergt trat 2005 nach seiner Ausbildung als Brauer und Mälzer in Dresden sowie seinem Braumeisterstudium in Gräfelfing als jüngster Braumeister Sachsens in das Familienunternehmen ein. Die Reichenbrander Brauerei zeichnet sich durch eine Produktionskapazität von 10.000 bis 150.000 Hektolitern pro Jahr aus und verbindet traditionelle Brauverfahren wie beispielsweise die offene Gärung mit innovativen Produktentwicklungen, um sich an ein verändertes Marktumfeld sowie der Kundenpräferenzen anzupassen. Die Brauerei hat im Laufe ihrer Geschichte zahlreiche Auszeichnungen, darunter mehrere World Beer Awards, für ihre hochwertigen Biere erhalten.

Simulationsszenarien zur quantitativen Erfassung der CO<sub>2</sub>e-Emissionen, die entlang des Materialflusses vom Zentrallager der Brauerei zu den belieferten Kunden entstehen. Hierzu wird ein wissenschaftlich validierter Emissionsfaktor eingesetzt, um den CO<sub>2</sub>e-Ausstoß pro zurückgelegtem Transportkilometer zu berechnen. Die auf dieser Grundlage durchgeführte Simulation ermöglicht eine systematische Analyse der Umweltwirkungen der bestehenden Distributionsstruktur. Zudem ist das Modell erweiterbar, sodass weitere betriebliche Kennzahlen und Nachhaltigkeitsindikatoren sukzessive integriert werden können.

Die zugrunde liegende methodische Vorgehensweise in Anlehnung an das Vorgehensmodell von Rabe *et al.* dient dazu, die Anwendbarkeit datenbasierter Ansätze für die ökologische Bewertung betrieblicher Logistikprozesse zu prüfen (Rabe *et al.* 2008). Dadurch lassen sich konkrete Handlungsfelder vergleichen, in denen Potenziale zur ökologischen Optimierung der Lieferkette sowie zur nachhaltigen Steuerung der logistischen Abläufe bestehen.

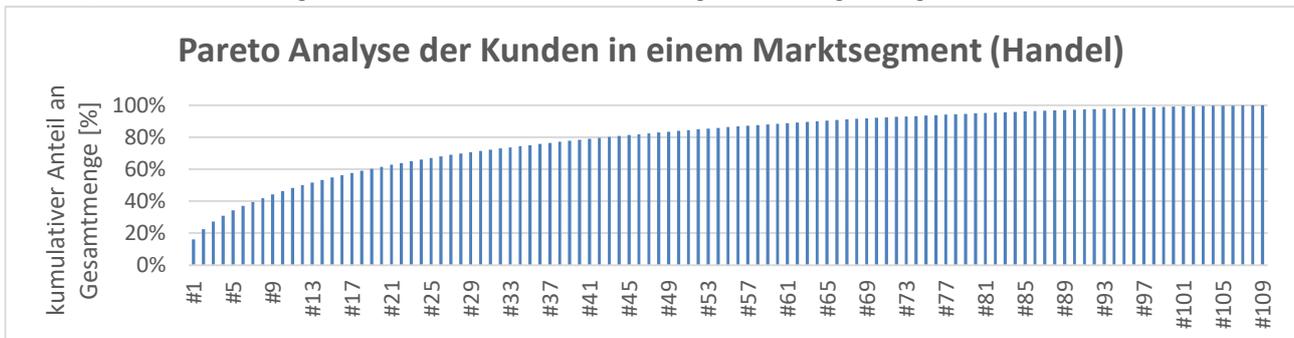


Abbildung 1. Darstellung der Kunden und ihr jeweiliger Anteil am Absatz in Prozent von der Gesamtmenge in Liter

Diese Vielfalt stellt eine Herausforderung an zeitgemäße Logistikprozesse. Das Produktportfolio umfasst verschiedene Verpackungsformate, darunter Einzelflaschen, Siphons, Fässer und Kisten unterschiedlicher Größe, die entsprechend der Literzahl und Flaschenanzahl variieren. Der Vertrieb erfolgt sowohl über den regionalen Handel in Sachsen als auch über den eigenen Einzelhandelsverkauf der Brauerei. Abbildung 1 zeigt hierbei noch einmal anonymisiert die Verteilung der jeweiligen Kunden im Segment Handel. Es existiert ein Großabnehmer der selbst noch nachgelagert eine weitere Auslieferung an eigene Supermärkte vornimmt wohingegen der Rest jeweils Märkte des Lebensmitteleinzelhandels sind.

