

Intelligente Geodaten-basierte Bestandsermittlung im Behältermanagement für geringwertige Ladungsträger (GeoBest)

Dipl.-Ing. Bettina Wessel¹,
Dipl.-Ing. Niclas Grunert²,
Rico Zöllner³,
Dr.-Ing. Mathias Kühn⁴,
Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schmidt⁵

Professur für Technische Logistik
Institut für Technische Logistik und Arbeitssysteme
Technische Universität Dresden

Das Forschungsprojekt GeoBest zielt auf die Entwicklung eines wirtschaftlichen, geodatenbasierten Trackingsystems zur automatisierten Bestandsführung in Behälterkreisläufen mit geringwertigen Ladungsträgern. Zentrale Ziele sind eine bedarfsgerechte Nachschubsteuerung, die Vermeidung von Über- und Unterbelieferungen sowie die Bündelung von Transporten zur Steigerung von Effizienz und Nachhaltigkeit. Gemeinsam mit der LOGSOL GmbH, einem Anbieter für Logistiksoftware, werden digitale Zwillinge und standardisierte Trackinghardware – bestehend aus preiswerten lokalen Sendern und preisintensiveren globalen Trackern – eingesetzt, um Transportbewegungen zu erfassen und Lagerbestände zuverlässig zu schätzen. Aktuelle Trackinglösungen wie GPS- oder RFID-Systeme sind für diesen Anwendungsfall oft zu kostenintensiv oder technisch nicht durchgängig einsetzbar. GeoBest adressiert diese Lücke durch ein hybrides Sensornetzwerk in Kombination mit Methoden der analytischen Modellierung, Simulation und Machine Learning. Eine analytische Modellierung sowie umfassende Simulationen komplexer Logistikmodelle wie Milkrun und Hub-and-Spoke in Siemens Plant Simulation zeigen, dass bereits mit wenigen Leuchttürmen eine präzise Bestandsschätzung möglich ist. Die Ergebnisse deuten auf ein hohes Optimierungspotenzial hin, welches nun in Praxistests auf Wirtschaftlichkeit und Übertragbarkeit geprüft werden soll.

[Schlüsselworte: Tracking, Geodaten, Behälter, Kreislauf, Bestandsschätzung, Behälterkreislauf, Nachhaltigkeit]

1 EINLEITUNG

Globale Ereignisse wie die Covid-19-Pandemie haben die Verwundbarkeit moderner Lieferketten deutlich vor Augen geführt [1]. Unterbrechungen durch Materialengpässe verdeutlichen, dass gerade in einer globalisierten und eng vernetzten Wirtschaft die Effizienz, die Zuverlässigkeit und die Resilienz logistischer Prozesse von entscheidender Bedeutung sind. Besonders betroffen sind geschlossene Behälterkreisläufe (Closed Loop Supply Chains, CLSC), da diese auf ein funktionierendes Zurückführen von Leerbehältern angewiesen sind. Fehlende oder ungenaue Standort- und Bestandsinformationen können zu Versorgungsengpässen, erhöhtem Koordinationsaufwand und ineffizienter Ressourcennutzung führen.

Für die Steuerung solcher Systeme ist eine präzise Bestandsführung entscheidend: Sie ermöglicht eine bedarfsgerechte Nachschubplanung, verhindert Über- oder Unterbelieferungen und reduziert durch die Bündelung von Transporten sowohl Kosten als auch Emissionen. Gerade bei geringwertigen Ladungsträgern stellt die durchgängige Ausstattung mit Ortungshardware jedoch eine ökonomische Hürde dar. Aktuelle Trackinglösungen, etwa GPS- oder RFID-Systeme, sind in diesem Anwendungsfeld entweder zu teuer oder aufgrund technischer Restriktionen nicht lückenlos einsetzbar. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, alternative Ansätze zu entwickeln, die auch mit minimalem Hardwareeinsatz eine zuverlässige Bestandsschätzung erlauben.

Das laufende Forschungsvorhaben GeoBest adressiert diese Lücke mit einem hybriden Sensornetzwerk aus wenigen global ortbaren „Leuchttürmen“ und zahlreichen kostengünstigen, lokal erfassbaren „Bojen“. Durch den Einsatz

von Machine Learning (ML) sollen historische und aktuelle Tracking- sowie Buchungsdaten kombiniert werden, um auch bei unvollständiger Datengrundlage präzise Bestandssprognosen zu erstellen. Mit dem zu entwickelnden Werkzeug "GeoBest" sollen Unternehmen – insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) – bei der Auswahl, Konfiguration und Integration geeigneter Lokalisierungstechnologien unterstützt werden. Ziel ist es, die Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit von CLSC zu steigern, ohne sämtliche Behälter mit teurer Ortungstechnik ausstatten zu müssen.

Im Sinne des Forschungsvorhabens ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Welche Lokalisierungstechnologie ist für welche Behälterkreistypen geeignet?
 - Welche Behälterkreistypen müssen vor dem Hintergrund des Projektzieles unterschieden werden?
 - Wie sensitiv ist die Genauigkeit der Schätzungen bei Veränderungen im Loop auf Basis unvollständiger Lokalisierungsdaten?
- Wie viele Lokalisierungssensoren sind notwendig, um den Bestand mit einer gewünschten Prognosegüte zu bestimmen?
- Welche Qualität müssen die Datensätze aufweisen, d. h., wie viele Daten sind nötig, welche Vorverarbeitungen müssen ggf. stattfinden und gibt es relevante Szenarien, die in den Daten noch nicht abgebildet sind?
- Wie viele Tauschzyklen sind notwendig, um für ML-Verfahren eine ausreichende Datenbasis schaffen zu können?

Sowie die zentrale Forschungsfrage des Projekts:

- Welche bestehenden Hardware-Komponenten sind mit welchen (ggf. weiter-) zu entwickelnder Statistik und ML-Methoden zu kombinieren, um insbesondere für geringwertige Behälter und Güter eine Bestandsschätzung (mit hinreichender Genauigkeit) für CLSC zu kreieren, ohne sämtliche Behälter mit Hardware ausstatten zu müssen?

2 STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK

Im Folgenden werden der Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt des Projektstarts erörtert.

2.1 STAND DER TECHNIK

Logistik und Künstliche Intelligenz (KI) stehen seit einigen Jahren in einem engen Wechselverhältnis: Während logistische Problemstellungen die Entwicklung anwendungsorientierter KI-Verfahren vorantreiben, eröffnen KI-Technologien zugleich neue Forschungs- und Anwendungsperspektiven für die Logistik [2, 3, 4, 5]. Das Deutsche Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz [6] hat in diesem Kontext bereits zahlreiche Projekte, etwa im Supply Chain Management [7, 8], umgesetzt. Auch in Deutschland finden KI-Anwendungen zunehmend Eingang in logistische Prozesse [3]. Dabei kann KI für verschiedene Aufgaben in der Logistik eingesetzt werden. Für das Projekt relevante Bereiche sind die Lokalisation und Identifikation von Objekten, die Analyse und Extraktion von Informationen, sowie das Planen von Transporten und Beständen [2].

2.1.1 LOKALISIERUNGSSENSOREN

Mit der fortschreitenden Digitalisierung wurden bestehende Lokalisierungssysteme weiterentwickelt und neue Lösungen in die Praxis überführt. Tabelle 1 gibt einen Überblick der aktuell verfügbaren Lokalisierungstechnologien und deren logistische Anwendungsfelder. In Tabelle 2 sind die initialen und laufenden Kosten der jeweiligen Trackingsysteme zusammengefasst.

Die passiven RFID-Tags sind zwar sehr günstig, haben jedoch den Nachteil, dass sie erst durch ein Lesegerät Lokalisierungsinformationen erzeugen. Somit müssten bei jedem Tauschpartner sogenannte RFID-Gates installiert werden, um den Bestand an den jeweiligen Orten aufzunehmen. Dies ist bei großen Behälterkreisnetzen nicht nur mit hohem Aufwand, sondern auch mit hohen Initialkosten verbunden [9, 11].

Aktive Lokalisierungstechnologien wie Ultra Wide Band (UWB), Bluetooth Low Energy (BLE) oder WLAN ermöglichen im Gegensatz zu passiven Ansätzen eine flächendeckende Ortung von Behältern. Die Lokalisierung erfolgt über Lesegeräte, welche auf dem Betriebsgelände sowie in Innenräumen installiert werden. Da moderne Smartphones ebenfalls über diese Technologien verfügen, können sie als günstige und mobile Lesegeräte genutzt werden. Nachteile aktiver Sensoren sind jedoch der Energiebedarf – typischerweise durch Akkus mit Laufzeiten von einigen Monaten bis hin zu Jahren – sowie höhere Kosten im Vergleich zu passiven RFID-Sensoren (vgl. Tabelle 2). Dadurch übersteigen die Sensorkosten mitunter die Behälterkosten, was den Einsatz auf hochwertige oder im geschlossenen Kreislauf geführte Behälter beschränkt [11, 14].

