Simulation in Produktion
und Logistik 2019
Matthias Putz & Andreas Schlegel (Hrsg.)
Wissenschaftliche Scripten, Auerbach 2019

Simulation zur Evaluation der Optimierung eines Bikesharing-Systems

Simulation to evaluate an optimization of a bike sharing system

Christian Müller, Jochen Gönsch, Universität Duisburg-Essen, Duisburg (Germany),
Christian.Mueller.9@uni-due.de, jochen.goensch@uni-due.de

Abstract: Bike sharing has been introduced in many cities, often by municipalities and is nowadays an established alternative for other short-distance transport systems. However, in cities with high elevations, the usual bike-sharing systems face a severe problem. Resulting from an imbalance of demand, the number of bikes at stations at elevated locations decreases during the day, while it increases at stations at lower locations. This situation poses a challenge for the relocation process because high numbers of bicycles have to be transported to the stations at elevated locations in order to achieve a suitable starting point for the next period. With the usage of e-bike sharing-systems, this problem can be circumvented because e-bikes facilitate the mobility in elevated and steep terrains. This paper considers an e-bike sharing-system with removable batteries. In the first step, a deterministic Mixed-Integer Linear Program (MILP) calculates the optimal route for trucks and the optimal initial distribution of bikes. In the second step, a stochastic simulation should evaluate these results.

1 Motivation und Problemstellung

Der Klimawandel ist in den letzten Jahrzehnten eines der dominierenden Themen in der Presse. Bürger großer Städte erfahren Nachteile aufgrund des steigenden Verkehrs und der damit verbundenen Luftverschmutzung. Viele Gemeinden und Städte erkennen die Problematik und erweitern die Verkehrsalternativen durch die Förderung der Öffentlichen Verkehrsmittel, aber auch durch die Einführung von Bikesharing-Systemen. Einfache Bikesharing-Systeme funktionieren im flachen Gelände gut, allerdings gibt es einige Probleme in hügeligen Regionen. So kann z.B. die Nachfrage, abhängig ob im Tal oder auf dem Berg, sich deutlich unterscheiden, was zu einem Ungleichgewicht der Nachfrage zwischen unterschiedlichen Stationen führt. Um dies in hügeligen Gebieten zu verhindern, gibt es beispielsweise in Deutschland bereits in den Städten Aachen, Stuttgart und Wuppertal E-Bikesharing-Systeme mit fest installierten Batterien. Bei Fahrrädern mit fest installierten Batterien ist das Fahrrad allerdings während des Ladevorgangs nicht verfügbar. Daher wird in diesem Beitrag

ein Bikesharing-System mit wechselbaren Batterien betrachtet. Hierdurch soll die Verfügbarkeit eines Fahrrads gesteigert werden.

Die Stationen für das Bikesharing sind deshalb in zwei Abschnitte unterteilt. Der erste Bereich sind handelsübliche Fahrradständer und der zweite ist eine Ladestation für die austauschbaren Batterien (siehe Abb. 1). Die Universität von Tennessee-Knoxville führte so ein System mit austauschbaren Batterien ein (Ji et al. 2014). Für jede Station ist die Kapazität an Rädern und Batterien gegeben. Um ein E-Bike auszuleihen, wird eine Smartphone-App benötigt. Bei Start der Leihe an einer Station, bekommt der Kunde aus der Ladestation eine geladene Batterie, die er in das Fahrrad einsetzen kann. Beendet der Kunde die Leihe, trennt er die Batterie vom Fahrrad und bringt die Batterie zur Ladestation. Das Rad stellt er in einen Fahrradständer. Erst dann ist die Leihe beendet. Dieser Prozess hat zwei Vorteile. Die Räder sind unabhängig von einer speziellen Batterie, da Kunden dasselbe Fahrrad einfach mit einer anderen Batterie nutzen können. Des Weiteren hat das Fahrrad keine Ausfallzeit, da die Batterien losgelöst vom Fahrrad geladen werden.

