

Datengestützte Disposition von Kontroll- und Servicepersonal im ÖV

Sebastian Knopf

Institut für ubiquitäre Mobilitätssysteme
an der Hochschule Karlsruhe
mail@sebastian-knopf.de

Kurzfassung

Fahrgeldeinnahmen sind neben den steuerlichen Subventionen die Haupteinnahmequelle eines Verkehrsunternehmens im deutschsprachigen Raum. Im eigenwirtschaftlichen Betrieb stützen Verkehrsunternehmen sich sogar komplett auf die Erlöse aus dem eingenommenen Fahrgeld. Besonders in Zeiten von immer weiter steigendem Wettbewerbsdruck auch im öffentlichen Personennahverkehr ist die Sicherung dieser Einnahmen ein bedeutendes Mittel, um die Wirtschaftlichkeit des Betriebes aufrecht zu erhalten. Die bekannteste Form der Einnahmensicherung sind stichprobenartige Fahrscheinkontrollen mit besonders hierfür eingesetztem Kontrollpersonal. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit Daten, welche während den Diensten des Kontrollpersonals erhoben werden, durch Anwendung statistischer Grundsätze zur Planung zukünftiger Dienste herangezogen werden können, um den Einsatz des Kontrollpersonals effizienter zu gestalten. In einem Modell werden die vorhandenen Daten eingehend hinsichtlich ihrer Qualität analysiert. Basierend auf der Beanstandungsquote und weiteren Parametern ist das Modell in der Lage, die Disposition des Kontroll- und Servicepersonals im Sinne der Einnahmensicherung zu optimieren.

Keywords

Fahrscheinkontrolle, Einnahmensicherung, Disposition, Datenanalyse, DataMining

1. Einleitung

Die in den letzten Jahren stark ausgeweiteten Liberalisierungsbestrebungen und die damit einhergehende Marktöffnung des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) sorgt dafür, dass auch Verkehrsunternehmen zunehmend gewinnorientiert [5] arbeiten. Insbesondere im eigenwirtschaftlich durchgeführten Betrieb eines Verkehrsunternehmens bilden Fahrgeldeinnahmen und Erlöse

aus Ausgleichszahlungen eine elementare finanzielle Grundlage für die stabile Betriebsdurchführung [5]. Vor diesem Hintergrund stellt die Sicherung dieser Einnahmen für Verkehrsunternehmen ein wichtiger Baustein deren wirtschaftlicher Existenz dar. Neben den damit obligatorischen Fahrscheinkontrollen kann das vorhandene Personal darüber hinaus die Rolle des Sicherheits- und Servicepersonals einnehmen. Besonders im Kontext eines modernen ÖPNV stellt „aufgeschlossenes Servicepersonal“ eine stützende Säule für die wahrgenommene Servicequalität der Fahrgäste dar [5]. Selbst ohne die Kontrolle von Fahrscheinen, beispielsweise in Gebieten mit für die Fahrgäste kostenfreiem ÖPNV-Angebot stellt dies einen Mehrwert dar. Besonders im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) ist der regelmäßige Einsatz von Sicherheitspersonal sogar in Verkehrsverträgen vorgeschrieben. Im Sinne einer wirtschaftlichen Betriebsdurchführung ist der kostenoptimierte Einsatz des Kontroll- und Servicepersonals essenziell. Bei klassischen Fahrscheinkontrollen ist dies vergleichsweise einfach. Hier wird das Kontrollpersonal vorrangig auf den Linien eingesetzt, auf denen nachweislich mehr Fahrgäste ohne gültigen Fahrschein angetroffen werden. Hierbei kann durch die Ergebnisse empirisch untermauerter Studien davon ausgegangen werden, dass Fahrgäste, welche öffentliche Verkehrsmittel bewusst ohne gültigen Fahrschein nutzen, nutzenmaximierend handeln [6]. Ist die Wahrscheinlichkeit im Fall einer Fahrt ohne gültigen Fahrschein bestraft zu werden gering, so steigt damit der Nutzen, wenn für die Fahrt kein Fahrgeld entrichtet wurde. Umgekehrt bedeutet dies, dass durch verstärkte Fahrscheinkontrollen weniger Fahrgäste die Verkehrsmittel ohne gültigen Fahrschein nutzen. Zeitgleich geht der Anteil der Fahrgäste ohne gültigen Fahrschein durch verstärkte Kontrollen zurück [3]. Im Bestfall gleichen sich entgangene Fahrgeldeinnahmen und Einnahmen aus dem erhöhten Beförderungsentgelt (EBE) zu einem gewissen Anteil aus, wodurch sich ein optimaler Kontrollgrad ermitteln lässt. Schwieriger wird eine

monetarisierter Betrachtung hingegen beim Einsatz von reinem Servicepersonal. Dieses führt nicht zwangsläufig Fahrscheinkontrollen durch und sorgt damit auch nicht auf direktem Weg für ausgleichende EBE-Einnahmen. Vielmehr schlägt sich der Nutzen des eingesetzten Servicepersonals zum einen in indirekten Mehreinnahmen durch die reine Anwesenheit des Servicepersonals an Haltestellen [7] und zum anderen in der umfassend redundanten Information der Fahrgäste [5] und damit einhergehend auch deren Zufriedenheit mit dem ÖV-Angebot nieder. Ziel dieser Arbeit ist es ein praxistaugliches Modell zur optimierten Disposition des Kontroll- und Servicepersonals zu entwickeln, welches vorrangig auf Basis empirischer Daten arbeitet. Diese Daten können auf einfachem Weg mit den vielfach eingesetzten Kontrollgeräten erfasst werden, auf denen das Kontroll- und Servicepersonal beispielsweise die Linie, die Ein- und Ausstiegshaltestelle und die Anzahl kontrollierter Fahrgäste und Beanstandungen protokolliert. Hierzu werden zuerst verwandte Arbeiten und Praktiken verschiedener Verkehrsunternehmen beleuchtet. Im nächsten Schritt werden exemplarische Daten aus dem Realbetrieb eines Verkehrsunternehmens eingehend analysiert. Die Erkenntnisse aus verwandten Arbeiten, aus der Praxis verschiedener Verkehrsunternehmen und den analysierten Daten bilden die Grundlage für die Modellbildung. Eine umfassende Evaluation und kritische Betrachtung des Modells runden die Arbeit ab.