## 2.2 METHODIK DER SIMULATION

Die Simulation von Lieferketten stellt ein wesentliches Instrument zur Analyse und Optimierung betrieblicher Prozesse dar. Um eine strukturierte und methodisch fundierte Durchführung der Simulation sicherzustellen. Ziel der Simulation ist die Entwicklung einer fundierten Vorstudie zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit in der Lieferkette der Brauerei Reichenbrand GmbH & Co. Im Mittelpunkt steht dabei die Modellierung verschiedener

## 3 DURCHFÜHRUNG SIMULATIONSSTUDIE

Während der Datenbeschaffung stellte sich die Herausforderung, dass die verfügbare Datenbasis auch Kunden beinhaltete, die nur einmalig beliefert wurden, sodass sich einer ABC Analyse bedient wurde, um die für die Simulation genutzten Unternehmensstandorte zu reduzieren und nur die gewählt wurden die eine mehrfache Belieferung hatten.

### 3.1 IST ZUSTAND

Auf Basis der identifizierten A-Kunden wurden die bereitgestellten Verkaufs- und Auftragsdaten so aufbereitet, dass sie von der Simulationssoftware anyLogistix verarbeitet werden konnten. Dies ermöglichte eine realitätsnahe Abbildung der Lieferkette unter Berücksichtigung relevanter Einflussfaktoren wie Auftragsvolumina, Lieferfrequenzen und Bestellmuster. Zur Analyse des Ist-Zustands der Brauereilieferketten wurde eine Milk-Run Simulation in anyLogistix durchgeführt, wie sie auch dem aktuell eingesetzten Konzept in der Distribution entspricht. Der Ausgangspunkt dieser Untersuchung war der Import der zuvor aufbereiteten, gefilterten und analysierten Verkaufsdaten. Wie in Abbildung 2 verdeutlicht, wurde die Nachfrage aller

Kunden auf Grundlage der historischen Verkaufsdaten modelliert. Diese basieren auf den tatsächlichen Auslieferungsdaten der Brauerei. Für jede Lieferung wurde der jeweilige Kunde, das zugehörige Produkt, die gelieferte Menge sowie das Datum und die Uhrzeit der Auslieferung erfasst und in das Modell integriert.

Im nächsten Schritt wurden die Transportwege implementiert sowie die Emissions-Faktoren nach DIN EN 16258. Hierbei wurde von einem Dieselmotorkraftstoff mit 5% Biodieselanteil und einem Well-to-Wheel Faktor von 3,17 kg CO<sub>2</sub>e/l ausgegangen. Dieser Faktor beinhaltet alle Emissionen von Gewinnung bis zum Verbrauch im Fahrzeug.

### 3.2 MP1 – ROUTENOPTIMIERUNG

Nach der Modellierung des Ist-Zustands erfolgte die experimentelle Analyse verschiedener Szenarien, um Optimierungsmöglichkeiten in der Lieferkette der Brauerei zu identifizieren. In den folgenden Abschnitten werden die verschiedenen Szenarien vorgestellt, die jeweils spezifische Anpassungen der Transportprozesse untersuchen. Ziel ist es, die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die zentrale „CO<sub>2</sub>e-Emissionen“ zu quantifizieren. Begonnen wird mit der Routenoptimierung.

Zur Optimierung der Belieferung wurde eine geografische Clusteranalyse unter Anwendung des K-Means-Algorithmus durchgeführt. Ziel war es, die Gesamtheit der Kunden anhand ihrer geografischen Koordinaten (Breiten- und Längengrade) in sinnvolle Gruppen zu unterteilen, um potenzielle Liefergebiete zu identifizieren, die eine effiziente Routenplanung ermöglichen. Die Kundendaten wurden dafür mit Python analysiert.