Die globalen Trackingsysteme GSM und GPS funktionieren autark und benötigen kein Lesegerät. Somit kann die

Tabelle 1: Übersicht der Lokalisierungstechnologien (in Anlehnung an [9])

Technologie	Reichweite	Anwendungsbereiche
RFID (passiv)	< 1 m	Trackinglösungen mit großer Anzahl an Tags (z. B. in Logistik/ Bestandsmanagement)
UWB	< 150 m	Indoor-Trackinglösungen, bei denen hohe Präzision erforderlich ist (Positionsgenauigkeit ca. 0,3 m)
BLE	< 75 m	Indoor-Trackinglösungen, bei denen keine hohe Präzision erforderlich ist (Positionsgenauigkeit von ca. 3 bis 5 m)
WLAN	< 150 m	Trackinglösungen zur Analyse von Bewegungsprofilen (Positionsgenauigkeit bis ca. 15 m)
GPS	global	Ortung und Verfolgung von Gütern im Outdoor-Bereich (Positionsgenauigkeit bis ca. 2 bis 10 m)
GSM	global	Flottenmanagement für Transportunternehmen (Positionsgenauigkeit bis ca. 100 bis 500 m)

Tabelle 2: Lokalisierungssysteme im Behältermanagement

Tracking-system	Lokalisierung	Kosten pro Behälter	Zusatzkosten
RFID, Lesegerät	durch RFID-Node	< 1 € [10]	Lesegerät ca. 1000 € [10], Mobilfunkkosten
Beacon, Lesegerät, Smartphone	durch Smartphone, IoT Hub	8-20 € [11]	Lesegerät ca. 100 € [12], Mobilfunkkosten
Beacon (LTE) Low-Cost-Tracker	autark	40-80 € [13]	Mobilfunkkosten

Position dieser Systeme zu jedem Zeitpunkt abgefragt werden. Die komplexere Elektronik erhöht dabei die Sensorkosten, womit diese hauptsächlich für höherwertige Behälter wie ISO-Container verwendet werden [15]. Der Stand der Technik zeigt, dass verfügbare Lokalisierungssysteme zur Bestandsschätzung von Low-Cost-Behältern in unternehmensübergreifenden Kreisläufen nicht geeignet sind. Passive Technologien wie RFID erlauben zwar eine kostengünstige Ausstattung der Behälter, erfordern jedoch hohe Investitionen in Lesegeräte. Aktive Systeme bieten zwar größere Funktionalität und Flexibilität, sind aufgrund hoher Sensorkosten für Low-Cost-Behälter jedoch ökonomisch nicht tragfähig. Damit stehen insbesondere KMU derzeit keine praxistauglichen Lösungen zum Tracking von Low-Cost-Behältern zur Verfügung.

2.2 STAND DER FORSCHUNG

Die Forschungsansätze innerhalb der Logistik, welche ML-Verfahren im Behältermanagement analysieren, beschränken sich auf vier überlappende Domänen: Container-Logistik [16, 17, 18], Supply Chain Management [19, 20, 21, 22], Bestandsmanagement [14, 23, 24, 25] sowie Rücknahmelogistik [26]. Auf der praktisch-technischen Seite sind diverse Firmen mit Produkten rund um Behältermanagement und Lokalisierung zu finden, z. B. bieten die inet GmbH [27], 4Flow [28], BLG Logistics Group [29] eher allgemeinere Behältermanagementkonzepte an; die Acteos GmbH [30] und comepack [31] spezialisieren sich auf Tracking und Tracing. Auf IT-Systeme und aktuelle Studien dazu fokussiert die Inform GmbH [32, 33, 34]. Auch für die rein technische Realisierung existieren: Beacons (z. B. Infsoft [9, 35]), RFID-Gates (z. B. Identible GmbH [10]) oder Low-Cost-Tracker (z. B. [13]), welche jeweils auf verschiedenen Technologien basieren (u. a. BLE, WLAN, GPS [11]).

Dennoch gibt es weiteres Potenzial in der Optimierung von Kosten und Lieferzeiten sowie der Umsatz- und Qualitätssteigerung. Dafür gibt es mehrere Faktoren:

- Bisherige Systeme finden aus Kostengründen wenig Anwendung bei geringwertigen Behältern und Gütern.
- Daraus folgt eine begrenzte Datenverfügbarkeit in diesem Segment.
- Es gibt einen Mangel an wissenschaftlichen Studien zum Einsatz von ML-Verfahren zur Bestimmung der Ortungsdichte und damit verbundenen Verlässlichkeitsaussagen.

Vor dem Hintergrund des aktuellen Stands von Wissenschaft und Technik liegt das Ziel des Vorhabens nicht in

der Entwicklung neuer Hardware, sondern in der optimalen Nutzung vorhandener Systeme in Kombination mit adaptierten ML-Verfahren, um Anwendern eine bedarfsgerechte Konfiguration und den Betrieb ihres Behältermanagementsystems zu ermöglichen. Insbesondere zur Untersuchung des Einflusses der Trackinggenauigkeit in Abhängigkeit von der Asset-Anzahl (Ortungsgerätedichte) existieren bislang keine wissenschaftlichen Arbeiten zum Einsatz von ML zur Verbesserung der Prognosegenauigkeit. Zentrale Forschungsfrage ist in diesem Projekt, wie sich aus der Signalanzahl zuverlässig auf die tatsächliche Behälteranzahl schließen lässt. Zur Beantwortung sollen neben klassischen statistischen Methoden auch ML-Ansätze herangezogen werden. Bestehende Studien zu Prognosemethoden und Geofencing auf Basis vorhandener Trackingdaten [36, 37] werden dabei in die Lösungsentwicklung integriert.

3 ARBEITSZIELE UND LÖSUNGSWEG

Im Folgenden werden die Teilziele und der angedachte Lösungsweg in seinen einzelnen Schritten beschrieben.

3.1 TEILZIELE DES FORSCHUNGSPROJEKTS

- Durchgängige Nutzerunterstützung bei Wahl und Konfiguration eines optimalen Lokalisierungssystems (Hardwareauswahl sowie Festlegung des Verhältnisses von Leuchttürmen und Bojen) unter Berücksichtigung der nutzerspezifischen Anforderungen (z. B. Kosten, Prognosegüte).
- Automatisierte Lokalisierung sowie damit verbundene Zuordnung zu Geozonen und ML-gestützte Bestandsschätzung auf Basis von zwangsläufig unvollständigen Trackinginformationen.
- Vorhersage von Behälterbeständen und Abschätzung des Behälterbedarfs durch das GeoBest-Tool (basierend auf historischen und aktuellen Buchungsdaten).
- Implementierung eines Visualisierungskonzepts zur Datenanalyse und Nutzerinteraktion.
- Konzept für ein adaptives Werkzeug “GeoBest” zur Integration in bestehende Behältermanagementlösungen.

3.2 TEILSCHRITTE

Das zu entwickelnde GeoBest-Tool deckt ein breites Spektrum von Funktionalitäten ab – von der Auswahl und Konfiguration geeigneter Lokalisierungstechnologien bis hin zur automatisierten Bestandsermittlung.

ANALYSE UND CHARAKTERISIERUNG DER BEHÄLTERKREISE

Zuerst werden die zu überwachenden Behälterkreise analysiert und spezifische Charakteristika wie Behälterkreistyp, Behältertyp und Anzahl der Tauschpartner erschlossen. Historische Buchungsdaten des Behälterkreises können die Konfiguration dabei ergänzen. Diese Eingaben sollen den Behälterkreis bestmöglich beschreiben und diesem einen Basistyp zuordnen. Auf dieser Basis kann anschließend die Lokalisierungstechnologie konfiguriert werden. Die initialen Eingabeparameter sollen in den weiteren Schritten anpassbar bleiben, um den Behälterkreis basierend auf tatsächlichen Buchungen noch besser zu beschreiben.

TECHNOLOGIEAUSWAHL UND KONFIGURATION

Im zweiten Schritt wird aus den gewonnenen Informationen die Lokalisierungstechnologie konfiguriert. Dabei können auch bestehende Lokalisierungssysteme eingebunden werden. Essenziell ist dabei das Verhältnis der Anzahl von Leuchttürmen und Bojen. Wobei die Leuchttürme über GPS verfügen und die Anwesenheit der Bojen (BLE-Beacons) übermitteln können. Diese Kombination aus global lokalisierbaren GPS-Sensoren und günstigen BLE-Beacons (vgl. Tabelle 1, Tabelle 2) stellt einen Aspekt des Neuheitsgrads des Konzeptes dar.