2. Verwandte Arbeiten

Mit der Verhaltensanalyse von Fahrgästen ohne gültigen Fahrschein beschäftigen sich verschiedenste Gebiete der Wissenschaft intensiver seit den 1980er Jahren.

So beschäftigen sich Boyd et al. bereits im Jahr 1989 mit der Frage, inwieweit die durch Fahrgeldhinterziehung erlittenen Einnahmen-Verluste durch EBE-Einnahmen kompensiert und so ein Profitmaximum bei Einhaltung eines optimalen Kontrollgrades [1] für das Verkehrsunternehmen erreicht werden kann. Leider werden in der ursprünglichen Ausarbeitung keine empirischen Daten mit einbezogen, sodass eine Beurteilung des Modells aus Sicht eines Verkehrsunternehmens schwierig wird. Erst durch die Anwendung empirischer Daten aus Europa und Kanada durch Kooreman im Jahr 1993 [6] gewinnt das Modell an Bedeutung. Inzwischen ist der optimale Kontrollgrad als zentrale Kennzahl für den kostenoptimierten Einsatz des Kontroll- und Servicepersonals gängige Praxis. Der Verband Deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) hat den

optimalen Kontrollgrad als zentrales Element in der VDV-Mitteilung 9708 [9] ausführlich beleuchtet und manifestiert. Um Qualitätsstandards in Verkehrsverträgen zu definieren, wird häufig ein zu erreichender Kontrollgrad festgeschrieben, den die Verkehrsunternehmen dann im Rahmen ihrer Betriebsdurchführung zu erbringen haben.

Thorlacius & Clausen im Jahr 2010 beschreiben ein weiteres, sehr detailliertes Modell zur kostenoptimierten Disposition des Kontroll- und Servicepersonals. Wie auch bei der zuvor beschriebenen Arbeit werden entgangene Fahrgeldeinnahmen und EBE-Einnahmen gegeneinander aufgewogen [8]. Verschiedenste zusätzliche Einflussfaktoren wie Nachtzuschläge bei den Personalkosten, Einsatzort und Größe der Kontrollteams und Dienstzeiten werden ebenfalls berücksichtigt. Nach Lösung des entstehenden Optimierungsproblems entsteht ein Entwurf zur Disposition des Kontrollpersonals. Die Optimierung erfolgt dabei stets so, dass anfallende Kosten und Verluste bestmöglich durch EBE-Einnahmen kompensiert werden [8]. Problematisch ist dabei, dass die EBE-Einnahmen stets in voller Höhe angerechnet werden. Zahlungssäumige Fahrgäste oder ermäßigte EBE werden dabei nicht berücksichtigt.

Einen spieltheoretischen Ansatz unter der Bezeichnung TRUSTS für „Tactical Randomization for Urban Security in Transit Systems“ [10] basierend auf einem Stackelbergmodell entwickelten im Jahr 2012 Yin et al. Auch hier ist ein kostenoptimierter Einsatz des Kontroll- und Servicepersonals das Ziel. Wenngleich dieses Modell komplexer als das zuvor erläuterte von Thorlacius & Clausen ist, fließen hier weniger Umgebungsvariablen mit ein. Das Modell liefert fest definierte Fahrtsequenzen [10] als Ergebnis, die nach einem zufälligen Muster bestmöglich verteilt werden und durch Fahrgäste nicht nachvollzogen werden können. Besonders im städtischen Nahverkehr ist es dem Kontrollpersonal hingegen selten möglich, eine solche Fahrtsequenz einzuhalten. Verantwortlich dafür sind nicht vorhersehbare Ereignisse wie beispielsweise die Personalienfeststellung durch Hinzuziehen der Polizei, welche ein solches Zeitmuster zerrütten würden. Bedingt durch diese Umstände eignet sich dieses Modell eher für die Disposition von Servicepersonal im SPNV, welches solche Fahrtsequenzen durch die weitestgehende Unabhängigkeit von vergleichbaren Ereignissen fortzusetzen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die betrachteten Modelle im Kern auf die

Verlustminimierung durch den gezielten Einsatz des Kontrollpersonals abzielen. Andere Ziele wie beispielsweise ein vertraglich zu erreichender Kontrollgrad werden hingegen nicht berücksichtigt. Ob ein regelmäßiges Monitoring der durch das Kontroll- und Servicepersonal erhobenen Daten stattfindet, hängt dabei in erster Linie davon ab, wie oft die Eingangsdaten der Modelle durch die anwendenden Verkehrsunternehmen aktualisiert werden.

3. Definitionen & Daten

Da das Monitoring der Daten aus den Fahrscheinkontrollen in dieser Arbeit eine zentrale Rolle einnehmen soll, werden in diesem Kapitel zunächst einige wichtige Kennzahlen definiert. Außerdem wird die Nutzung dieser Kennzahlen bei verschiedenen Verkehrsunternehmen beleuchtet. Abschließend werden exemplarische Daten, welche freundlicherweise durch ein beteiligtes Verkehrsunternehmen bereitgestellt wurden, eingehend analysiert und eingeordnet.

3.1 Wichtige Kennzahlen

Mit der VDV-Mitteilung 9708 hat der VDV wichtige Kennzahlen bezogen auf Fahrscheinkontrollen und Einnahmensicherung einheitlich definiert. In diesem Unterkapitel werden die für diese Arbeit relevanten Kennzahlen kurz vorgestellt.