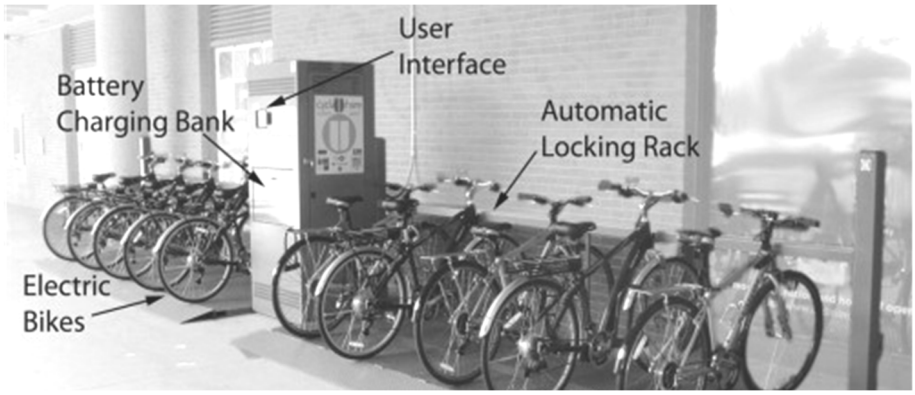

Abbildung 1: *Systemkomponenten eines E-Bikesharing-Systems (Ji et al. 2014)*

Ein solches Bikesharing-System soll mit Hilfe eines Mixed-Integer Linear Program (MILP) optimiert werden. In dem deterministischen Modell sind die Parameter durch historische Daten gegeben. Ein Teil der Ergebnisse, wie die Fahrt der LKW zur Relokation der Räder oder die Anfangsbestände der Batterien und Räder, die das Modell bestimmt, gehen als Parameter in die Simulation ein. In der Simulation ist das Setting nicht mehr deterministisch. So sind die Ankunftsraten der Kunden an den Stationen gegeben. Konkrete Ankünfte der Kunden an einer Station sowie ihr Ziel sind stochastisch. Die Simulation simuliert vielfach die gegebene Situation. Die Durchschnittswerte der Ergebnisse werden mit der Lösung des MILPs verglichen.

2 Abgrenzung des Themas

Seit 2000 gibt es einige Beiträge zum Thema Sharing-Systeme. Einige Veröffentlichungen geben einen Überblick und eine Struktur des Themas „Bike-Sharing“ wie Laporte et al. (2015) oder Gönsch und Kruk (2017). Gönsch und Kruk unterteilen die stationsbasierten Bikesharing-Systeme in zwei Planungsebenen (Abb. 2). Die erste Planungsebene umfasst alle strategischen und taktischen Entscheidungen. Veröffentlichungen in diesem Bereich behandeln Themen wie die optimalen Standorte von Stationen oder die Flottengröße. Die andere Planungsebene ist die operative Ebene. Beiträge zu dieser Planungsebene betrachten u.a. Station Inventory, welche die Bestimmung der optimalen Anzahl der Fahrräder an jeder Station darstellt (Laporte et al. 2015). Aus der optimalen Stationsbestückung ergeben sich Möglichkeiten für die Repositionierung. Es gibt zwei Arten der Repositionierung. Der erste Aspekt ist die aktive Relokation. Diese wird durch den Betreiber des Bikesharing-Systems mit Hilfe von Fahrzeugen durchgeführt. Die aktive Relokation kann statisch oder dynamisch durchgeführt werden. Bei einer dynamischen Relokation wird diese über den ganzen Tag während des laufenden Betriebs durchgeführt. Die statische Relokation findet dagegen statt, wenn das System außer Betrieb ist, z.B. am Ende des Tages. Eine andere Möglichkeit ist die passive Relokation. Dabei wird versucht den Kunden durch Anreize (z.B. Rabatt) dazu zu bringen, eine Balance zwischen den einzelnen Stationen innerhalb des Bikesharing-Systems zu erhalten.

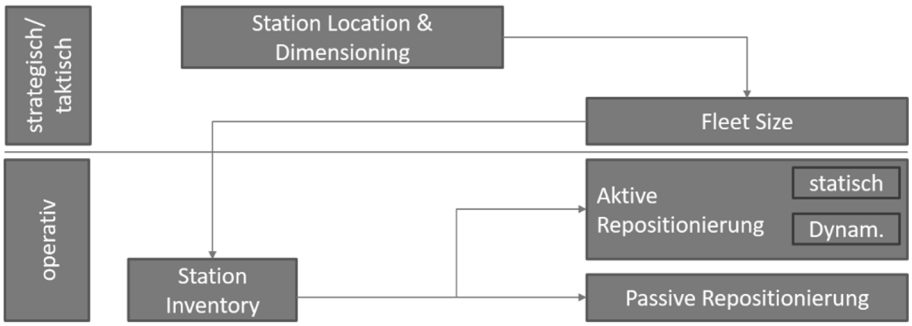

Abbildung 2: *Verschiedene Planungsebenen (Gönsch und Kruk 2010)*

Die vorliegende Veröffentlichung konzentriert sich auf die operative Planungsebene mit aktiver, dynamischer Repositionierung für ein E-Bikesharing-System mit wechselbaren Batterien. Bis jetzt betrachten wenige Veröffentlichungen diesen Aspekt. So zeigen Boyaci et al. (2015) die Besonderheiten eines Sharing-Systems mit E-Fahrzeugen. Sie formulieren ein LP für ein one-way Carsharing-System, welches die Aufladezeiten für E-Autos berücksichtigt.

Es gibt ebenfalls Veröffentlichungen im Bereich der operativen Planungsbene, z.B. Vogel (2016). Er bestimmt die optimale Station Inventory für ein Bikesharing-System für jede Periode mit einem LP.

Auch im Bereich der dynamischen Repostionierung gibt es einige Veröffentlichungen. So betrachteten Contardo et al. (2012) eine dynamische

Repositionierung, welche die Station Inventory mit Hilfe von Transportfahrzeugen optimiert.

Barth und Todd (1999) zeigen eine warteschlangenbasierte, diskrete Ereignissimulation für ein E-Carsharing-System, welche die Flüsse der einzelnen Autos in den spezifischen Perioden betrachtet. Die Flüsse basieren auf den Nachfragedaten. Des Weiteren werden spezifische Lade- und Relokationsschemata verwendet. Die Simulation wird für einen Ferienort in Südkalifornien durchgeführt. Eine ähnliche Simulation beschreiben Barth et al. (2004) für kundenbasierte Relokation.