INITIALISIERUNG UND DATENVERARBEITUNG

Anschließend wird die Hardware initialisiert und die Datenbasis für die intelligente Bestandsprognose geschaffen. Dabei werden die Messdaten des ermittelten Bestands mit dem Realbestand verglichen. Die Dauer der Initialisierungsphase ist dabei anwenderspezifisch und soll anhand der Behälterkreisdaten approximiert werden. Die Charakterisierung des Behälterkreises kann durch die neu aufgenommenen Messungen iterativ optimiert werden.

AUTOMATISIERTE LOKALISIERUNG UND BESTANDSCHÄTZUNG

Im letzten Schritt wird das ML-Modell für die automatisierte Bestandsschätzung angelern. Die KI-gestützte Bestandsschätzung stellt den zweiten Neuheitsschwerpunkt des Projekts dar. Dabei dienen die historischen und aufzunehmenden Lokalisierungs- und Bestands- sowie Behälterkreisdaten als Grundlage des Modells. Dieses wird über zyklische Inventuren und Nutzerkorrekturen validiert, deren Frequenz anwenderspezifisch ist. Basierend auf dieser Korrektur kann das Lokalisierungssystem optimiert werden, um die gewünschte Genauigkeit der Bestandsermittlung zu erreichen. Dabei soll stets eine minimale Anzahl an Lokalisierungssensoren für eine gewünschte Bestandsgenauigkeit angestrebt werden.

4 BISHERIGE FORSCHUNGSERGEBNISSE

Im Folgenden werden die bisherigen Forschungsergebnisse erläutert.

4.1 CHARAKTERISIERUNG VON BEHÄLTERKREISLÄUFEN

Als Grundlage der Charakterisierung von Behälterkreisläufen dienen anonymisierte historische Buchungsdaten von Kunden der LOGSOL GmbH.

Aus diesen Daten sind die Akteure des Kreislaufes zu entnehmen, zwischen denen Behälter ausgetauscht werden. Dabei kann zwischen Versendern, Empfängern, Hubs und ggf. Dienstleistern unterschieden werden. Ebenso sind Parameter wie die Transportfrequenz, Transportmittel, Umlaufzeit, Lagerkapazitäten sowie die Struktur der Akteurbeziehungen zu entnehmen. Ziel der Analyse von Behälterkreisläufen ist es, typische Bewegungsmuster zu identifizieren und daraus Anforderungen an die Lokalisierungstechnologie und die Bestandsschätzung abzuleiten.

Zuerst wurden vier charakteristische Behälterkreisläufe definiert, welche eine hohe Praxisrelevanz und hohe Abdeckung industrieller Anwendungsfälle aufweisen:

- **1-zu-1 Beziehung:** repräsentiert direkte bilaterale Lieferbeziehungen, z. B. zwischen OEM und Tier -1
- **Hub-and-Spoke-Modell:** Modell für zentrale Verteilerzentren mit Satellitenstandorten
- **Milkrun:** Modell für sequenzielle Belieferung mehrerer Empfänger durch ein Fahrzeug
- **Peer-to-Peer-Modell:** Abbildung dynamischer Tauschbeziehungen in Netzwerken ohne zentrale Instanz

Diese Modelle ermöglichen es, typische Variationen in Buchungshäufigkeit, Transportmengen, Lagerumschlag und Partnerstruktur abzubilden.

4.1.1 CLUSTERING

Das Clustering der Behälterkreise wird von der LOGSOL GmbH basierend auf Kundendaten in folgenden Schritten umgesetzt:

- Datengrundlage sind die Bewegungsdaten aus dem LOGSOL-System "BinMan" [38], zukünftig ergänzt durch Echtzeitdaten der Lokalisierungssysteme
- Extraktion relevanter Merkmale wie Umlaufzeit, Buchungsfrequenz, Partneranzahl, saisonale Muster

- Anwendung von Algorithmen wie k-Means, DBSCAN oder hierarchischem Clustering zur Gruppierung ähnlicher Kreisläufe
- Überführung der gruppierten Kreise in Typenklassen, um daraus Empfehlungen für Lokalisierungssysteme und Prognosemodelle abzuleiten

Ziel ist die Entwicklung einer automatisierten Typisierung, die sowohl neu angelegte als auch historisch gewachsene Behälterkreise unabhängig von der Verfügbarkeit vollständiger Materialflussdaten klassifizieren kann.

Die resultierenden Cluster sollen nicht nur mathematisch konsistent, sondern auch logisch nachvollziehbar sein, sodass sie in konkrete technische Konfigurationsempfehlungen übersetzt werden können – etwa hinsichtlich der optimalen Anzahl von Bojen und Leuchttürmen.

Erwartet wird, dass sich durch die datengetriebene Typisierung sowohl die Prognosegüte der Bestände verbessert als auch eine anwendungsspezifische Auswahl geeigneter Trackingarchitekturen ableiten lässt. Diese bilden dann die Grundlage für die adaptive ML-gestützte Bestandsschätzung im weiteren Projektverlauf.

4.1.2 NETZWERKBASIERTE ANALYSE VON BEHÄLTERKREISLÄUFEN

Zur Charakterisierung und Bewertung von Behälterbewegungen vorhandener Buchungsdaten wird ein Netzwerkansatz genutzt, um die Dynamik der Behälterflüsse strukturell zu analysieren und relevante Muster systematisch sichtbar zu machen. Weiterhin ist ein Ziel, die Anzahl der Behälter, die als aktive Tracker ausgestattet werden sollen, einschätzen zu können. Dazu werden die zugrundeliegenden Buchungsdaten des Projektpartners LOGSOL GmbH genutzt, insbesondere die Informationen zu einzelnen Behälterbewegungen zwischen verschiedenen Lagerorten. Für die Netzwerkmodellierung wurden diese wie folgt abgebildet:

- **Knoten:** Kombination aus Lager-ID und Zeitstempel (z. B. Lager 1 am 12.01.2023).
- **Kanten:** Eine Bewegung eines bestimmten Behälters von einem Knoten zu einem anderen.
- **Attribute:** Jeder Kante ist die jeweilige Behälter-ID zugeordnet, sodass sich Pfade einzelner Behälter über das Netzwerk verfolgen lassen. Dabei verfügt die Kante über eine Wichtung, welche die Anzahl der Kanten zwischen den beiden Knoten abbildet.

Auf Basis dieser Modellierung entsteht ein gerichteter Graph, in dem stark zusammenhängende Komponenten (Strongly Connected Components, SCCs) die Basis für

die Identifikation von Kreisläufen bilden. Jeder SCC entspricht dabei einer Menge von Knoten, innerhalb derer ein Behälter theoretisch jeden Punkt erreichen kann, also einem geschlossenen Kreislauf. In der folgenden Analyse wurden für die größten SCCs zentrale Kenngrößen berechnet. Diese umfassen Knoten- und Kantenanzahl (Größe und Komplexität des Kreislaufs) Zeitraum, Anzahl unterschiedlicher Behälter und Lagerorte, Netzwerkmetriken wie durchschnittlicher Knotengrad, Dichte, Clustering-Koeffizient und Durchmesser.

Die Berechnungen zeigen, dass wenige große Kreisläufe den Großteil dieser Buchungsdaten ausmachen, während viele kleine SCCs lediglich Ein-Knoten-Beziehungen darstellen. Im größten Kreislauf sind beispielsweise 17000 Knoten und fast 80000 Kanten im Zeitraum von Juli 2021 bis September 2023 mit 18.000 unterschiedlichen Behältern, verteilt auf mehrere hundert Lagerorte, vorhanden.

Die Netzwerkbeobachtung ermöglicht die Identifikation dominanter Kreisläufe, die für den Gesamtprozess besonders relevant sind, und die Charakterisierung einzelner Zyklen, etwa hinsichtlich beteiligter Behälter, Dauer und Komplexität.

Durch diese Netzwerkmodellierung kann eine Abdeckung an der theoretisch besten und schlechtesten Detektion der Bojen durch die Leuchttürme berechnet werden. Mit der hardwarebedingten Grenze, dass 100 Bojen je Leuchtturm erfasst werden können, werden iterativ Leuchttürme ausgewählt und Bojen detektiert, bis alle Behälter erfasst sind. Es werden dabei drei Optionen durchlaufen, ein best und worst case sowie eine zufällige Auswahl, welche Behälter als Leuchttürme fungieren sollen. Die Auswahl der Behälter als Leuchtturm erfolgt dabei nach den meisten Interaktionen mit anderen Behältern für den best case, den wenigsten Interaktionen für den worst case bzw. einer zufälligen Auswahl der Behälter. So kann ein Vergleich der benötigten Anzahl an Leuchttürmen für eine komplette Abdeckung stattfinden.