Beanstandungsquote

Die Beanstandungsquote gibt das Verhältnis zwischen kontrollierten und Fahrgästen, die ohne einen gültigen Fahrschein angetroffen und daher beanstandet wurden, wieder. Sie ist definiert als

$$Q_c = \frac{\text{Anzahl Beanstandungen}}{\text{Kontrollierte Fahrgäste}}$$

und wird als Prozentwert ausgegeben [9]. Beide Eingangszahlen werden während des Dienstes durch das Kontrollpersonal erhoben.

Kontrollgrad

Der Kontrollgrad wird in vielen Verkehrsverträgen als Maß für den Umfang der zu leistenden Fahrscheinkontrollen genutzt. Er ist definiert als

$$Q_v = \frac{\text{Kontrollierte Fahrgäste}}{\text{Beförderte Fahrgäste}}$$

und wird ebenfalls als Prozentwert ausgewiesen [9]. Der Kontrollgrad steht nachweislich im Zusammenhang mit der Fahrgeld-Hinterziehungsquote, wobei ein höherer Kontrollgrad in der Regel zu einer niedrigen Fahrgeldhinterziehungsquote führt [3].

Kontrollleistung

Die Kontrollleistung gibt die Anzahl kontrollierter Fahrgäste pro Stunde wieder. Sie ist definiert als

$$P_v = \frac{\text{Kontrollierte Fahrgäste}}{\text{Kontrollstunden}}$$

und wird in Fahrgästen pro Stunde [Fg/h] angegeben [9]. Mit Hilfe der Kontrollleistung können beispielsweise die zusätzlich erforderlichen Stunden zum Erreichen eines bestimmten Kontrollgrades errechnet werden. Hierbei muss allerdings sichergestellt sein, dass die zugrunde liegenden Daten als repräsentative Stichprobe angesehen werden können, da es ansonsten schnell zu einer Verzerrung der Kontrollleistung kommen kann. Keinesfalls dürfen daher beispielsweise Zahlen, welche ausschließlich in der Hauptverkehrszeit (HVZ) erhoben wurden, für eine solche Berechnung genutzt werden.

Fahrtleistung

Die Fahrtleistung ist die einzige der hier betrachteten Kennzahlen, welche nicht durch den VDV definiert wurde.

Die Bezeichnung lässt jedoch bereits erahnen, dass sie in Anlehnung an die Kontrollleistung berechnet wird. Sie ist sei definiert als

$$P_f = \frac{\text{Anzahl Fahrten}}{\text{Kontrollstunden}}$$

und wird in Fahrten pro Stunde [F/h] angegeben.

Im späteren Verlauf der Arbeit dient die Fahrtleistung dazu, die Anzahl der Fahrten abzuschätzen, die das Kontrollpersonal in einer gewissen Zeitspanne voraussichtlich erreichen kann.

3.2 Äußere Einflussfaktoren

Neben den oben genannte Einflussfaktoren gibt es eine Reihe weiterer äußerer Einflussfaktoren, welche die Qualität und Vergleichbarkeit der Kennzahlen erheblich beeinflussen können [9]. Zu diesen äußeren Einflüssen zählen beispielsweise die Bekleidungsart und die Arbeitsweise des Kontrollpersonals. Bei Kontrollen in Zivilleidung und zu unterschiedlichen Uhrzeiten werden erwartungsgemäß mehr Fahrgäste ohne gültigen Fahrschein angetroffen als umgekehrt. Die Repräsentativität der Stichprobe ist Grundvoraussetzung zur Nutzung der Kennzahlen für Entscheidungen zum Personaleinsatz. Um eine repräsentative Stichprobe zu erhalten muss eine möglichst breite zeitliche und räumliche Verteilung der Stichprobe sichergestellt werden [9].

Auch die Häufigkeit der Kontrollen kann zu wahrnehmbaren Veränderungen der Kennzahlen

führen. So geht der VDV bereits nach zwei aufeinanderfolgenden Tagen mit Kontrollen im selben Zeitfenster auf denselben Linien von einer Verzerrung der Stichprobe aus. Um eine repräsentative Stichprobe zu erhalten, muss also ebenfalls sichergestellt werden, dass eine möglichst breite Verteilung an Tagen innerhalb des Betrachtungszeitraumes berücksichtigt wird.

3.3 Praktische Nutzung der Kennzahlen

Um einen Einblick in die verschiedenen Nutzungsszenarien der zuletzt vorgestellten Kennzahlen in der Praxis verschiedener Verkehrsunternehmen zu erlangen, wurden kurze Interviews mit drei lokalen Verkehrsunternehmen geführt. Die Interviews wurden dabei als offene Gespräche mit einigen Leitfragen geführt. Ziel der Leitfragen war dabei, die Kernaussagen miteinander vergleichbarer zu machen. Die Leitfragen lauteten

- *Wie nehmen Sie die Einteilung des Kontrollpersonals auf verschiedenen Linien vor?*
- *Wie stellen Sie sicher, dass die zu Grunde liegenden Stichproben als repräsentativ angesehen werden können?*
- *Haben Sie Kenntnis von speziellen Programmen, welche Ihnen die Personaldisposition erleichtern? Nutzen Sie solche Programme oder verfolgen Sie einen anderen Lösungsweg?*

Bezüglich der Verteilung der Kontrollen auf verschiedene Linien sind sich zwei der Verkehrsunternehmen insofern einig, dass einerseits eine möglichst breite zeitliche und räumliche Verteilung der Kontrollen ausschlaggebend ist und andererseits besonders häufig dort kontrolliert wird, wo die Beanstandungsquote höher ausfällt. Auch stärker frequentierte Fahrten werden häufiger kontrolliert als solche mit geringerem Fahrgastaufkommen.