Der vorliegende Beitrag besteht sowohl aus der Optimierung als auch der Simulation eines Bikesharing-Systems mit wechselbaren Batterien. Hierbei werden sowohl die Ströme der Fahrräder als auch die Ströme der Batterien abgebildet und optimiert.

3 Lösungsansatz

Das Ziel des Vorhabens war ein Prozess zur Berechnung und Evaluation der Anfangsbestände der Räder und Kapazitäten von jeder Station sowie die Umverteilung der Räder. Bei der Simulation sind die Ankunftszeiten der Kunden an den jeweiligen Stationen und deren Ziel stochastisch. Mit Hilfe der Simulation können somit die berechneten Anfangsbestände und die Relokation bewertet werden. Am Ende des Prozesses zeigt der entwickelte Plan für ein Bikesharing-System gute Anfangsbestände von Batterien und Rädern sowie die Relokation. Es existieren drei Methoden zur Bewertung der Ergebnisse von Modellen mit Hilfe einer Simulation: Evolutionsmethode, Auswahlmethode und Sensitivitätsmethode. Bei der Evolutionsmethode wird ein vorhandenes Modell simuliert und die daraus resultierenden Ergebnisse bewertet, interpretiert und mögliche Verbesserungen abgeleitet (Zülch et al 1998). Die durchgeführte Simulation in diesem Paper basiert auf der Evolutionsmethode.

Die Struktur des Lösungsansatzes wird in Abbildung 3 dargestellt. Sie zeigt einen dreistufigen Prozess. Auf der ersten Stufe werden die notwendigen Daten so aufbereitet, dass sie im Modell als Inputparameter genutzt werden. Im zweiten Schritt optimiert das Modell Anfangsbestände und Routen der LKW für die Relokation. Die Eignung und Wertigkeit der Ergebnisse werden im letzten Schritt mit Hilfe der Simulation in Python bewertet. Als Ergebnis wird ein evaluiertes Bikesharing-System ausgegeben.

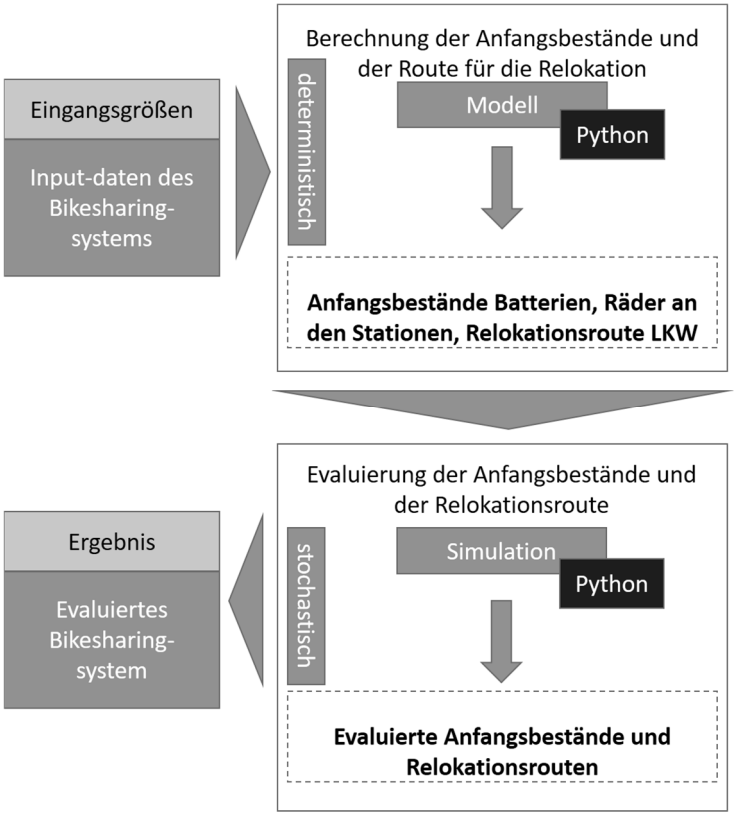

Abbildung 3: *Lösungsansatz zur Berechnung und Evaluierung des Bikesharing-Systems (in Anlehnung an März et al. 2011)*

4 Modellformulierung

Für das folgende Modell wird ein E-Bikesharing-System mit wechselbaren Batterien angenommen. Dabei sind die Anzahl der Stationen, Fahrräder und LKW für die Relokation gegeben. Da der Standort jeder Station bekannt ist, ist somit auch der Energieverbrauch für die Fahrt von einer Station zu einer anderen Station gegeben. Zur Vereinfachung wird der Ladestand diskretisiert und ein Fahrrad kann mehrere Perioden fahren, wenn die Strecke nicht zu viel Energie benötigt. Sobald die Batterien in der Aufladestation sind, werden sie aufgeladen. Die Relokation ist dynamisch.

Die meisten Bikesharing-Systeme werden hauptsächlich von 6 bis 20 Uhr genutzt, daher ist eine Tagesbetrachtung sinnvoll. Um das Problem etwas zu vereinfachen, gibt es die Annahme, dass sowohl der LKW als auch das Rad eine Periode benötigen, um von einer Station zu einer anderen Station zu gelangen. Der Ladestand der Batterie ist diskret, eine Fahrt benötigt h Ladestufen und pro Periode werden die Batterien um l Stufen geladen. Zu Beginn sind alle Batterien vollgeladen.