Die Netzwerkanalyse dient nicht nur der explorativen Datenanalyse, sondern auch als Werkzeug zur Entscheidungsunterstützung. Potentielle Nutzer des GeoBest-Tools können damit die benötigten Leuchtturm- und Bojenanzahlen abschätzen. Ziel ist es, mittels historischer Daten und KI-Methoden eine Abschätzung geben zu können, ohne dass für einen neuen Behälterkreislauf erst Buchungsdaten manuell aufgenommen werden müssen. Herausforderungen dabei sind die Eingangsdaten, die über den Kreislauf bereitgestellt werden müssen. Dazu werden noch weitere Clustering-Methoden angewandt, um Behälterkreisläufe zu charakterisieren und den Einfluss der Parameter auf die benötigte Leuchtturmanzahl zu analysieren.

4.2 MATHEMATISCHE BETRACHTUNG

Für die mathematische Betrachtung wird ein vereinfachtes Modell der 1-zu-1-Beziehung untersucht. Es werden zwei Lager betrachtet, zwischen denen gleichzeitig eine bestimmte Anzahl R an Behältern ausgetauscht wird. Jeder Behälter ist entweder ein Leuchtturm oder eine Boje. Die Auswahl der Behälter erfolgt zufällig. Lager 1 bzw. Lager 2 haben eine Menge von S_1 bzw. S_2 Behältern mit einer Anzahl an Leuchttürmen L_1 bzw. L_2 und Bojen B_1 bzw. B_2 , wobei die Summe an Behältern im geschlossenen Kreislauf konstant bleibt. Ziel ist es, nach jedem Austausch bzw. jedem Zyklus z die neue Wahrscheinlichkeitsverteilung der Leuchttürme in jedem Lager zu bestimmen.

In der folgenden Betrachtung sind $L_1(z)$ und $L_2(z)$ die Zufallsgrößen mit den gegebenen Anfangsbedingungen $L_1(0)$ und $L_2(0)$. Diese Zufallsvariablen werden weiterführend allgemein als $L_i(z)$ für $i \in 1, 2$ mit Index i für die Lager bezeichnet. Analog dazu ist die Anzahl der Bojen folglich eine Zufallsgröße $B_i(z)$. Da R als zeitunabhängig angenommen wird, gilt $L_i(z) + B_i(z) = S_i = \text{const}$.

Für die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit von einem zum nächsten Zyklus wird die hypergeometrische Verteilung H genutzt. Die Wahrscheinlichkeit, dass genau m Leuchttürme aus einem Lager von N Behältern mit insgesamt M Leuchttürmen bei einer Stichprobe von R Behältern gezogen werden, wird durch die Dichte der hypergeometrischen Verteilung beschrieben:

$$H(N, M, R, m) = \frac{\binom{M}{m} \binom{N-M}{R-m}}{\binom{N}{R}}$$

Durch die parallel ablaufenden Prozesse besteht jeder Zyklus $z \in 0, 1, 2 \dots$ aus zwei gleichzeitigen, aber unabhängigen Ziehungen in den zwei Lagern, für die die jeweilige Wahrscheinlichkeitsverteilung über die hypergeometrische Verteilung berechnet werden kann.

Für den 1-zu-1-Austausch ergibt sich für jeden Zyklus die kombinierte Wahrscheinlichkeit $P_{\text{Änderung } \Delta}$, dass sich die Anzahl der Leuchttürme im betrachteten Lager um $\Delta = l_2 - l_1$ mit $l_1, l_2 \in 0 \dots R$ ändert, durch die Summe über alle möglichen Ziehungszerlegungen. Die Änderung Δ kann dabei positiv oder negativ sein. Die ausgehenden Leuchttürme im betrachteten Lager werden mit l_1 und die eingehenden mit l_2 beschrieben.

Die Zustandswahrscheinlichkeit $P_i^{(l)}(z+1)$ von Zyklus z zu $z+1$ kann für verschiedene Leuchtturmanzahlen l berechnet werden. Sie berechnet sich als Produkt aus Wahrscheinlichkeit für den vorherigen Zustand

$P_i^{(l)}(z)$ mit $l - \Delta$ Leuchttürmen im betrachteten Lager i und der Änderungswahrscheinlichkeit $P_{i,\text{Änderung } \Delta}^{(l)}$ für genau l Leuchttürme. $P_i^{(l)}(z + 1)$ wird berechnet als

$$\sum_{\Delta=\max(-R, l-L)}^{\min(R, l)} P_i^{(l-\Delta)}(z) \cdot \sum_{l_1=\max(0, -\Delta)}^{\min(R, R-\Delta)} P_{i,\text{Änderung } \Delta}$$

mit $P_{i,\text{Änderung } \Delta}$ als

$$\sum_{l_1=\max(0, -\Delta)}^{\min(R, R-\Delta)} H(S_1, l-\Delta, R, l_1) H(S_2, L-l+\Delta, R, \Delta+l_1)$$

sowie mit der initialen Wahrscheinlichkeitsdichte der Leuchtturmanzahl l :

$$P_i^{(l)}(0) = \begin{cases} 1 & \text{für } l = L_i(0) \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Die Summationsgrenzen stellen sicher, dass die mögliche Leuchtturmanzahl $l - \Delta \in [0, L]$ sowie die Transportmenge R eingehalten werden.

Für das gekoppelte System mit den Zuständen $0 \dots L$ Leuchttürme ergibt sich für jeden Zyklus z eine Matrix mit den Wahrscheinlichkeiten für jede mögliche Leuchtturmanzahl l je Lager i bzw. die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion.

Zur Veranschaulichung folgt ein Beispiel für zwei exemplarische Zerlegungen der Änderung. Im ersten Zyklus sinkt die Anzahl der Leuchttürme in Lager 1 von 10 auf 8 ($\Delta = -2$). Bei einer Transportmenge von $R = 5$ gibt es mehrere mögliche Konfigurationen. Es können z. B. keine Leuchttürme aus Lager 2 hinzukommen ($l_2 = 0$) gleichzeitig werden zwei Leuchttürme von Lager 1 zu Lager 2 ($l_1 = 2$) transportiert. Alternativ kann auch ein Leuchtturm aus Lager 2 zurückkommen, und gleichzeitig werden 3 Leuchttürme von Lager 1 zu Lager 2 transportiert ($l_1 = 3, l_2 = 1$). Die Summe über Δ berücksichtigt alle möglichen Zerlegungen. Die Gesamtwahrscheinlichkeit ist die Summe aller Realisierungen, die die Änderung Δ bewirken können.

Mithilfe der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion lässt sich die Wahrscheinlichkeit einer bestimmten Anzahl an Leuchttürmen l im betrachteten Lager zu jedem Zeitpunkt darstellen. Im Folgenden wird ein konkretes Beispiel mit den Anfangsbedingungen $L_1(0) = 10$ und $L_2(0) = 5$ betrachtet. Der Verlauf ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte im Gleichgewichtszustand nach ausreichend vielen Zyklen konvergiert gegen

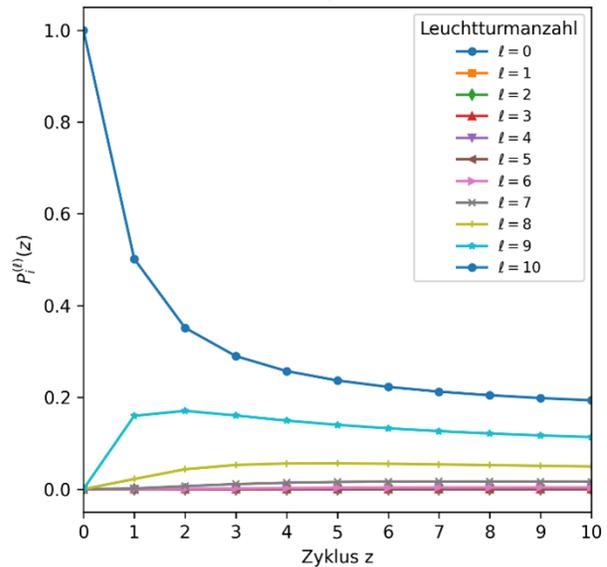


Abbildung 1: Grenzwahrscheinlichkeit für genau l Leuchttürme in Abhängigkeit von der Zykluszahl mit $L_1(0) = 10, B_1(0) = 290, R = 10$ in Lager 1

eine hypergeometrische Verteilung mit $H(S_1 + S_2, L_1 + L_2, R, m)$ und ist in Abbildung 2 dargestellt.