Um eine ausreichende Stichprobenqualität für Dispositionsentscheidungen und für Berichte gegenüber Aufgabenträgern sicherzustellen, sind die Verkehrsunternehmen größtenteils bemüht, die räumliche und zeitliche Verteilung engmaschig zu überwachen und bestmöglich sicherzustellen. Um die Zahlen zu untermauern, führen alle befragten Verkehrsunternehmen regelmäßige Schwerpunkt-Kontrollen durch, bei denen sich Fahrgäste ohne gültigen Fahrschein der Kontrolle kaum entziehen können. Außerdem werden in regelmäßigen Abständen Dienste in Zivilkleidung durchgeführt.

Keines der beteiligten Verkehrsunternehmen setzt spezielle Software zur Überwachung der Kennzahlen ein. Vielmehr werden die Daten aus den

Hintergrundsystemen der Kontrollsoftware in Excel importiert und dort gezielt auf bestimmte Eigenschaften untersucht.

Zusammenfassend lässt sich an dieser Stelle sagen, dass vorrangig die Beanstandungsquote und das Fahrgastaufkommen und zum Teil auch die zeitliche und räumliche Verteilung maßgebende Größe bei der Einteilung des Kontrollpersonals ist.

3.4 Analyse vorhandener Daten

Da das Modell in dieser Arbeit empirische Daten als Arbeitsgrundlage nutzen soll, wird in diesem Kapitel ein Datensatz, welcher durch das Kontrollpersonal eines der Verkehrsunternehmen aus Abschnitt 3.3 erhoben wurden, analysiert. Die Daten liegen in einem tabellarischen CSV-Format vor. Jede Zeile repräsentiert eine zurückgelegte Fahrt eines Mitarbeitenden. Um Doppelungen zu vermeiden, wurde die Tabelle auf Fahrten eines einzelnen Mitarbeitenden reduziert.

Im ersten Schritt werden die Daten insoweit bereinigt, dass keine Daten mehr enthalten sind, welche Rückschlüsse auf das Verkehrsunternehmen oder das Kontrollpersonal zulassen. Nach der Bereinigung sind in der Tabelle noch folgende Spalten enthalten:

- Aufzeichnungsdatum
- Systeminterne Linien-ID
- Liniennummer
- Codierter Linientyp
- Systeminterne Fahrt-ID
- Einstiegszeit
- Ausstiegszeit
- Fahrtdauer [min]
- Kontrollierte Fahrgäste
- Anzahl Beanstandungen

Nach der Bereinigung sind insgesamt Daten aus einem Zeitraum von knapp vier Monaten über

- 401 Fahrten
- 5611 Kontrollierte Fahrgäste
- 211 Beanstandungen
- 4992min (83,2h) reine Kontrollzeit

enthalten. Daraus ergeben sich

- Eine Beanstandungsquote von 3,78%
- Eine Kontrollleistung von 67,43 Fg/h

Außerdem werden die vorliegenden Daten auf ihre zeitliche und räumliche Verteilung hin untersucht. In beiden Fällen wird die Anzahl Fahrgäste und die Anzahl der zurückgelegten Fahrten als Referenz betrachtet.

Um die Fahrten nach Zeitfenstern zu klassifizieren, wird jeweils die Stunde der Einstiegszeit einer Fahrt herangezogen. Alle Fahrten einer Stunde fallen damit bis zur Minute 59 in diese Stunde. Dies stellt für den verfolgten Zweck eine ausreichende Differenzierung dar. Die folgende Abbildung zeigt die zeitliche Verteilung der Stichprobe.

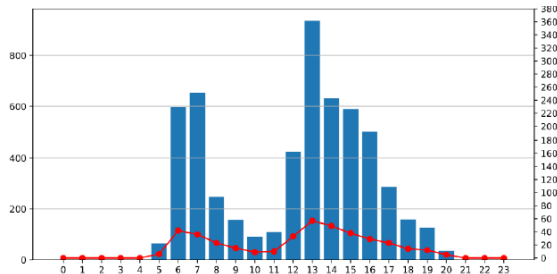


Abbildung 1: Zeitverteilung der Stichprobe in den Beispieldaten

Auf der Y-Achse sind in Blau links die Anzahl der kontrollierten Fahrgäste und in Rot rechts die Anzahl der zurückgelegten Fahrten abgetragen. Auf der X-Achse sind die einzelnen Zeitfenster der Stunden 0 bis 23 Uhr zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Kontrollen im vorliegenden Beispieldatensatz hauptsächlich in der HVZ durchgeführt wurden. Große Lücken der Stichprobe sind in den frühen Morgen- und Mittagsstunden, sowie am Abend zu erkennen.

Die Betrachtung der räumlichen Verteilung ist nicht mit vergleichbar einfachen Mitteln möglich, da weder Haltestellen-IDs noch GSP-Koordinaten in den Daten enthalten sind. Näherungsweise wird die räumliche Verteilung daher anhand der Linie, in der eine Fahrt zurückgelegt wurde, analysiert. Die folgende Abbildung zeigt die räumliche Verteilung der durchgeführten Kontrollen.

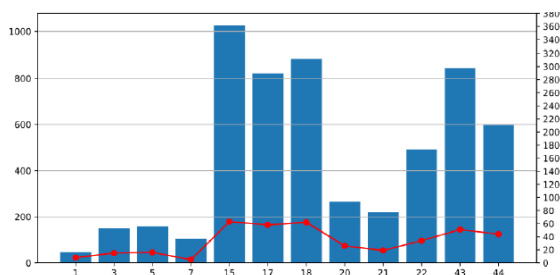


Abbildung 2: Räumliche Verteilung der Stichprobe in den Beispieldaten

Auch hier sind auf der Y-Achse wieder Anzahl kontrollierter Fahrgäste links in Blau und die Anzahl durchgeführter Fahrten rechts in Rot abgetragen. Die X-Achse ist in diesem Diagramm mit den einzelnen kontrollierten Linien skaliert. Besonders auffällig sind hier die Linien mit der Nummer 1, 3, 5 und 7, da diese offensichtlich besonders selten kontrolliert werden. Ebenfalls eher selten kontrolliert werden die

Linien 20, 21 und 22. Über die übrigen Linien hinweg ist eine gleichmäßige Verteilung der Stichprobe zu verzeichnen. Allein aus den vorliegenden Daten ist dieser Sachverhalt nicht erklärbar. Eine mögliche Erklärung wäre eine geringere Taktdichte auf den unterrepräsentierten Linien.