Zur Vorbereitung der Clusteranalyse wurden die Breiten- und Längengrade der Kunden extrahiert und in einem zweidimensionalen Raum als Datenmatrix strukturiert. Anschließend wurde der K-Means-Algorithmus mit vier Clustern durchgeführt. Die Auswahl von vier Clustern erfolgte auf Grundlage der geografischen Streuung der Standorte und der Annahme einer realistischen Anzahl von Liefergebieten. Vergleichende Analysen mit alternativen Clusteranzahlen (drei, sechs und acht) wurden ebenfalls durchgeführt. Diese lieferten jedoch entweder zu groben Gruppierungen oder führten zu einer übermäßigen Fragmentierung der Kundengebiete, was eine praktikable Routenplanung erschwerte. Insbesondere bei einer hohen Anzahl an Clustern bestand das Risiko, dass eine Vielzahl kleinteiliger Milk Runs erforderlich wären, wodurch sich die gesamte Transportdistanz potenziell erhöht. Die Wahl von vier Clustern war somit ein Kompromiss zwischen geografischer Präzision und logistischer Umsetzbarkeit.

Im Anschluss an die Tourenbildung wurde für jeden einzelnen Milk Run die optimale Lieferreihenfolge bestimmt. Hierzu wurde das Travelling-Salesman-Problem algorithmisch gelöst, um die effizienteste Route hinsichtlich der Gesamttransportdistanz zu identifizieren. Die daraus resultierenden Pfade dienten als Grundlage für die Definition der tatsächlichen Lieferwege (Paths) in der Simulationsumgebung. Ein analoges Vorgehen wurde im zweiten Szenario umgesetzt, mit der Abweichung, dass die zeitliche Aggregation der Bestellungen nicht auf Basis einer Kalenderwoche, sondern auf drei aufeinanderfolgende Werktagen beschränkt wurde. Ziel war es, die Effekte einer enger gefassten Konsolidierungsperiode auf die Tourenstruktur und die Transportdistanz zu analysieren.

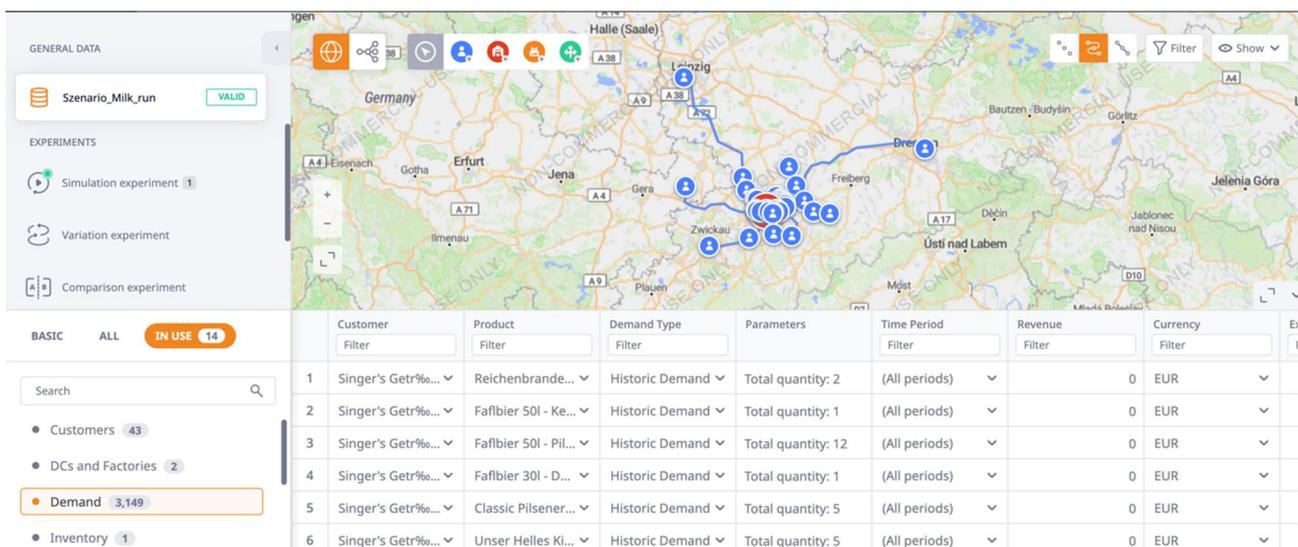


Abbildung 2. Ausschnitt Simulationsoberfläche mit Transportrouten zu den Kunden sowie den historischen Bestelldaten