Aufgrund dieser Feststellung lässt sich der Erwartungswert im Gleichgewichtszustand durch eine hypergeometrische Ziehung nach $H(S_1 + S_2, L_1 + L_2, R, m)$ direkt berechnen. Der Erwartungswert der hypergeometrisch verteilten Leuchtturmanzahl berechnet sich im Allgemeinen mit:

$$E = R \cdot \frac{M}{N}$$

Auch kumulierte Wahrscheinlichkeiten, z. B. der Fall von weniger als 5 Leuchttürmen in einem Lager, können berechnet und wie in Abbildung 3 im zeitlich diskreten Verlauf dargestellt werden.

Für eine Einschätzung der Entwicklung der Leuchtturmanzahl mit steigender Zykluszahl kann der Erwartungswert betrachtet werden. Der Erwartungswert der Zufallsgrößen $L_i(z)$ ist definiert als

$$E[L_i(z)] = \sum_{l=0}^L l \cdot P_i^{(l)}(z)$$

Damit lassen sich die konkreten Erwartungswerte in den beiden Lagern mit $E_i(z) = E[L_i(z)]$ berechnen. Die Erwartungswerte konvergieren für große Zykluszahlen z gegen einen Grenzwert, der nachfolgend bestimmt wird.

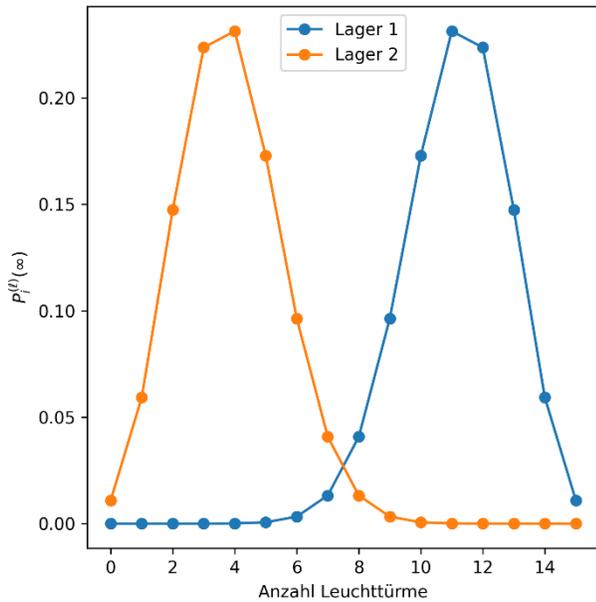


Abbildung 2: Finale Wahrscheinlichkeitsdichte für beide Lager mit $L_1(0) = 10, B_1(0) = 290, L_2(0) = 5, B_2(0) = 95, R = 10$

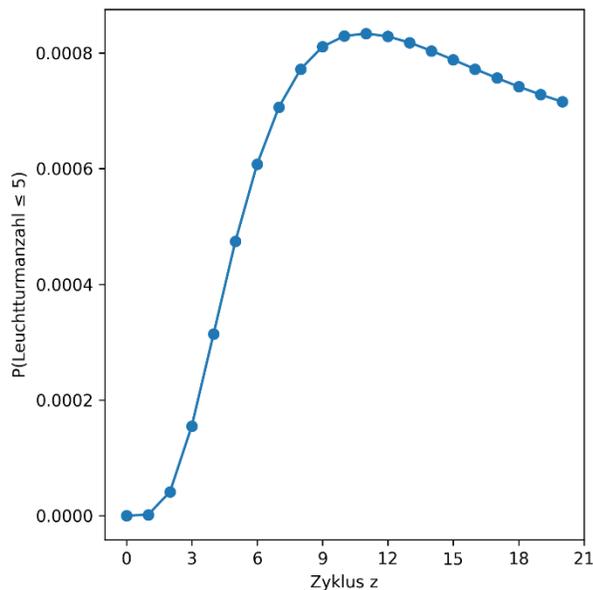


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeit für ≤ 5 Leuchttürme in Lager 1 in Abhängigkeit von der Zykluszahl für die Parameter $L_1(0) = 10, B_1(0) = 290, R = 10$

Das Verhältnis vom Erwartungswert $E_i(z)$ der Leuchtturmanzahl zur Gesamtanzahl der Behälter im betrachteten Lager S_i wird folgend als Konzentration $c_i(z)$ definiert.

$$c_i(z) = \frac{E_i(z)}{S_i}$$

Für diese Änderung ergibt sich für den diskret betrachteten Fall ein System aus Differenzgleichungen:

$$c_1(z+1) - c_1(z) = \frac{R}{S_2} \cdot c_2(z) - \frac{R}{S_1} \cdot c_1(z)$$

$$c_2(z+1) - c_2(z) = \frac{R}{S_1} \cdot c_1(z) - \frac{R}{S_2} \cdot c_2(z)$$

mit den Anfangsbedingungen

$$c_i(0) = \frac{E_i(0)}{S_i} = \frac{L_i(0)}{S_i}$$

Als Lösung des Systems ergibt sich

$$c_i(z) = A_i \cdot \left(1 - \frac{R}{S_1} - \frac{R}{S_2}\right)^z + D_i$$

$$c_i(z) = A_i \cdot e^{\ln\left(1 - \frac{R}{S_1} - \frac{R}{S_2}\right) \cdot z} + D_i$$

mit $A_i = \frac{L_i(0)}{S_i} - D_i$ und $D_i = \frac{S_i}{S_1 + S_2} \cdot \left(\frac{L_1(0)}{S_1} + \frac{L_2(0)}{S_2}\right)$ und $b = \ln\left(1 - \frac{R}{S_1} - \frac{R}{S_2}\right)$ als

$$c_i(z) = A_i \cdot e^{bz} + D_i$$

Für kontinuierliche Prozesse kann die Änderung der Leuchtturmkonzentration als Differentialgleichung betrachtet werden. Damit ergibt sich für $\dot{c}_1(t)$ und $\dot{c}_2(t)$ das gekoppelte Differentialgleichungssystem:

$$\dot{c}_1(t) = \frac{R}{S_2} \cdot c_2(t) - \frac{R}{S_1} \cdot c_1(t)$$

$$\dot{c}_2(t) = \frac{R}{S_1} \cdot c_1(t) - \frac{R}{S_2} \cdot c_2(t)$$

mit den Anfangsbedingungen wie oben beschrieben lautet die Lösung des gekoppelten Systems:

$$c_1(t) = D_1 + A_1 \cdot e^{-\left(\frac{R}{S_1} + \frac{R}{S_2}\right)t}$$

$$c_2(t) = D_2 - A_2 \cdot e^{-\left(\frac{R}{S_1} + \frac{R}{S_2}\right)t}$$

und mit $\beta = \left(\frac{R}{S_1} + \frac{R}{S_2}\right)$ entsprechend

$$c_1(t) = D_1 + A_1 \cdot e^{-\beta t}$$

$$c_2(t) = D_2 - A_2 \cdot e^{-\beta t}$$

Dabei sind D_1 bzw. D_2 die Gleichgewichtswerte nach ausreichend vielen Tauschzyklen, d. h. die Erwartungswerte der Grenzverteilung.

Der Verlauf des Erwartungswertes in Abhängigkeit von der Zeit kann dementsprechend als Exponentialfunktion wie in Abbildung 4 dargestellt werden.

Wie in der Abbildung dargestellt, entspricht β nicht exakt der Summe $\frac{R}{S_1} + \frac{R}{S_2}$. Dies war auch zu erwarten, da das Differentialgleichungssystem von einem kontinuierlichen System ausgeht.

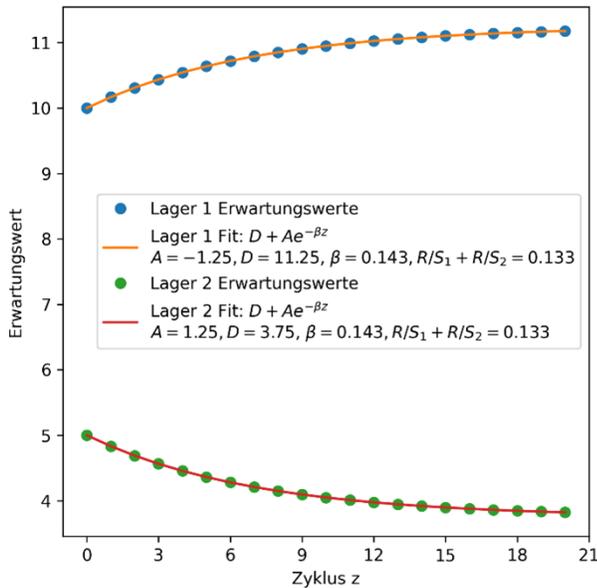


Abbildung 4: Exponentielle Regression der Erwartungswerte der Leuchtturmanzahl für beide Lager mit $L_1(0) = 10$, $B_1(0) = 290$, $L_2(0) = 5$, $B_2(0) = 95$, $R = 10$

Da nach der Taylor-Reihen-Approximation für $x \ll 1$ gilt: $\ln(1 - x) \approx -x$ folgt auch:

$$\begin{aligned} b &= \ln\left(1 - \frac{R}{S_1} - \frac{R}{S_2}\right) \approx -\frac{R}{S_1} - \frac{R}{S_2} \\ &= -\left(\frac{R}{S_1} + \frac{R}{S_2}\right) = -\beta \end{aligned}$$

Eine gute Annäherung an die Lösung der Differentialgleichung ergibt sich damit nur für kleine Raten R .