4. Methodik

In den vorherigen Kapiteln wurden verwandte Arbeiten, Anforderungen aus der Praxis potenzieller Anwendergruppen und die zur Verfügung stehenden Beispieldaten beleuchtet. In diesem Kapitel soll nun schrittweise ein Modell gebildet werden, welches basierend auf den aktuellen Eingangsdaten in der Lage ist, eine Dispositionsempfehlung für die Einteilung des verfügbaren Kontrollpersonals auf verschiedene Linien in entsprechenden Zeitfenstern auszugeben. Die Empfehlung soll dabei zunächst an die Erreichung einer hinreichend guten Stichprobe und anschließend an der festgestellten Beanstandungsquote gekoppelt werden. Außerdem sollen geplante Einsatzstunden des Kontrollpersonals Berücksichtigung finden, sodass eine gleichmäßige Verteilung der zur Verfügung stehenden Einsatzstunden gewährleistet bleibt. Zur Verifikation soll das Modell abschließend einer Evaluation unterzogen werden.

4.1 Betrachtung als Binomialverteilung

Die Kontrolle von Fahrgästen lässt sich als Bernoulli-Kette darstellen. Dabei wird die unabhängige Zufallsvariable X definiert als

$$X = \text{"Anzahl der Fahrgäste, welche ohne gültigen Fahrschein angetroffen"}$$

mit

$$X_i = \begin{cases} 0, & \text{falls ein gltg. Fahrschein vorliegt} \\ 1, & \text{falls kein gltg. Fahrschein vorliegt} \end{cases}$$

Um von einer Binomialverteilung ausgehen zu können ist entscheidend, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses p konstant bleibt [2]. Außerdem muss die Zufallsvariable unabhängig sein, das Eintreten eines Ereignisses darf also nicht davon abhängig sein, ob das Ereignis zuvor bereits einmal eingetreten ist.

Gemäß dem Auswahlssatz darf von einer binomialverteilten Zufallsvariable ausgegangen werden, wenn für das Verhältnis zwischen dem Stichprobenumfang und der Grundgesamtheit $n/N \leq 5\%$ gilt [2]. Für den vom VDV empfohlenen optimalen Kontrollgrad zwischen 1,8% und 2,2% [9] trifft idealerweise zu,

sodass für Kontrollgrade bis 5% näherungsweise von

$$X \sim B(n, p)$$

ausgegangen werden darf, wobei p in diesem Fall der festgestellten Beanstandungsquote Q_c entspricht.

4.2 Einbeziehung der Stichprobenqualität

Ausgehend von einer binomialverteilten Zufallsvariable wird in diesem Schritt nach einer Möglichkeit gesucht, die Qualität der vorhandenen Stichprobe auszudrücken. Hierzu bietet sich das Konfidenzintervall an. Das Konfidenzintervall entspricht dem Schwankungsbereich, in dem sich die wahre Beanstandungsquote mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit bewegt. Je größer das Konfidenzintervall wird, desto schlechter ist die Stichprobenqualität und umgekehrt. Nach dem zentralen Grenzwertsatz von de Moivre approximiert die Binomialverteilung für einen großen Stichprobenumfang n die Normalverteilung [2]. Als Faustregel kann dabei $n \cdot p \geq 5$ mit $p \leq 0,5$ für die Approximation der Binomialverteilung an die Normalverteilung angenommen werden [4]. Selbst mit einer vergleichsweise sehr hohen Beanstandungsquote von $p = 0,15$ wäre damit ein Stichprobenumfang von

$$n \cdot 0,15 \geq 5$$

$$n > \frac{5}{0,15}$$

$$n > 33, \overline{33}$$

kontrollierten Fahrgästen erforderlich, um die Approximation an die Normalverteilung zu erreichen, welcher in der Praxis leicht zu erreichen ist. Um eine gewisse Sicherheit bei der Annahme zu erreichen, wird ein minimaler Stichprobenumfang von $n = 50$ Fahrgästen angesetzt. Damit gilt näherungsweise

$$X \sim N(np, np(1-p)) \text{ für } n \geq 50$$

Das Konfidenzintervall berechnet sich damit näherungsweise nach

$$c_{l,u}(n, p) = z_{(1-\alpha)/2} \pm \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$$

wobei p in diesem Fall der festgestellten Beanstandungsquote Q_c und α dem Vertrauensniveau entspricht. Das Vertrauensniveau wird mit 95% angesetzt und besagt dabei, dass die wahre Beanstandungsquote zu 95% im errechneten Konfidenzintervall liegen wird. Mit diesem Vertrauensniveau für das zweiseitige Konfidenzintervall ergibt sich durch Ablesen aus der

Tabelle der Standardnormalverteilung ein z -Wert von $z = 1,96$.

Aus der oberen und der unteren Grenze des Konfidenzintervalls lässt sich ein Schwankungsbereich

$$v(n, p) = \frac{c_u(n, p) - c_l(n, p)}{2}$$

berechnen. Anhand dieses Schwankungsbereiches soll die Stichprobenqualität beurteilt werden. Hierzu wird die Stichprobenqualität als

$$q(n, p) = \begin{cases} 1, & \text{für } n \geq 500 \text{ oder } v(n, p) < 0,03 \\ 2, & \text{für } v(n, p) < 0,06 \\ 3, & \text{für } n < 50 \text{ oder } v(n, p) \geq 0,06 \end{cases}$$

definiert. Der Wert 1 wird durch einen Stichprobenumfang ab 500 kontrollierten Fahrgästen oder einen Schwankungsbereich kleiner 3% erreicht und stellt die bestmögliche Stichprobenqualität dar. Der Wert 3 wird erreicht, wenn der Stichprobenumfang kleiner 50 kontrollierte Fahrgäste oder die Abweichung größer oder gleich 6% ist. Dieser Wert stellt entsprechend die schlechteste Stichprobenqualität dar. Die Beschränkung auf einen Stichprobenumfang von mindestens 50 kontrollierten Fahrgästen erfolgt, um sicherstellen zu können, dass die Verteilung eine Normalverteilung approximiert und der Schwankungsbereich auf diesem Weg berechnet werden kann. Der Wert 2 bildet die Akzeptanzschwelle. Ab diesem Wert kann die Stichprobenqualität als ausreichend betrachtet werden, um die Stichprobe als Entscheidungsgrundlage zu nutzen.