Das Modell entscheidet über die Anzahl von Batterien und Rädern, die transportiert werden. Die Anzahl der Räder, die von den Kunden genutzt werden, sowie die Anzahl

der Räder, die an den Stationen verbleiben, sind ebenfalls Variablen, die sich aber aus der Nachfrage ergeben.

Das Modell maximiert den Deckungsbeitrag, indem es die Anzahl an genutzten Rädern in jeder Periode auf Basis der gegebenen Nachfrage bestimmt. Um sicher zu stellen, dass in jeder Periode an jeder Station genügend Räder stehen, führen LKW die Repositionierung durch. Zu Beginn der Planung befinden sich die LKW im Depot (Periode 0), wo sie starten und zu ihrem ersten Ziel fahren. In der darauffolgenden Periode startet der LKW an der Station, an der er zuvor war. So hat man am Ende der Planung die Route der LKW berechnet.

Abbildung 4 zeigt die möglichen Flüsse zwischen drei Beispielstationen innerhalb von zwei Perioden in einem Time-Space-Network. Die gestrichelten Linien repräsentieren alle Batterien und Räder, die an einer Station verbleiben. Die Batterien werden innerhalb der Periode, die sie an der Station verbleiben, geladen, wenn sie nicht voll aufgeladen sind. Die durchgezogenen Linien zeigen die genutzten Räder, die von einer Station zu einer anderen Station fahren. Diese Räder sind mit einer Batterie ausgestattet, die ausreichend geladen ist. Der Ladezustand dieser Batterien verringert sich, während sie genutzt werden. Die gepunkteten Linien symbolisieren die Räder und Batterien, die transportiert werden. Der Ladestand der Batterien ändert sich während des Transports nicht.

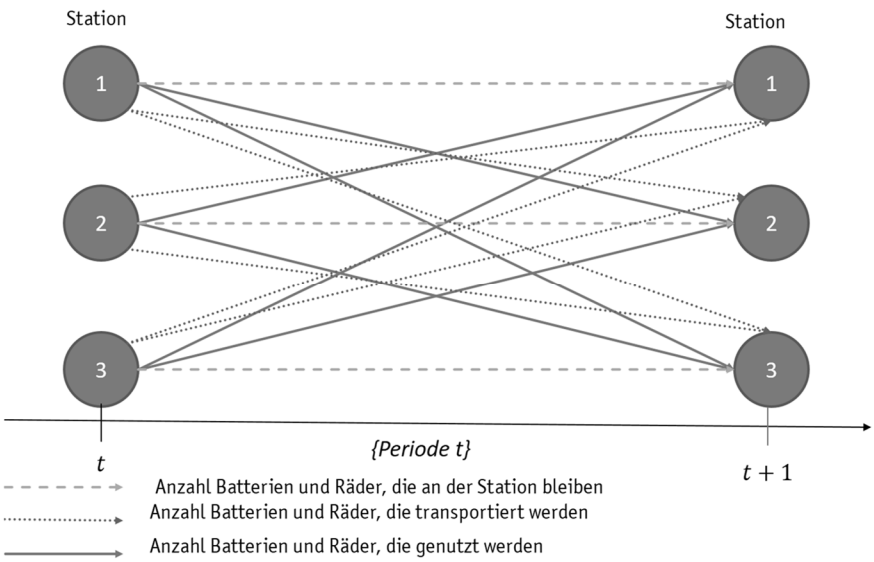

Abbildung 4: *Flüsse der Räder und Batterien*

Die Parameter und Variablen werden in den Tabellen 1 und 2 beschrieben.

Tabelle 1: *Parameter des Bikesharing-Modells*

Parameter	
$\boldsymbol{c_{i,j}}$	Kosten für die Fahrt eines LKW von Station i zu Station j
$\boldsymbol{c^{l}}$	Aufladekosten pro Ladestufe
$\boldsymbol{d_{i,j,t}}$	Nachfrage von Station i zu Station j in der Periode t
$\boldsymbol{g^{batterie}}$	Gewicht einer Batterie
$\boldsymbol{g^{rad}}$	Gewicht eines Rades
$\boldsymbol{kap^{transport}}$	Maximale Kapazität eines LKW
$\boldsymbol{kap_{i}^{batterie}}$	Maximale Kapazität der Station i für Batterien
$\boldsymbol{k_{i}^{rad}}$	Maximale Kapazität der Station i für Räder
$\boldsymbol{p_{i,j}}$	Preis für die Strecke von Station i nach Station j
$\boldsymbol{h}$	Verbrauch eines Fahrrades für eine Strecke [Ladestufen]
$\boldsymbol{B}$	Anzahl Batterien im Bikesharing-System
$\boldsymbol{F}$	Anzahl LKW zur Repositionierung im Bikesharing-System
$\boldsymbol{K}$	Maximaler Ladestand einer Batterie
$\boldsymbol{R}$	Anzahl Räder im Bikesharing-System
$\boldsymbol{l}$	Aufladerate