Für weitere, komplexere Betrachtungen mit beispielsweise zeitabhängigen Raten oder mehr als zwei Lagern wird dennoch eine Vereinfachung mittels Differentialgleichungen hilfreich sein.

Weiterhin findet in folgenden Betrachtungen ein Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen in Plant Simulation und den mathematisch berechneten Verteilungen statt. Für einfache Szenarien und Kreisläufe kann so ggf. auch

ohne Simulation direkt eine Wahrscheinlichkeit für eine bestimmte Anzahl an Leuchttürmen nach einer gewissen Zykluszahl berechnet werden.

4.3 SIMULATION ZUR BESTIMMUNG DER LEUCHTTURMANZAHL

Es wurde eine umfassende Simulationsstudie mit Siemens Plant Simulation durchgeführt. Ziel war es, verschiedene Behälterkreisläufe abzubilden (1-zu-1, Milkrun, Hub-and-Spoke und Peer-to-Peer) und den Einfluss verschiedener Parameter auf die benötigte Anzahl an Leuchttürmen zu untersuchen.

Die Modellierung erfolgte auf Basis von Eingangsdaten, die durch die LOGSOL GmbH ermittelt wurden. Dazu zählen Lagerkapazitäten, Transportmengen und -frequenzen. Es wurden drei verschiedene große Szenarien betrachtet. Es wurde eine Auslastung von 80 % der Lagerkapazität angenommen. Für das 1-zu-1-Modell sind die Parameter exemplarisch in Tabelle 3 dargestellt.

Kennzahl	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
Lagerkapazität 1	300 Stück	600 Stück	3000 Stück
Lagerkapazität 2	500 Stück	2500 Stück	3500 Stück
Durchschnittliche Transportdauer	3 Tage	3 Tage	3 Tage
Transportkapazität	50 Stück	102 Stück	600 Stück
Durchschnittliche Transportmenge	5 Stück	15 Stück	300 Stück
Minimale Transportmenge	1 Stück	1 Stück	6 Stück
Maximale Transportmenge	37 Stück	75 Stück	600 Stück
Standardabweichung	4 Stück	10 Stück	180 Stück
Häufigkeit der Buchung	Alle 6 Tage eine Buchung	Alle ca. 2 Tage eine Buchung	2 Buchungen pro Tag

Tabelle 3: Simulationsszenarien aus Realdaten beispielhaft für das 1-zu-1-Modell

Für die einzelnen Experimente der Simulationsszenarien wurde die Anzahl der Anfangsbestände an Leuchttürmen und Bojen festgelegt. Die zentrale Fragestellung der Untersuchung besteht darin, das optimale Verhältnis von

Leuchttürmen zu Bojen zu bestimmen, um eine kontinuierliche Bestandserfassung mit gewisser Prognosegüte in allen Lagern sicherzustellen. Dazu wurde die Anzahl der Leuchttürme stetig erhöht, wobei die Gesamtanzahl an Behältern, d. h. Leuchttürmen und Bojen, pro Experiment konstant gehalten wurde. Für die verschiedenen Simulationsszenarien wurden die gleichen Verhältnisse untersucht.

Pro Experiment wurden jeweils 20 Wiederholungen durchgeführt, um Mittelwert und Standardabweichung der Ergebnisse zu bestimmen. Über den Simulationszeitraum von einem Jahr wurden die Bestände in den einzelnen Lagern dokumentiert und analysiert.

Es zeigt sich eine klare Abhängigkeit von der Anfangszahl der Leuchttürme (Abbildung 5). Im 1-zu-1-Modell wird im Szenario 1 bereits mit 12 Leuchttürmen die kritische Schwelle in beiden Lagern vermieden. Die Aussage ist jedoch nicht generalisierbar. Die Analyse muss für jeden Kreislauf separat betrachtet werden.

Für einen geplanten Realtest wurde ein weiteres Szenario 4 simuliert, um einen Vergleich von Simulationsergebnissen herstellen zu können. Der Realtest ist als 1-zu-1-Modell geplant. Der Realtest wird über wenige Tage durchgeführt, die Simulation lief über 14 Tage. Die Parameter für die Simulation sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4: Simulationsszenario 4 für den Realtest des 1-zu-1-Modells

Kennzahl	Szenario 4
Lagerkapazität 1	90 Stück
Lagerkapazität 2	90 Stück
Durchschnittliche Transportdauer	10 min
Transportkapazität	10 Stück
Durchschnittliche Transportmenge	5 Stück
Minimale Transportmenge	1 Stück
Maximale Transportmenge	10 Stück
Standardabweichung	3 Stück
Häufigkeit der Buchung	Alle 30 min eine Buchung

Durch die geringe Lagerkapazität wurde in diesem Fall die Dauer mit weniger als zwei Leuchttürmen betrachtet.

Mit 4 bis 5 Leuchttürmen im System ist die Dauer mit weniger als zwei Leuchttürmen in beiden Lagern sehr niedrig (Abbildung 6). Ein Vergleich mit den Ergebnissen des Realtests steht aus.

Die Ergebnisse zeigen einen sigmoidalen Verlauf für die Dauer mit weniger als x Leuchttürmen (vgl. Abbildung 5 und Abbildung 6), der mit einer logistischen Regression angepasst werden kann. Die Herausforderung im konkreten Anwendungsfall besteht darin, auch bei komplexen Behälterkreisläufen, die nicht in die untersuchten Schemata passen, eine Aussage zur nötigen Anzahl an Leuchttürmen zu treffen.

In nächsten Schritten werden die Simulationsergebnisse durch Hardwaretests ergänzt. Dabei gilt es z. B. zu validieren, wie viele Bojen ein einzelner Leuchtturm tatsächlich zuverlässig erfassen kann. Mit dem Realtest wird ein Vergleich zu den Ergebnissen der Simulation sowie der mathematischen Betrachtung möglich.