Der zulässige Schwankungsbereich $< \pm 6\%$ zum Erreichen einer ausreichenden Stichprobenqualität stellt bezogen auf die Beanstandungsquote eine erhebliche Ungenauigkeit dar, da diese sich selbst realistischerweise nur im einstelligen Prozentbereich bewegt. Die Genauigkeit wird später erreicht, indem die Stichprobenqualität differenziert nach Stunde und Linie betrachtet wird. Ausgehend von einer Bedienungszeit einer Linie von 6 Uhr bis 18 Uhr müssten für jede Stunde mindestens 50 Fahrgäste kontrolliert werden. Über den ganzen Tag hinweg betrachtet, ergäbe sich damit bereits ein Stichprobenumfang von 600 kontrollierten Fahrgästen. Da die Beanstandungsquote, beispielsweise für Berichte gegenüber Aufgabenträgern, wenn überhaupt nur auf Linienebene aggregiert wird, ist dies völlig ausreichend. Selbst wenn der Schwankungsbereich aufgrund vieler Beanstandungen in einem gewissen Zeitfenster auf einer Linie nicht kleiner wird, könnte hier gezielt durch verstärkte Kontrollen nachgesteuert werden.

4.3 Einbeziehung der Beanstandungsquote

Sobald eine ausreichende Stichprobenqualität sichergestellt ist, gilt es die Linien mit einer höheren

festgestellten Beanstandungsquote vorrangig mit Kontrollpersonal zu besetzen. Dabei soll die Linie mit der höchsten festgestellten Beanstandungsquote auch am stärksten priorisiert werden. Die Priorität einer Linie wird daher definiert als

$$p_r = \frac{Q_{c,r}}{\max(Q_c)}$$

Daraus ergibt sich ein relativer Wert auf dem Intervall $[0; 1]$ in Abhängigkeit von der höchsten festgestellten Beanstandungsquote. Die Beanstandungsquote wird dabei nur nach der Linie differenziert, nicht aber nach Stunden.

4.4 Einbeziehung der Fahrtverteilung

Die Beanstandungsquote und Stichprobenqualität mit ihrer Entscheidungskraft werden stets auf Basis der verfügbaren Daten aus den Diensten des Kontrollpersonals berechnet. Eine Änderung dieser

Werte kann nur dann erfolgen, wenn ständig neue Daten zur Verfügung stehen. Soll nun ein längerer Zeitraum mit dem Modell geplant werden, würde eine ausschließliche Berücksichtigung dieser beiden Parameter zwangsläufig dazu führen, dass stets dieselben Linien über den ganzen Planungszeitraum priorisiert würden. Es ist daher essenziell, dass auch die Auswirkungen der im Rahmen der Berechnungen bereits verplanten Einsatzzeiten im Modell Berücksichtigung finden. Diese Information können über die Kontroll- beziehungsweise Fahrtleistung einbezogen werden. Zur Laufzeit muss das Modell also in der Lage sein, die Anzahl der verplanten Einsatzstunden pro Zeitfenster und Linie abzurufen. Zusammen mit der Kontroll- und Fahrtleistung lässt sich daraus abschätzen, wie sich die Stichprobenqualität und die gleichmäßige Verteilung der Kontrollen über den Planungszeitraum in etwa ändern werden.

4.5 Zusammenführung in einem statistisch-mathematischen Modell

Die vorhergehenden Unterkapitel behandeln alle wichtigen Einflussgrößen, welche im Modell zu berücksichtigen sind. In diesem Kapitel werden die einzelnen Bausteine nun in einem statistisch-mathematischen Modell unter der Bezeichnung SCSM (für Statistic-based Crew Scheduling Model) zusammengeführt. Das Modell soll in der Lage sein, Linien in Abhängigkeit vom Zeitfenster zu priorisieren und dabei auch die Auswirkungen möglicher verplanter Dienste zu berücksichtigen und wird definiert als

$$p_r(t) = \begin{cases} 1, & \text{für } q\left(n_{r,t} + \frac{h_{r,t} * P_{v,r}}{2}, Q_{c,r}\right) > 2 \\ \frac{Q_{c,r}}{\max(Q_c)} * \left(1 - \frac{j_{r,t} + \frac{h_{r,t} * P_{j,r}}{2}}{j_t} * 0,5\right), & \text{für } q\left(n_{r,t} + \frac{h_{r,t} * P_{v,r}}{2}, Q_{c,r}\right) \leq 2 \end{cases}$$

Die Stichprobenqualität aus Kapitel 4.2 ist ausschlaggebend dafür, ob eine Linie generell bevorzugt wird, oder stattdessen über ihre Beanstandungsquote priorisiert wird. Die Stichprobenqualität wird dabei in Abhängigkeit von Zeitfenster t und Linie r aus dem empirisch ermittelten Stichprobenumfang n und der Abschätzung der zusätzlich kontrollierten Fahrgäste ermittelt. Um eine Überschätzung zu verhindern, wird dieser Wert halbiert. Die Anzahl der verplanten Stunden finden Eingang über die Variable h , für die Eintrittswahrscheinlichkeit p wird die relative Häufigkeit in Form der festgestellten Beanstandungsquote $Q_{c,r}$ eingesetzt. Ist eine ausreichende Stichprobenqualität erreicht, wird die Linie nicht mehr generell bevorzugt, sondern anhand der Beanstandungsquote aus Kapitel 4.3 priorisiert. Außerdem wird die relative Verteilung der Fahrten bezogen auf die Gesamtzahl zurückgelegter Fahrten als Abminderungsfaktor durch die Variable j berücksichtigt. Über die Fahrtleistung wird zudem abgeschätzt, wie viele Fahrten erwartungsgemäß in den bereits verplanten Stunden zurückgelegt werden, wobei der Wert auch hier halbiert wird, um eine Überschätzung zu vermeiden. Da die Verteilung der Fahrten nur die halbe Gewichtung bezogen auf die Beanstandungsquote erhalten soll, wird der gesamte Abminderungsfaktor nochmals mit 0,5 multipliziert.