Tabelle 2: *Variablen des Bikesharing-Modells*

Variablen	
$\boldsymbol{x_{i,t}^{station}}$	Bestand an Rädern an der Station i zum Zeitpunkt t
$\boldsymbol{s_{i,j,t}}$	Anzahl LKW, die von Station i zu Station j in der Periode t fahren
$\boldsymbol{x_{i,j,t}^{fahrt}}$	Anzahl Räder, die von Station i zu Station j in der Periode t fahren
$\boldsymbol{x_{i,j,t}^{transport}}$	Anzahl Räder, die von Station i zu Station j in der Periode t repositioniert werden
$\boldsymbol{z_{k,i,j,t}^{transport}}$	Anzahl Batterien mit dem Ladezustand k, die von Station i zu Station j in der Periode t repositioniert werden
$\boldsymbol{z_{k,i,j,t}^{fahrt}}$	Anzahl Batterien mit dem Ladezustand k, die mit einem Rad von Station i zu Station j in der Periode t fahren
$\boldsymbol{z_{k,i,t}^{station}}$	Bestand an Batterien mit dem Ladzustand k, an der Station i zum Zeitpunkt t
$\boldsymbol{z_{k,i,t}^{laden}}$	Anzahl Batterien mit dem Ladezustand k, die an der Station i in der Periode t verbleiben

$$\max \sum_{i,j,t} x_{i,j,t} \cdot (p_{i,j} - h \cdot c^l) - \sum_{i,j,t} s_{i,j,t} \cdot c_{i,j} \quad (1)$$

s.t.

$$x_{i,t}^{station} \leq kap_i^{rad} \quad \forall i,t \quad (2)$$

$$\sum_k z_{k,i,t}^{station} \leq kap_i^{batterie} \quad \forall i,t \quad (3)$$

$$x_{i,j,t}^{fahrt} \cdot g^{rad} + \sum_k z_{k,i,j,t}^{transport} \cdot g^{batterie} \leq kap^{tansport} \cdot s_{i,j,t} \quad \forall i,j,t \quad (4)$$

$$x_{i,t}^{station} = x_{i,t-1}^{station} + \sum_j x_{j,i,t-1}^{fahrt} - \sum_j x_{i,j,t}^{fahrt} + \sum_j x_{j,i,t-1}^{transport} - \sum_j x_{i,j,t-1}^{transport} \quad \forall i,t \quad (5)$$

$$\sum_i s_{i,j,t} = \sum_i s_{j,i,t+1} \quad \forall t,j \quad (6)$$

$$z_{k,i,t}^{laden} = z_{k,i,t}^{station} - \sum_j z_{k,i,j,t}^{fahrt} - \sum_j z_{k,i,j,t}^{transport} \quad \forall k,i,t \quad (7)$$

$$z_{k,i,t}^{station} = \sum_j z_{k,j,i,t-1}^{transport} + \sum_j z_{k+h,j,i,t-1}^{fahrt} \quad \forall k: k < l, i, t \quad (8a)$$

$$z_{k,i,t}^{station} = \sum_j z_{k,j,i,t-1}^{transport} + z_{k-l,i,t-1}^{laden} + \sum_j z_{k+h,j,i,t-1}^{fahrt} \quad \forall k: l \leq k \leq K-h, i, t \quad (8b)$$

$$z_{k,i,t}^{station} = \sum_j z_{k,j,i,t-1}^{transport} + z_{k-l,i,t-1}^{laden} \quad \forall k: K-h < k < K, i, t \quad (8c)$$

$$z_{K,i,t}^{station} = \sum_j z_{K,j,i,t-1}^{transport} + \sum_{k'=K-l}^{K} z_{k',i,t-1}^{laden} \quad \forall i,t \quad (8d)$$

$$x_{i,j,t}^{fahrt} \leq d_{i,j,t} \quad \forall i,j,t \quad (9)$$

$$x_{i,j,t}^{fahrt} = \sum_{\substack{k: \\ k \geq h}} z_{k,i,j,t}^{fahrt} \quad \forall i,j,t \quad (10)$$

$$\sum_{\substack{k: \\ k < h}} z_{k,i,j,t}^{fahrt} = 0 \quad \forall i,j,t \quad (11)$$

$$\sum_i x_{i,0}^{station} = R \quad (12)$$

$$\sum_i z_{K,i,0}^{station} = B \quad (13)$$

$$\sum_{\substack{i,k: \\ k < K}} z_{k,i,0}^{station} = 0 \quad (14)$$

$$x_{i,j,0}^{fahrt} = 0 \quad \forall i,j \quad (15)$$

$$\sum_i s_{0,i,0} = F \quad (16)$$

$$s_{i,j,0} = 0 \quad \forall i,j,i \neq 0 \quad (17)$$

$$x_{i,t}^{station}, x_{i,j,t}^{fahrt}, x_{i,j,t}^{transport}, s_{i,j,t}, z_{k,i,j,t}^{station}, z_{i,t}^{laden}, z_{k,i,j,t}^{fahrt}, z_{k,i,j,t}^{transport} \in \mathbb{N} \quad (18)$$