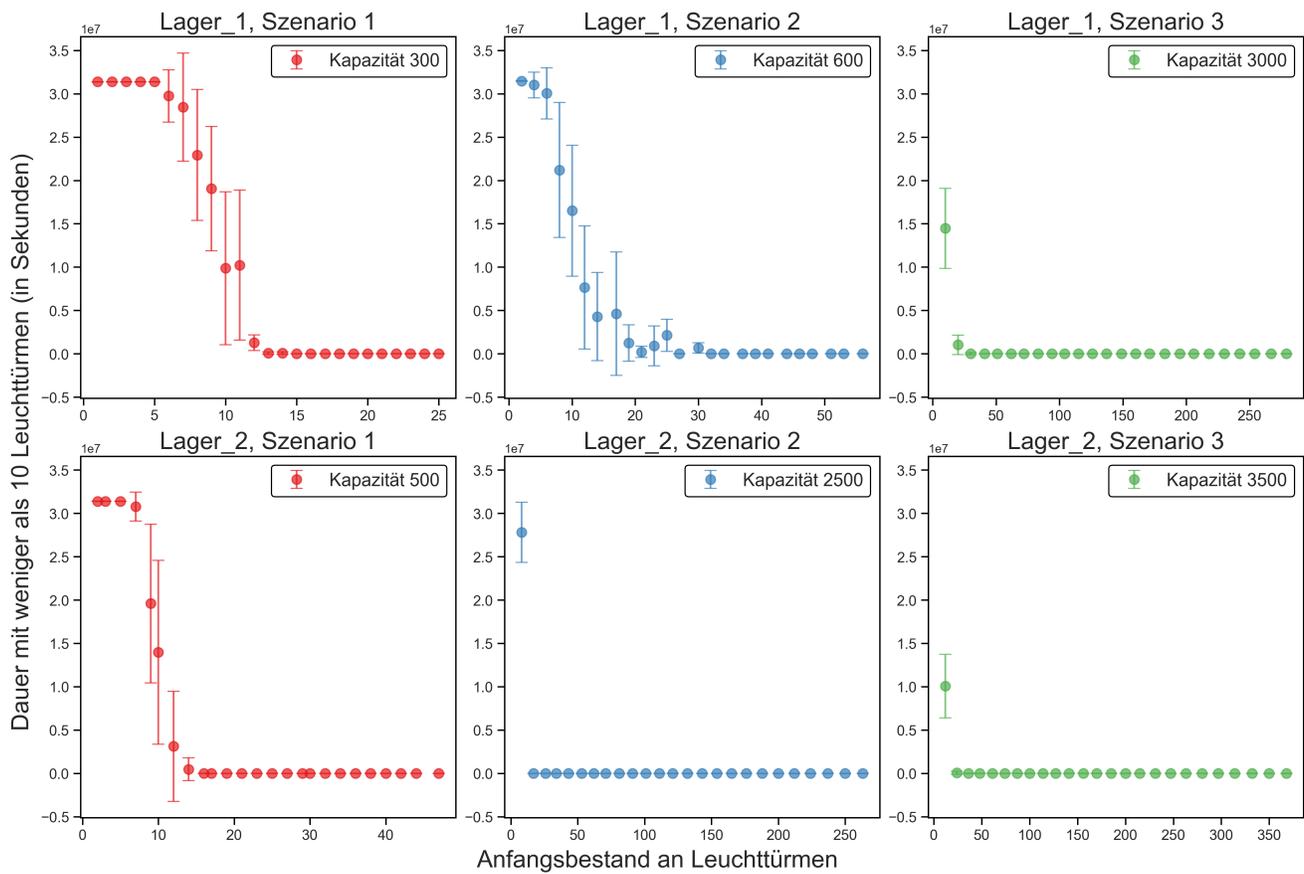


Abbildung 5: Dauer mit weniger als 10 Leuchttürmen in Abhängigkeit von der Anfangszahl an Leuchttürmen, für drei Szenarien (Spalten) und verschiedene Lager (Zeilen) im 1-zu-1-Modell

4.4 HARDWAREAUSWAHL UND VORVERSUCHE

Bei der Auswahl der Leuchtturmtechnologie wurde nach einem frei erhältlichen GPS-Tracker gesucht, welcher bei zuverlässigem Betrieb eine hohe Erkennungsgenauigkeit der Bojen gewährleistet. Dabei wurden Geräte der Firma digitalmatter [39] ausgewählt, welche zusammen mit Server und API-Infrastruktur von verschiedenen Unternehmen angeboten werden und so einfach in bestehende Logistiksysteme zu integrieren sind.

Für die Bojen werden generische BLE-Beacons verwendet, welche standardisierte Sendeprotokolle wie iBeacon und Eddystone verwenden und so vom Leuchtturm erkannt werden können. Dabei können die Sendeintervalle anwendungsspezifisch angepasst werden, um die Batterielaufzeit zu verlängern, welche bei Standardeinstellungen bei ca. 5 Jahren liegt [40].

Für erste Versuche zur Bestimmung der Hardwareeigenschaften wurde ein Python-Workflow entwickelt, in welchem der Soll-Zustand aus einer Excel-Tabelle eingelesen und mit dem Ist-Zustand, welcher aus den Messwerten des Leuchtturms hervorgeht, verglichen. So können vollautomatisiert verschiedene Versuche ausgewertet werden. Dabei wurde bisher vor allem die Erkennungsrate in verschiedenen Szenarien untersucht.

Besonders auffällig war dabei die von einem Leuchtturm begrenzte Anzahl an gleichzeitig zu erkennenden Geräten. Dabei kann der hier verwendete Leuchtturm lediglich 100 BLE-Geräte gleichzeitig erkennen [41]. Bei weniger als 100 Bojen wurden auch über längere Zeiträume alle erkannt. Ein Beispielversuch ist in Abbildung 7 visualisiert, wobei stündlich 10 Bojen entfernt wurden. Dabei stimmen die Soll-Werte in orange mit den Messwerten (6 pro Stunde) in blau vollständig überein.

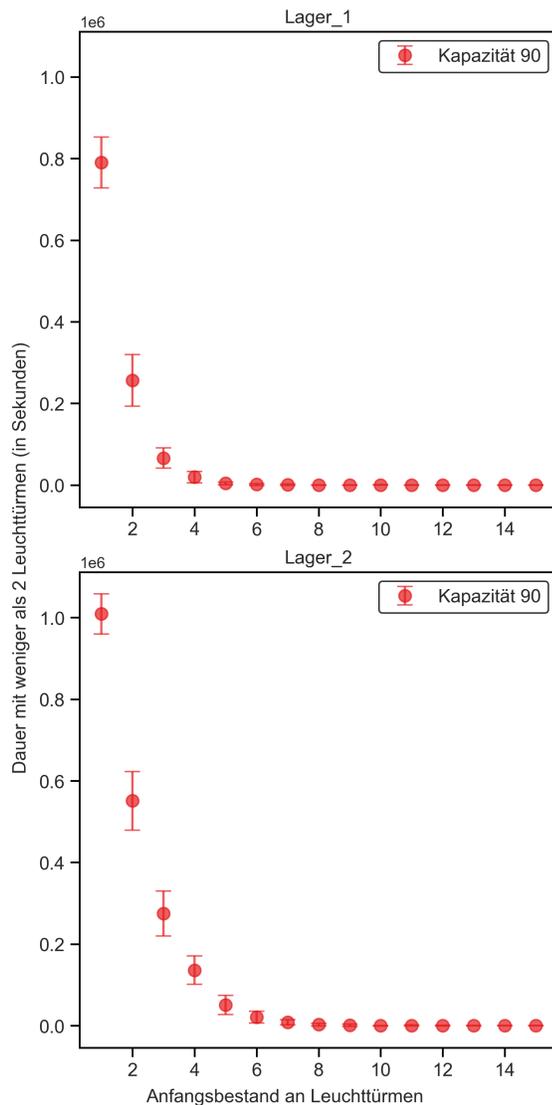


Abbildung 6: Dauer mit weniger als 2 Leuchttürmen in Abhängigkeit von der Anfangszahl an Leuchttürmen, für Szenario 4) im 1-zu-1-Modell

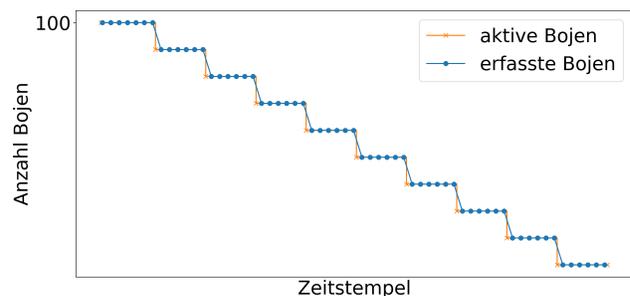
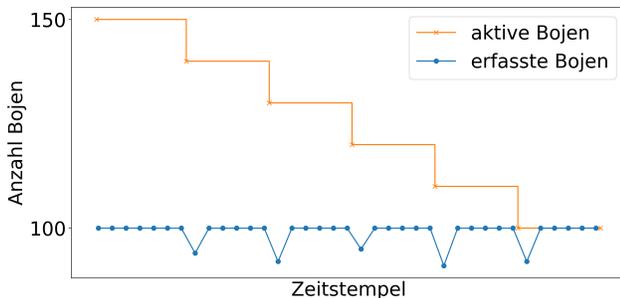


Abbildung 7: Vergleich aktiver und erfasster Bojen bei stündlichem Entfernen von je 10 Bojen mit Startwert 100 Bojen

Bei einem ähnlichen Versuch mit 150 zu 100 Bojen (Abbildung 8) ist zu erkennen, dass es zumindest für je eine Messung einen Einbruch der Bojenanzahl gibt, obwohl weiterhin mehr als 100 Bojen erkannt werden könnten. Dies ist

bisher nicht zu erklären und benötigt weitere Versuche mit der Hardware.



7 FÖRDERUNG

Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.



Kofinanziert von der Europäischen Union



Diese Maßnahme wird mitfinanziert durch Steuermittel auf der Grundlage des vom Sächsischen Landtag beschlossenen Haushaltes.