Auf die Berücksichtigung verschiedener Regelungen aus dem Arbeitszeitgesetz und aus eventuellen Betriebsvereinbarungen wird aufgrund deren Komplexität und Diversität bewusst verzichtet. In einer Referenzimplementierung in der Skriptsprache Python werden neben den Eingangsdaten weitere Dateien mit vordefinierten Einsatzzeiten bereitgestellt. Jede dieser Dateien enthält eine Liste mit Zeitfenstern an dem Datum, an welchem der Dienst verplant ist. Die eigentliche Diensterteilung obliegt damit nach wie vor dem anwendenden Verkehrsunternehmen und ist nicht Teil von SCSM. Wird SCSM auf eine solche Liste von Zeitfenstern angewandt, ergibt sich stets eine Liste der entsprechend betrachteten Linien und deren Priorität. Die Linie mit der höchsten Priorität sollte nach Empfehlung von SCSM dann optimalerweise mit Kontrollpersonal besetzt werden, da dort entweder die Stichprobenqualität am schlechtesten, die Beanstandungsquote am höchsten oder relativ betrachtet die wenigsten Fahrten durchgeführt werden.

4.6 Theoretische Evaluation

Um SCSM einer Verifikation zu unterziehen, wird eine theoretische Evaluation des Modells durchgeführt. Als theoretisch wird diese Evaluation bezeichnet, weil sie nicht anhand empirischer Daten, sondern durch die Betrachtung verschiedener Rechenergebnisse von SCSM erfolgt. Hierzu werden Listen mit geplanten Einsatzzeiten zwischen 8 Uhr und 16 Uhr festgelegt. Die Einsatzzeiten sind außerdem je Liste auf alle Werktage in Zeitspannen von einer bis zu acht Wochen festgelegt.

Im ersten Schritt soll die Veränderung der Stichprobenqualität durch SCSM gezeigt werden. Die folgende Abbildung zeigt dazu zunächst die Stichprobenqualität der empirisch erhobenen Daten für alle Linien und Zeitfenster zwischen 8 Uhr und 16 Uhr.

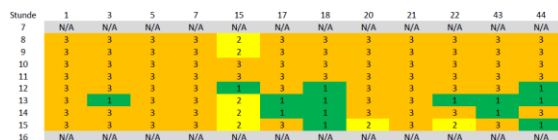


Abbildung 3: Stichprobenqualität der empirischen Eingangsdaten

Es ist zu erkennen, dass keine flächendeckend gute Stichprobenqualität vorliegt. Alle Felder in Orange deuten auf eine unzureichende Stichprobenqualität hin. Bereits nach vier Wochen verplanter Dienste zeigt sich hier ein deutlich besseres Bild, wie in folgender Abbildung zu sehen ist.

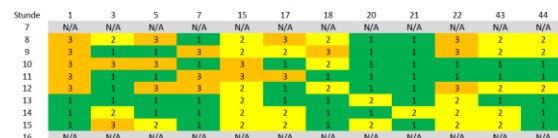


Abbildung 4: Verbesserte Stichprobenqualität nach vier verplanten Wochen

Nach insgesamt acht Wochen verplanter Dienste kann, wie in der nächsten Abbildung zu sehen, von einer flächendeckend guten Stichprobenqualität ausgegangen werden.

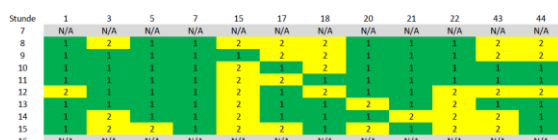


Abbildung 5: Verbesserte Stichprobenqualität nach acht verplanten Wochen

Bedingt durch die Tatsache, dass SCSM nach der bisherigen Definition nicht in der Lage ist, mehrere Kontrollteams zu berücksichtigen, könnten die gezeigten Verbesserungen den Ergebnissen zur Folge bereits durch Einsatz eines einzigen Kontrollteams in einer regelmäßigen Vollzeit-Beschäftigung erreicht werden!

In einem weiteren Schritt soll gezeigt werden, dass verplante Dienste bei einer flächendeckend ausreichenden Stichprobenqualität und gleichbleibenden Beanstandungsquote gleichmäßig über alle Linien verteilt werden. Die folgende Abbildung zeigt die Anzahl verplanter Stunden je Zeitfenster und Linie unter Ausschluss der Stichprobenqualität nach einem Berechnungs-Zeitraum von acht Wochen.

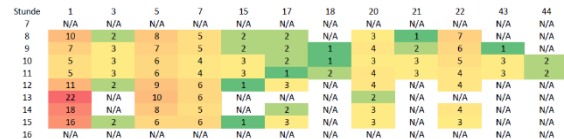


Abbildung 6: Anzahl verplanter Stunden je Zeitfenster und Linie acht verplanter Wochen

Obwohl die Linie 1 ganz links stets die Linie mit der höchsten festgestellten Beanstandungsquote ist, werden auch die übrigen Linien entsprechend verplant, wenngleich auch nicht in der Stärke wie die Linie 1. An dieser Stelle zeigt sich auch die größte Schwachstelle von SCSM. Da zwar die Veränderung der Stichprobenqualität und der Verteilung der Kontrollen, eine mögliche Veränderung der Beanstandungsquote aber nicht berücksichtigt wird, kann besonders bei längerfristigen Planungen nicht garantiert werden, dass die errechneten Dispositionsempfehlungen auch hinsichtlich der Gewinnmaximierung vollumfänglich optimal sind. Würde eine Veränderung der Beanstandungsquote durch die geplanten Einsatzzeiten ebenfalls einbezogen werden, könnte dieses Problem umgangen werden.