Die Zielfunktion (1) maximiert den Deckungsbeitrag für das gesamte E-Bikesharing-System. Dafür werden die Fahrten multipliziert mit der Differenz zwischen dem Preis und den Ladekosten. Davon werden die Fahrtkosten für die LKW abgezogen. Die nächsten drei Nebenbedingungen (NB) sind Kapazitätsbedingungen. Hierbei beschränken NB 2 und NB 3 die Kapazität der Station auf die maximale Anzahl der Stellplätze für Batterien und Räder. Die NB 4 beschränkt das Ladevolumen eines LKWs. Die darauffolgenden drei Nebenbedingungen betrachten die Flüsse der Räder, Batterien und LKW. Dabei sind NB 5 und NB 6 klassische Flussgleichungen, die die Anzahl der Räder bzw. LKW, die zu einer Station gelangen gleich den Rädern bzw. LKW setzen, die in der nächsten Periode von dieser Station starten. NB 7 definiert die Batterien mit ihren Batterieladeständen, die an den Stationen verbleiben. Dies ergibt

sich aus der Anzahl Batterien zu Beginn der Periode an einer Station abzüglich derer, die von der Station wegfahren und weggebracht werden. Da die Batterien unterschiedliche Ladestände aufweisen, wird dies in vier Flussgleichungen beschrieben. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass $h \geq l$ (die Ladung für eine Fahrt dauert länger als eine Periode) und $K \geq h + l$ (eine volle Batterie enthält nach einer Fahrt noch mehr Energie als in einer Periode geladen werden kann) gilt. Die diskreten Ladezustände werden in vier Bereiche von Ladestufen unterteilt (siehe Abb. 5). Der erste Teil möglicher Ladestände beschreibt die Batterien, deren Ladezustand k kleiner als die Laderate l ist (NB 8a). Bei dieser Laderate ergeben sich keine Bestände von Batterien, die in der Vorperiode an der Station verblieben sind, da diese geladen worden wären. Somit kann der Bestand der Batterien an dieser Station mit Ladestand $k < l$ sich nur durch Batterien ergeben, die entweder mit dem Fahrrad zur Station gefahren sind oder transportiert wurden. Die nächste NB 8b betrachtet den Fall, dass $l \leq k \leq K - h$ ist. Hierbei können Batterien in der Vorperiode an der Station geladen worden sein und neue Batterien durch Transport oder Nutzung hinzukommen. Der dritte Bereich des Batterieladestandes ist $K - h < k < K$. Hier (NB 8c) können Batterien an der Station verblieben und somit geladen oder zu der Station transportiert worden sein. Im letzten möglichen Bereich ist die Batterie vollgeladen ($k = K$, NB 8d) und wurde entweder zur Station transportiert oder war zuvor so voll, dass sie in einer Periode vollgeladen werden konnte. Eine Nutzung von Batterien in der Vorperiode ist dagegen in den beiden letzten Bereichen nicht möglich.

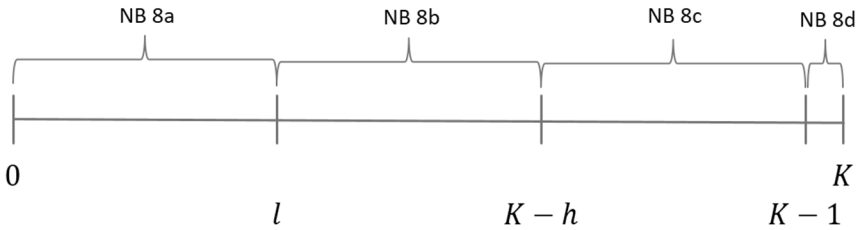

Abbildung 5: *Mögliche Ladestände der Batterie*

Die Nebenbedingungen 9, 10 und 11 verbinden den Fluss der genutzten Räder mit der Nachfrage und dem Fluss der Batterien. So wird der Fluss der Räder auf maximal die Nachfrage begrenzt (NB 9). Die Anzahl der Räder, die von den Kunden genutzt werden, ist gleich der Anzahl der Batterien, die dafür notwendig sind. Dabei ist zu beachten, dass die Batterien zumindest so aufgeladen sein müssen, dass eine Fahrt möglich ist (NB 10). Ansonsten können die Batterien nicht genutzt werden (NB 11). Die nächsten sechs Nebenbedingungen definieren den initialen Zustand des Systems. So werden die Anfangsbestände der Räder und Batterien im gesamten System definiert (NB 12, 13). Dabei sind alle Batterien vollgeladen (NB 12) und es existieren keine Batterien mit geringerem Ladezustand (NB 14). Des Weiteren existiert eine Vorperiode, in der keine Ausleihen stattfinden (NB 15) und die LKW aus dem Depot starten (NB 16), sodass eine Fahrt eines LKWs zwischen den Stationen in der 0. Periode nicht möglich ist (NB 17). Die Variablen werden in NB 18 als ganzzahlig definiert.

5 Simulation eines Beispiels

Die Simulation soll die Ergebnisse aus dem MILP bewerten. Auf der Basis derselben Inputparameter und der berechneten Route der LKW und der Anfangsbestände von Rädern und Batterien aus dem MILP wird die Simulation gestartet. Die Ankunftsrate der Kunden wird mit Hilfe der vorgegebenen Nachfrage bestimmt. Darauf aufbauend werden stochastisch die Ankunftszeiten der Kunden ermittelt. Erscheint ein Kunde, wird er stochastisch (auf Basis der historischen OD-Matrix) einer Station als Startstation und einem Ziel zugewiesen. Ist ein Fahrrad an der Station und eine Batterie mit genügend Energie vorhanden und besitzt die Zielstation noch genügend Kapazität, entsteht eine Fahrt des Kunden mit einer Fahrtdauer von 15 Minuten. Zu Beginn einer jeden Periode fährt der LKW für die Relokation die per MILP bestimmte Station an und lädt, falls der Unterschied zwischen Start- und Zielstation über zwei Rädern liegt, die Anzahl an Rädern auf, die es benötigt, um den Fahrradbestand der beiden Stationen anzugleichen. Dieser Simulationslauf wird mehrmals (hier 100-mal) durchgeführt.