LITERATUR

- [1] N. Bunde, “Covid-19 und die industrie: Führt die krise zum rückbau globaler lieferketten?” vol. 74, no. 1, pp. 54–57, 2021, uRL: <https://www.ifo.de/publikationen/2021/aufsatzzeitschrift/covid-19-und-die-industrie-fuehrt-die-krise-zum-rueckbau>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [2] A. Murrenhoff and M. Friedrich, Martin und Witthaut. Künstliche intelligenz in der logistik.
- [3] B. Gesing, S. J. Peterson, und D. Michelsen, “Artificial intelligence in logistics,” p. 3, 2018.
- [4] R. Carbonneau and R. Laframboise, Kevin und Vahidov, “Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting,” *European Journal of Operational Research*, vol. 184, no. 3, pp. 1140–1154, 2008.
- [5] M. Freitag and J. Kotzab, Herbert und Pannek, Eds., *Dynamics in Logistics: Proceedings of the 6th International Conference LDIC 2018, Bremen, Germany*, 1st ed., ser. Lecture Notes in Logistics. Cham: Springer International Publishing and Imprint: Springer, 2018.
- [6] Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH. Ki für den menschen – intelligente lösungen für die wissensgesellschaft. URL: <https://www.dfki.de/web>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [7] ——. Plass – plattform für analytische supply chain management services. URL: <https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekt/plass>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [8] ——. Climactic - dynamische planung in der individuellen fertigung entlang der supply chain (preparation phase). URL: <https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekt/climactic>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [9] infsoft GmbH. Ultra-wideband for indoor positioning – rtls by infsoft. URL: <https://www.infsoft.com/basics/positioning-technologies/ultra-wideband/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [10] Identible GmbH. Rfid-transponder, tags & rfid-chips kaufen - identifiable. URL: <https://www.identible.de/rfid-transponder/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [11] infsoft GmbH. Technologien für serverseitige indoor positionsbestimmung im vergleich: Wlan vs. ble vs. uwb vs. rfid. URL: <https://www.infsoft.com/de/blog/technologien-fuer-serverseitige-indoor-positionsbestimmung-im-vergleich/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [12] BeaconTrax Inc. Blue-tooth ble devices, location & tracking iot software solution. URL: <https://www.beacontrax.com/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [13] Telekom Deutschland GmbH. Live-tracking mit langer batterielaufzeit — iot telekom. URL: <https://>

- iot.telekom.com/de/loesungen/low-cost-tracker, abgerufen am: 12.08.2025.
- [14] N. Lee. Warum ist ein bluetooth-beacon für vermarkter so attraktiv?? URL: <https://www.mokosmart.com/bluetooth-beacon/>, abgerufen am: 08.03.2023.
- [15] TiProNet GPS Tracker & Dashcams. Gps tracker logistik. URL: <https://www.tipronet.net/gps-tracker-gueter-und-container>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [16] P. Du, J. Wang, W. Yang, and T. Niu, “Container throughput forecasting using a novel hybrid learning method with error correction strategy,” *Knowledge-Based Systems*, vol. 182, p. 104853, 2019.
- [17] R. Y. Zhong, G. Q. Huang, S. Lan, Q. Dai, X. Chen, and T. Zhang, “A big data approach for logistics trajectory discovery from rfid-enabled production data,” no. 165, pp. 260–272, 2015.
- [18] J. Xiao, Y. Xiao, J. Fu, und K. K. Lai, “A transfer forecasting model for container throughput guided by discrete pso,” vol. 1, no. 27, pp. 181–192, 2014.
- [19] Y. Yan, A. H. Chow, C. P. Ho, Y.-H. Kuo, Q. Wu, and C. Ying, “Reinforcement learning for logistics and supply chain management: Methodologies, state of the art, and future opportunities,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 162, p. 102712, 2022.
- [20] M. Fasli and Y. Kovalchuk, “Learning approaches for developing successful seller strategies in dynamic supply chain management,” *Information Sciences*, vol. 181, no. 16, pp. 3411–3426, 2011.
- [21] S. A. Raza, S. M. Govindaluri, und M. K. Bhutta, “Research themes in machine learning applications in supply chain management using bibliometric analysis tools,” 2022.
- [22] N. A. Chowdhury, S. M. Ali, S. K. Paul, Z. Mahtab, and G. Kabir, “A hierarchical model for critical success factors in apparel supply chain,” *Business Process Management Journal*, vol. 26, no. 7, pp. 1761–1788, 2020.
- [23] J. Farhat and M. Owayjan, “Erp neural network inventory control,” *Procedia Computer Science*, vol. 114, pp. 288–295, 2017.
- [24] A. Kara und I. Dogan, “Reinforcement learning approaches for specifying ordering policies of perishable inventory systems,” no. 91, pp. 150–158, 2018.
- [25] Packwise GmbH. Whitepaper: Smarte ibc-container und industrial iot in der prozessindustrie. URL: <https://www.packwise.de/whitepaper-industrial-iot-ibc-managemen>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [26] A. J. Trappey, C. V. Trappey, and C.-R. Wu, “Genetic algorithm dynamic performance evaluation for rfid reverse logistic management,” *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 11, pp. 7329–7335, 2010.
- [27] Alpega Group. Behältermanagement-software — alpega group. URL: <https://www.alpegagroup.com/de/tms/transportloesungen/behaeltermangement/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [28] 4flow SE. Behältermanagement - 4flow. URL: <https://www.4flow.de/loesungen/digitale-supply-chain/behaeltermangement.html>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [29] BLG Logistics Group. Behältermanagement. URL: <https://www.blg-logistics.com/behaeltermangement>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [30] Acteos S.A. Rfid-gate — acteos. URL: <https://www.acteos.de/loesungen/rfid-gate>, abgerufen am: 08.03.2023.
- [31] comepack GmbH. Tracking & tracing — automatisieren sie ihre abläufe — comepack. URL: <https://www.comepack.de/tracking-tracing/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [32] Institut für Operations Research und Management GmbH. White paper: Mit machine learning zu verlässlichen lieferzeiten. URL: <https://www.inform-software.de/strategien/white-paper-wiederbeschaffungszeiten>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [33] —. Trendreport digitalisierung scm. URL: <https://www.inform-software.de/supply-chain-management/trendreport-digitalisierung>, abgerufen am: 08.03.2023.
- [34] —. Innerbetriebliche werkstransporte: Ein wirtschaftsbereich am wendepunkt? URL: <https://www.inform-software.de/logistik/transportleitsystem/studie>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [35] infsoft GmbH. Bluetooth beacons for tracking and indoor navigation. URL: <https://www.infsoft.com/basics/positioning-technologies/bluetooth-low-energy-beacons/>, abgerufen am: 12.08.2025.
- [36] M. M. Raikar, K. Angadi, S. Reddy, N. Naik, and A. Doddwada, “Fleet tracking and geofencing using the internet of things (iot),” in *2023 Third International Conference on Secure Cyber Computing and Communication (ICSCCC)*. IEEE, 5262023, pp. 463–468.
- [37] Z. OZDEMIR and B. TUGRUL, “Geofencing on the real-time gps tracking system and improving gps accuracy with moving average, kalman filter and logistic regression analysis,” in *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. IEEE, 102019, pp. 1–6.
- [38] LOGSOL GmbH. Behältermanagement mit binman®. URL: <https://www.logsol.de/logistiksoftware/behaeltermangement-binman/>, abgerufen am: 22.08.2025.
- [39] Digital Matter. Connect, protect, and derive more value from your assets. URL: <https://www.digitalmatter.com/>, abgerufen am: 20.08.2025.
- [40] BlueUp Srl. Forte+ ble. URL: <https://www.blueupbeacons.com/forte-plus-ble/>, abgerufen am: 20.08.2025.

[41] Digital Matter. Oyster edge. URL: <https://www.digitalmatter.com/devices/oyster-edge/>,
abgerufen am: 20.08.2025.

strategies in material flow, formal verification of control logic, power analysis of distributed and self-controlled systems, lightweight structures in material flow, and stress analysis of wire ropes and timing belts.

Dipl.-Ing. Bettina Wessel, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2024. Between 2012 and 2021 she studied Mechanical Engineering at the TU Dresden.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-32538,
E-Mail: thorsten.schmidt@tu-dresden.de

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-34345,
E-Mail: bettina.wessel@tu-dresden.de

Dipl.-Ing. Niclas Grunert, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2025. Between 2017 and 2024 he studied Mechanical Engineering at the TU Dresden.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-32532
E-Mail: niclas.grunert@tu-dresden.de

Rico Zöllner, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2022. Between 2009 and 2014 he studied Mathematics at the TU Dresden. He received his Dr. rer. nat. from the TU Dresden in 2021.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-34398,
E-Mail: rico.zoellner@tu-dresden.de

Dr.-Ing. Mathias Kühn, Research Assistant at the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden since 2014. Between 2007 and 2014 he studied Mechanical Engineering at the TU Dresden. He received his Ph.D. from the TU Dresden in 2021.

Address: Technische Universität Dresden, Professur für Technische Logistik, 01062 Dresden, Germany, Phone: +49 351 463-32112,
E-Mail: mathias.kuehn@tu-dresden.de

Prof. Dr.-Ing. Thorsten Schmidt, Head of the Chair of Logistics Engineering, TU Dresden. Prof. Thorsten Schmidt is full professor at the TU Dresden and heads the Chair of Logistics Engineering at the Mechanical Engineering Faculty since 2008. He holds a diploma degree in Mechanical Engineering (TU Dortmund) and a master degree in Industrial Engineering (Georgia Institute of Technology). He received his Ph.D. from the TU Dortmund in 2001. His current research interest include energy-efficient control