5. Zusammenfassung

In den vorherigen Kapiteln wurden die Grundlagen zur Einteilung von Kontroll- und Servicepersonal bei verschiedenen ÖV-Unternehmen und die Herleitung des darauf aufbauenden, praxisnahen Modells beschrieben.

Das Modell unter der Bezeichnung SCSM ist in der Lage, die mit Hilfe der Kontrollgeräte aufgezeichneten Daten zu beurteilen und basierend darauf eine Empfehlung zur möglichst optimalen Einteilung des Kontroll- und Servicepersonals über verschiedene Uhrzeiten und Linien hinweg zu erzeugen. Dabei wird das Kontroll- und Servicepersonal vorrangig dort eingesetzt, wo die festgestellte Beanstandungsquote am höchsten ist. Dabei wird sichergestellt, dass die der Empfehlung zu Grunde liegenden Daten auch als repräsentativ angesehen werden können.

Dies dient nicht zuletzt auch einer Gewinnmaximierung durch die zu erwartenden EBE-Einnahmen. Außerdem ist durch die

gleichmäßige Verteilung der Einsätze sichergestellt, dass das Kontroll- und Servicepersonal von den Fahrgästen vor Ort als präsent wahrgenommen wird, wodurch sich die Fahrgeldhinterziehung nachweislich eindämmen lässt.

Verbesserungen sind, wie bereits im Rahmen der Evaluation genannt, bei der Berücksichtigung der Auswirkungen verplanter Einsätze für die langfristige Planung bezogen auf die zu erwartende Veränderung der Beanstandungsquote und zweitrangig auch des Stichprobenumfanges und der Verteilung der Fahrten denkbar. Statt die letztgenannten Kennwerte einfach zu halbieren, wäre die Kalibrierung von SCSM mit empirisch erhobenen Werten wünschenswert, um eine exaktere Aussage zu erwarteten Veränderungen treffen zu können.

Selbst im Hinblick auf einen kostenlosen ÖPNV bietet SCSM vielfältige Möglichkeiten für Personalplanung anstelle des Kontrollpersonals eingesetztes Servicepersonal. Statt der Beanstandungen von Fahrgästen ohne gültigen Fahrschein wird dann die Anzahl der Fälle erfasst, bei der das Servicepersonal unterstützend eingegriffen hat. Auf diesem Weg lässt sich das verfügbare Servicepersonal bestmöglich dort einsetzen, wo es nachweislich auch am häufigsten benötigt wird.

Vor einer praxistauglichen Implementierung in einer produktiven Umgebung sind außerdem noch zwei wichtige Punkte zu beachten. Zum einen ist SCSM aktuell nicht in der Lage, mehrere Kontrollteams unabhängig voneinander zu berücksichtigen. Besonders bei größeren Verkehrsunternehmen ist der Einsatz mehrerer Kontrollteams allerdings nicht unüblich. Zum anderen findet kein Abgleich mit dem verfügbaren Soll-Fahrplan statt. Es kann also sein, dass Linien in Zeitfenstern oder an Verkehrstagen empfohlen werden, obwohl sie dann überhaupt nicht verkehren. Für eine aussagekräftigere Evaluation wäre außerdem eine Durchführung derselben mit empirischen Daten erstrebenswert.

6. Literatur

- [1] Colin Boyd, Christine Martini, John Rickard, and Allen Russell. 1989. Fare Evasion and Non-Compliance: A Simple Model. *Journal of Transport Economics and Policy* 23, 2, 189–197.
- [2] Fahrmeir, L., Heumann, C., Künstler, R., Pigeot, I., and Tutz, G. 2016. *Statistik. Der Weg zur Datenanalyse*. Springer-Lehrbuch. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg.
- [3] Keuchel, S. and Laurenz, K. 2018. The effects of a higher ticket inspection rate in a medium-size public transportation system. *Transportation Research Procedia* 31, 56–66.
- [4] Lange, T. and Mosler, K., Eds. 2017. *Statistik kompakt*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [5] 2006. *Öffentlicher Personennahverkehr. Herausforderungen und Chancen*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [6] Schwerdtfeger, S., Mehler, F., Wilde, M., and Lanzendorf, M. 2016. *Fahren ohne (gültigen) Fahrschein. Stand der Forschung und medialer Diskurs*. Arbeitspapiere zur Mobilitätsforschung Nr. 12, Goethe-Universität.
- [7] Schwerdtfeger, S., Wilde, M., and Lanzendorf, M. 2016. *Dokumentation von Best-Practice-Beispielen zum Umgang mit dem Fahren ohne (gültigen) Fahrschein*. Arbeitspapiere zur Mobilitätsforschung Nr. 14, Goethe-Universität.
- [8] Thorlacius, P. and Clausen, J. 2010. Scheduling of inspectors for ticket spot checking in urban rail transportation (Aug. 2010).
- [9] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. 2001. *Maßnahmen zur Einnahmesicherung. Teil 2: Kennzahlen der Fahrausweisprüfung und optimaler Kontrollgrad*. BEKA-Verlag, 9708.
- [10] Yin, Z., Jiang, A. X., Tambe, M., Kiekintveld, C., Leyton-Brown, K., Sandholm, T., and Sullivan, J. P. 2012. TRUSTS: Scheduling Randomized Patrols for Fare Inspection in Transit Systems Using Game Theory. *AIMag* 33, 4, 59.