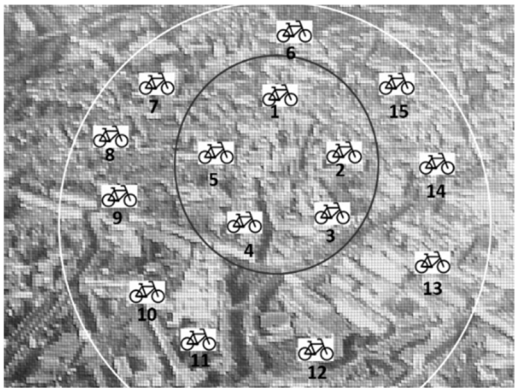

Abbildung 6: *Verteilung der Bikesharing-Stationen über das Stadtgebiet*

Der gesamte Ablauf wird an einem realitätsgetreuen Beispiel ausgeführt. Hierfür wird eine mittelgroße Stadt mit einem Stadtkern und deutlichen Höhenunterschieden betrachtet. Innerhalb dieses Stadtkerns befinden sich fünf und um diesen Stadtkern zehn Bikesharing-Stationen mit je zehn Plätzen für Batterien und Fahrräder. Das Bikesharing-System umfasst 115 Fahrräder und 115 Batterien (Abb. 6).

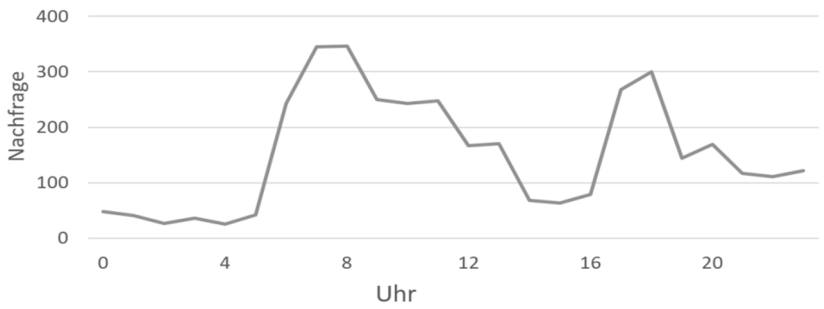

Abbildung 7: *Verlauf der gesamten Nachfrage nach Rädern über den gesamten Tag*

Die Nachfragedaten sind konstruiert, aber an einer realen Nachfragesituation angelehnt. So ist der Großteil der Nachfrage von den Randbezirken in die Stadt am Morgen und am Abend in die Randbezirke zurück. Der Verlauf der Nachfrage über den Tag wird in der Abbildung 7 dargestellt.

Durchschnittlicher Bestand Fahrräder pro Station und Periode																									
	Perioden																								
Station	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	12.0	12.0	9.2	4.7	6.9	4.8	5.1	6.0	11.7	14.5	14.8	14.7	14.4	14.1	13.1	11.7	11.4	10.4	11.2	8.7	8.7	8.7	8.7	8.8	8.7
2	13.0	13.0	9.4	6.8	7.9	9.3	10.8	9.8	11.8	14.5	14.9	13.6	13.1	12.0	10.4	10.6	10.7	10.9	11.7	10.2	10.2	10.2	10.2	10.3	10.3
3	14.0	14.0	5.9	1.0	1.3	2.3	3.7	6.4	8.5	13.7	14.3	14.5	14.3	14.1	12.0	9.8	9.3	10.2	11.4	3.9	3.8	3.8	3.8	4.1	3.9
4	8.0	8.0	2.2	1.4	2.9	2.5	3.4	3.5	7.2	14.0	15.0	14.7	14.8	14.9	13.5	12.8	13.1	12.8	12.6	11.7	11.7	11.7	11.7	11.7	11.8
5	12.0	12.0	7.9	4.6	6.7	5.6	4.9	2.1	8.7	14.7	15.0	14.9	14.8	14.8	14.2	13.8	13.5	13.6	13.2	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
6	8.0	8.0	2.5	0.9	1.9	2.6	2.7	3.8	7.9	13.4	14.3	13.4	13.5	13.3	10.2	6.4	6.9	6.3	6.8	3.7	3.7	3.6	3.8	3.8	3.7
7	6.0	6.0	8.7	11.3	12.2	13.1	12.9	11.5	0.8	0.8	0.7	0.7	1.3	1.2	2.4	3.1	3.3	3.5	1.9	3.0	5.7	7.2	8.1	7.4	7.3
8	7.0	7.0	9.3	11.1	10.2	10.0	7.3	6.8	4.7	0.3	2.5	8.2	8.6	10.7	12.7	12.2	9.3	8.6	10.4	11.7	10.8	9.2	8.5	10.0	10.7
9	0.0	0.0	2.6	6.4	3.7	2.1	3.9	8.5	3.3	1.0	0.7	0.4	0.4	1.0	0.8	1.1	2.2	3.9	5.1	5.5	4.0	4.0	3.7	2.8	4.0
10	8.0	8.0	11.6	12.9	11.2	11.0	10.2	9.2	2.5	0.8	1.3	2.6	4.4	2.9	5.9	6.8	7.6	6.5	3.3	5.7	5.4	4.1	4.1	4.6	4.0
11	0.0	0.0	2.9	5.8	5.9	8.0	9.0	10.5	6.6	0.8	2.5	1.3	0.1	0.7	0.8	1.2	1.3	1.1	2.4	2.7	2.6	2.5	3.2	2.2	1.6
12	10.0	10.0	12.6	14.4	13.6	12.0	10.3	9.2	0.6	0.6	0.9	3.7	4.1	4.1	5.1	7.5	7.6	7.1	6.7	9.3	10.3	10.9	9.7	10.2	11.4
13	12.0	12.0	13.3	14.3	13.1	12.5	12.3	11.0	1.4	0.5	1.0	1.1	0.4	0.6	2.0	2.5	2.5	2.1	2.1	4.6	4.9	5.3	6.0	3.3	4.0
14	3.0	3.0	4.5	6.7	6.5	6.5	5.3	3.5	1.6	0.3	0.2	0.8	0.9	1.3	2.9	4.6	5.3	5.0	2.6	6.7	5.2	7.9	5.7	6.9	6.5
15	2.0	2.0	3.8	6.9	7.0	7.6	8.0	6.4	2.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	3.1	4.1	6.2	8.2	8.8	12.1	12.1	11.7	11.7	11.1	12.0