### 3.3 MP2 - AUSLASTUNGSOPTIMIERUNG

Die effiziente Nutzung von LKW-Kapazitäten in einem Milk Run-System stellt eine zentrale Herausforderung im modernen Lieferkettenmanagement dar. Ziel der vorliegenden Optimierung war es, die LKW-Auslastung zu maximieren, um Leerfahrten zu minimieren und eine effiziente Tourenplanung zu gewährleisten. Dazu wurde eine methodische Berechnung der Ladekapazitäten durchgeführt. Ein wesentlicher Schritt der Optimierung bestand in der Bestimmung der maximalen Kapazität eines im Betrieb genutzten LKW. Basierend auf den technischen Spezifikationen der genutzten Fahrzeuge wurde eine Ladefähigkeit von 6.150 Litern angenommen. Diese Zahl resultierte aus dem Mittel der maximal zulässigen Beladung eines 18 Tonnen LKW voll beladen mit Bierkästen und der maximal zulässigen Beladung voll beladen mit Bierfässern sowie den verfügbaren Europaletten Stellplätzen (Tabelle 1).

Tabelle 1. Berechnungsansatz Kapazität LKW

|   | Max. Liter beladen mit Bierkästen | Max. Liter beladen mit Bierfässern |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|
| Nutzlast LKW                            | 10000 kg                          | 10000 kg                           |
| Biergewicht pro Einheit                 | 10 kg                             | 50 kg                              |
| Leergewicht der Verpackung              | 10 kg                             | 10 kg                              |
| Gesamtgewicht                           | 10 kg + 10 kg = 20 kg             | 50 kg + 10 kg = 60 kg              |
| Anzahl Einheiten pro Palette            | 40 Stk.                           | 6 Stk.                             |
| Gewicht pro Palette (+ Palettengewicht) | 20 kg x 40 Stk. + 25 kg = 825 kg  | 60 kg x 6 Stk. 25 kg = 385 kg      |
| Gesamtgewicht pro Transport             | 825 kg x 12 Stk. = 9900 kg        | 385 kg x 23 Stk. = 8.855 kg        |
| Biermenge                               | 4800 l                            | 7.500 l                            |

Um eine optimale Auslastung der LKW innerhalb eines Milk-Run-Systems sicherzustellen, wurde eine algorithmische Anpassung der in Excel vorliegenden Bestelldaten vorgenommen. Dabei erfolgte die Zusammenführung mehrerer zuvor separierter Bestellungen zu einer Tour unter Berücksichtigung folgender Restriktionen:

- Die maximale Transportkapazität von 6.150 Litern pro Milk Run durfte nicht überschritten werden.
- Die Bestellung eines einzelnen Kunden an einem bestimmten Tag durfte nicht auf mehrere Milk Runs aufgeteilt werden.

- Es konnten Bestellungen von maximal vier aufeinanderfolgenden Tagen konsolidiert werden, um größere Abweichungen von den ursprünglichen Lieferterminen und eine dar-aus resultierende Verzerrung der Bestellmengen zu vermeiden.
- Ein Milk Run durfte maximal acht Kunden umfassen, da pro Kunde eine durchschnittliche Entladezeit von 30 Minuten angenommen wurde. Dies gewährleistete, dass die gesamte Route innerhalb eines regulären Arbeitstages abgeschlossen werden konnte.

### 3.4 MP3 – OPTIMIERUNG DER BESTELLMENGEN

In diesem Szenario wurde die bestehende Lieferstrategie angepasst, indem nahegelegene Kunden weiterhin mit der bisherigen Frequenz beliefert werden, während Kunden, die weiter als 20 Kilometer von der Brauerei entfernt sind, seltener, jedoch mit größeren Bestellmengen versorgt werden. Diese Strategie ermöglicht eine Reduktion der Transportkosten, eine effizientere Nutzung logistischer Ressourcen und eine Reduktion der Transportkilometer.

Zur Umsetzung dieser Strategie wurden zunächst die Entfernungen der Kunden zur Brauerei analysiert und in zwei Gruppen unterteilt: Kunden, die sich in einem Umkreis von maximal 20 Kilometern befinden, wurden als „nahe Kunden“ klassifiziert und behielten ihre gewohnte Belieferungshäufigkeit, während Kunden mit einer größeren Entfernung als „entfernte Kunden“ identifiziert wurden. Für diese wurde die Belieferungshäufigkeit um 50 % reduziert, während die Bestellmengen entsprechend verdoppelt wurden, um die Gesamtliefermenge über einen längeren Zeitraum konstant zu halten.