Abbildung 8: *Bestand an Fahrrädern über den Tag an den verschiedenen Stationen*

Da für das vorliegende Beispiel keine optimale Berechnung des Modells möglich ist, wird mit Hilfe des limited-lookahead-Verfahrens mit dem Modell mit einem Zeithorizont von 10 Stunden eine gute Lösung ermittelt. Die mit dem Verfahren ermittelten Startbestände und die LKW-Route sowie die Parameter werden daraufhin in die Simulation gegeben. Die Simulation wird 100-mal durchgeführt. Der Mittelwert der Stationsbestände ist in Abbildung 8 dargestellt. Die Darstellung der Bestände ist ähnlich dem Nachfrageverlauf. So fahren bis 9 Uhr viele Nachfrager in die Innenstadtzonen, um dann gegen Abend wieder in die Randbezirke zu fahren. Insgesamt ergeben sich im Durchschnitt 972 Fahrten, was bei einem Tarif von 0,07 €/Minute und einer durchschnittlichen Fahrtdauer von 15 Minuten einen Umsatz von 1020,60 € pro Tag ergibt.

6 Ergebnisse

Der hier vorliegende Beitrag soll die Anwendung einer Simulation zur Evaluation der Fahrradbestände und der LKW-Route zur Relokation aufzeigen. Dabei sollen die Parameter des limited-lookahead-Verfahrens historische Durchschnittswerte sein, auf denen der Fluss der Fahrräder und der Batterien sowie der LKW zur Relokation der Räder und Batterien berechnet werden. Diese Flüsse wurden mit Hilfe einer Simulation mit stochastischen Ankunftszeiten an stochastisch gewählten Stationen zu stochastisch gewählten Zielen evaluiert. Dabei zeigt die Simulation, dass die ermittelten Ergebnisse aus dem limited-lookahead-Verfahren, die auf dem Modell basieren, gut funktionieren. Im Gegensatz zu einigen anderen Ansätzen werden hierbei die Ströme der Batterien und Räder separat betrachtet. Dies kann zu deutlich besserer Auslastung führen und erlaubt die Simulation von E-Bikesharing-Systemen mit fest installierten Batterien als auch Systeme mit wechselbaren Batterien.

Literatur

März, L; Weigert, G.: Simulationsgestützte Optimierung. In: März, L.; Krug, W.; Rose, O.; Weigert, G. (Hrsg.): Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer 2011, S. 3-12

Ji, S.; Cherry, C. R.; Han, L. D.; Jordan, D. A.: Electric bike sharing: Simulation of user demand and system availability. Journal of Cleaner Production 85 (2014), S.250-257

Laporte, G.; Meunier, F.; Calvo; R. W.: Shared mobility systems. 4OR, 13 (2015) 4, S. 341-360

Gönsch, J.; Kruk, N.: Shared Mobility Systeme. Wirtschaftswissenschaftliches Studium 46 (2010) 6, S. 9-14

Boyaci, B.; Zografos, K.; Geroliminis, N: An optimization framework for the development of efficient one-way car-sharing systems. European Journal of Operations Research 240 (2015) 3, S. 718-733

Vogel, P.: Service network design of bike sharing systems, Schweiz: Springer 2016

Bart, M.; Todd, M.: Simulation model performance analysis of a multiple station shared vehicle system. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 7 (1999) 4, S. 237-257

Barth, M.; Todd, M.; Xue, L.:User-based vehicle relocation techniques for multiple-station shared-used vehicle systems. Transportation research board 83rd annual meeting (2004)