Im Rahmen der Analyse wurde zudem überprüft, ob die Gesamtmenge an transportierten Litern pro Milk Run die festgelegte Grenze von 6.150 Litern nicht überschreitet. Diese Überprüfung ist essenziell, um sicherzustellen, dass die durch die selteneren, aber umfangreicheren Bestellungen der weiter entfernten Kunden bedingte Volumenerhöhung keine logistischen Kapazitätsgrenzen übersteigt. Die Analyse ergab, dass die größte Einzelbestellung 5.750 Liter umfasst, wodurch gewährleistet ist, dass die maximale Transportkapazität nicht überschritten wird und alle Milk Runs innerhalb der definierten Grenzen operieren.

### 3.5 MP4 – ALTERNATIVER ANTRIEB

Die Einführung von Elektro-LKWs erfordert jedoch eine umfassende Analyse, da sie sich in technischer, wirtschaftlicher und betrieblicher Hinsicht von konventionellen Diesel-LKWs unterscheiden. Die Auswahl eines geeigneten E-LKWs hängt von mehreren Faktoren ab, darunter die Reichweite, die benötigte Ladeinfrastruktur, die Traglast sowie die wirtschaftliche Rentabilität.

Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Integration von Elektro-LKWs in bestehende Lieferketten. Aufgrund

der begrenzten Reichweite im Vergleich zu herkömmlichen Dieselfahrzeugen müssen optimale Einsatzgebiete definiert werden. Kurzstreckentransporte oder innerstädtische Lieferverkehre eignen sich besonders für E-LKWs, da hier die Ladeinfrastruktur leichter zugänglich ist und kürzere Fahrdistanzen keine negativen Auswirkungen auf die logistische Effizienz haben.

In diesem Szenario wird die Möglichkeit der Elektrifizierung eines LKW innerhalb des bestehenden Liefernetzwerks analysiert. Ziel ist es, eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Implementierung alternativer Antriebe in der Logistik zu schaffen und deren Potenzial zur Reduktion des CO<sub>2</sub>e-Ausstoßes zu bewerten. Im ersten Schritt wurde anhand der vorliegenden Lieferdaten analysiert, welche Transportkapazitäten für Kurzstreckentransporte erforderlich sind. Die Auswertung ergab, dass für innerstädtische Lieferungen oder Touren mit wenigen Kunden pro Fahrt eine maximale Transportmenge von 3.000 Litern Bier notwendig ist. Zur Vereinfachung der Berechnung wird angenommen, dass ein Liter Bier einem Kilogramm entspricht.

Zudem muss das Gewicht der Verpackung berücksichtigt werden. In Szenarien, in denen Bierkästen transportiert werden, verdoppelt sich das Gewicht nahezu, da das Leergut (Kasten und Glasflaschen) ein vergleichbares Gewicht wie das Bier selbst aufweist. In diesem Fall beträgt das Gesamtgewicht somit 6.000 kg. Hingegen sind Bierfässer in Bezug auf das Verhältnis von Verpackung zu Inhalt deutlich leichter, sodass das Gesamtgewicht bei einer Beladung mit Fässern geringer ausfällt. Da in der Praxis jedoch eine Mischbeladung aus Kästen und Fässern üblich ist, muss ein Fahrzeug gewählt werden, das für den Maximalfall der schwereren Bierkasten-Beladung ausgelegt ist.

Unter diesen Bedingungen erweist sich ein 12-Tonnen-LKW als geeignete Wahl. Der LKW-Hersteller DAF bietet mit dem „XB 120 12t Electric“, ein entsprechendes Modell an. Dieses Fahrzeug ist mit einer 141-kWh-Batterie ausgestattet und verfügt über eine geschätzte Reichweite von 160 km, wodurch es optimal für den Kurzstreckentransport geeignet ist. Auf Grundlage des ausgewählten Modells wurde anschließend ein angepasstes Szenario in anyLogistix simuliert. Zunächst erfolgte die Identifikation der Milk Runs, die nicht durch den Elektro-LKW bedient werden können.

Dabei wurden folgende Ausschlusskriterien definiert:

- Strecken mit einer Länge von über 120 km, wobei ein Sicherheitspuffer von 40 km in die Reichweitenberechnung einbezogen wurde, um unvorhergesehene Reichweitenverluste zu berücksichtigen.
- Strecken, die überwiegend über Autobahnen verlaufen, da hier aufgrund höherer Geschwindigkeiten und des damit verbundenen erhöhten Energieverbrauchs ein disproportionaler höherer Strombedarf besteht.

#### 4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Die Ergebnisse der jeweiligen Simulationsexperimente basieren auf der Ermittlung der spezifischen Transportdistanzen sowie der Multiplikation mit Verbrauchsfaktor und Emissionsfaktor. Ersterer wurde mit einem Faktor von  $0,35 \frac{l}{km}$  angenommen.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das 1. Maßnahmenpaket keine Verbesserung im Vergleich zum Ist-Zustand bringt. Die Anwendung des K-Means-Algorithmus zur Clusterung der A-Kunden und deren anschließende geografische Gruppierung für Milk Runs zeigte, dass eine rein geografische Optimierung ohne gleichzeitige Berücksichtigung betrieblicher Restriktionen (z. B. maximale Anzahl an belieferten Kunden, zeitliche Konsolidierung) nicht zwangsläufig zu einer Reduktion der Gesamttransportdistanz führt.

Tabelle 2. Ergebnisse der jeweiligen Simulationsexperimente mit Transportdistanz und CO<sub>2</sub>e in kg

| MP                               | Transportdistanz (km)                 | CO <sub>2</sub> e Gesamt (kg) | Eingesparte CO <sub>2</sub> e (kg) |
|----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| Ist Situation                    | 12.888,36                             | 14.299,64                     | -                                  |
| MP1 – Routenoptimierung (Woche)  | 14.378,53                             | 15.952,98                     | höher als Ist-Zustand              |
| MP1 – Routenoptimierung (4 Tage) | 18.235,80                             | 20.232,62                     | höher als Ist-Zustand              |
| MP2 - Auslastungsoptimierung     | 10.645,23                             | 11.810,88                     | 2.488,76                           |
| MP3 – Optimierung Bestellmenge   | 9.174,55                              | 10.179,16                     | 4.120,48                           |
| MP4 – Alternativer Antrieb       | nur verbliebener Anteil fossil: 5.264 | 5.840,41                      | 8.459,23                           |

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass eine holistische Betrachtung erforderlich ist, welche nicht nur geographische, sondern auch operative Parameter integriert. Ebenso zeigt es aber auch die schon vorhandene Optimierung der eingesetzten Dispositionssoftware im Unternehmen, die schon eine optimierte Tourenplanung umsetzt.

Das zweite Maßnahmenpaket umfasst die Optimierung der LKW-Auslastung. Die Analyse zeigt, dass eine gezielte Konsolidierung von Bestellungen unter Beachtung technischer und logistischer Restriktionen zu einer signifikanten Reduktion der gefahrenen Kilometer und damit auch des CO<sub>2</sub>e-Ausstoßes führt.

Das dritte Maßnahmenpaket ist die Differenzierung der Lieferfrequenz nach Entfernungsklassen. Die Reduktion der Belieferung entfernter Kunden bei gleichzeitiger Erhöhung der Bestellmenge führte ebenfalls zu einer merklichen Emissionsreduktion. Die Betrachtung der durchschnittlichen Transportdistanz offenbart, dass eine gezielte Anpassung der Lieferfrequenz unter Beachtung der Entfernung eine effektive Maßnahme darstellt, insbesondere zur Reduktion von Langstreckentransporten. Zukünftige Strategien sollten dabei auch Aspekte der Lagerhaltung bei den Kunden sowie das Servicelevel berücksichtigen, um eine ökonomisch wie ökologisch tragfähige Lösung zu finden. Ggf. können Anreizsysteme die Akzeptanz bei den Kunden stärken. Das vierte Maßnahmenpaket betrifft die Integration alternativer Antriebstechnologien. Die Einführung eines batterieelektrischen LKW für innerstädtische Touren verdeutlichte das Potenzial zur Reduktion der transportbedingten Emissionen. Die Simulation ergab eine Einsparung von rund 8,5 Tonnen CO<sub>2</sub>, allerdings muss die Umweltwirkung im Kontext des gesamten Lebenszyklus betrachtet werden. Die hohe Emissionsbelastung bei der Herstellung des Fahrzeugs relativiert kurzfristige Vorteile, langfristig jedoch bietet der Einsatz von E-LKWs bei entsprechender Laufleistung ein substanzielles Nachhaltigkeitspotenzial. Gleichzeitig bedarf es einer infrastrukturellen Aufwertung der Ladeinfrastruktur sowie einer strategischen Planung hinsichtlich der Einsatzgebiete der Fahrzeuge.

## 5 KRITISCHE WÜRDIGUNG UND AUSBLICK

Zusammenfassend zeigen die untersuchten Maßnahmenpakete, dass unter Beachtung logistischer, technischer und wirtschaftlicher Rahmenbedingungen eine Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen möglich ist, es aber schon starke Optimierungen in einigen Bereichen gibt und man ggf. über neue Ansätze bspw. durch Einbeziehung der Kunden nachdenken sollte. Zukünftig eröffnen sich auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse zahlreiche Erweiterungs- und Anwendungsmöglichkeiten. So könnten auch weitere Kundengruppen und Marktsegmente miteinander verglichen werden, um eine vollständige Abbildung der Lieferkette zu ermöglichen und Unterschiede zwischen Lebensmitteleinzelhandel aber auch Gastronomie herauszuarbeiten. Entsprechend unterschiedliche Bestandsführungsstrategien (Feste Bestellmengen vs. Feste Bestelltage) waren in den Daten erkennbar. Zudem wäre die Anwendung hybrider Simulationsmethoden sowie die Integration von Echtzeitdaten denkbar, um dynamische Reaktionsmöglichkeiten auf Störungen oder Nachfrageschwankungen zu testen. Ebenso könnten betriebswirtschaftliche Aspekte, etwa Transportkosten, Investitionsaufwände oder Total-Cost-of-Ownership-Berechnungen, ergänzt werden, um eine ganzheitliche Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

## LITERATURVERZEICHNIS

Brabänder, Christian (2020): Die Letzte Meile. Definition, Prozess, Kostenrechnung und Gestaltungsfelder. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH (Essentials Ser).

Bretzke, Wolf-Rüdiger (2014): Nachhaltige Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Gogolin, Markus; Klaas-Wissing, Thorsten (2015): "GreenTool" als Grundlage für das CO<sub>2</sub>-Management. Ein CO<sub>2</sub>-Berechnungs-Werkzeug für mittelständische Logistikdienstleister. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Advanced Purchasing & SCM, 5).

Hannen, Conrad (2021): Transformationsstrategien zum CO<sub>2</sub>-neutralen Unternehmen. Unter Mitarbeit von Universität Kassel.

Lohre, Dirk; Pfennig, Roland; Poerschke, Viktoria; Gotthardt, Ruben (2015): Nachhaltigkeitsmanagement für Logistikdienstleister. Ein Praxisleitfaden. 1. Aufl. 2015. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Springer e-Book Collection Business and Economics).

Melnyk, Steven Alexander; Thüerer, Matthias; Blome, Constantin; Schoenherr, Tobias; Gold, Stefan (2024): (Re)-discovering simulation as a critical element of OM/SCM research: call for research.

Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid (2008): Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Umweltbundesamt (2025): Emissionen des Verkehrs. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#strassen-guterverkehr->, zuletzt aktualisiert am 12.09.2025,

Wellbrock, Wanja; Ludin, Daniela; Knezevic, Irena (2022): Letzte Meile 4.0. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

**Liz Lucia Hofmeister, BSc**, Studentin an der Professur Fabrikplanung und Intralogistik, beschäftigt sich im Rahmen Ihres Studiums mit der Analyse der Nachhaltigkeit von Logistikprozessen.

**Dipl.-Ing. Pierre Grzona**, wissenschaftlicher Mitarbeiter mit den Arbeitsschwerpunkten in den Methoden und Modellen der digitalen Fabrik sowie der Intralogistik.

**Prof. Dr. Matthias Thüerer**, Lehrstuhlinhaber der Professur Fabrikplanung und Intralogistik an der Technischen Universität Chemnitz.

Adresse: Professur Fabrikplanung und Intralogistik, Technische Universität Chemnitz, Erfenschlager Str. 73, 09125 Chemnitz, Germany,  
Phone: +49 371 531-36495,  
E-Mail: pierre.grzona@mb.tu-chemnitz.de