

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Immer pünktlich?

Eine Analyse möglicher Verspätungsfaktoren von Trams in der Stadt Zürich



Modularbeit Datenanalyse

von

Iseli Jonas

Kraft Julian

Bachelorstudiengang Umweltingenieurswesen

Abgabedatum 02.02.2025

Zusammenfassung

Pünktlichkeit ist ein entscheidender Faktor für die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs. Diese Arbeit untersucht die Pünktlichkeit der Trams in Zürich und analysiert mögliche Einflussfaktoren auf Verspätungen zwischen 2016 und 2022. Der Schwerpunkt liegt auf den Unterschieden in der durchschnittlichen Ankunftsverspätung in Abhängigkeit von Jahr, Tageszeit und Trammodell (Mirage, Tram2000, Cobra, Flexity). Die statistische Analyse zeigt signifikante Unterschiede zwischen den Jahren, Tageszeiten und Trammodellen. Besonders auffällig sind mehr Verspätungen in den frühen Morgenstunden und während der Hauptverkehrszeiten. Die Unterschiede zwischen den Trammodellen können teilweise durch deren spezifische Nutzung zu den Hauptverkehrszeiten erklärt werden. Wechselwirkungen zwischen Trammodell und Tageszeit lassen sich nicht ausschliessen, weshalb eine mehrfaktorielle Analyse empfohlen wird. Eine Erweiterung der Analyse um eine räumliche Komponente könnte zudem zusätzliche Einflussfaktoren aufdecken.

Einleitung

Der öffentliche Verkehr spielt eine zentrale Rolle für nachhaltige Mobilität und den wirtschaftlichen Erfolg von Städten (Arsić & Jovanović, 2024; Roselló et al., 2016). Eine hohe Pünktlichkeit ist dabei essenziell, um die Attraktivität des öffentlichen Verkehrs zu gewährleisten (Göransson & Andersson, 2023). Jedoch wird die Pünktlichkeit von zahlreichen Faktoren beeinflusst, darunter der private motorisierte Verkehr (Neradilová et al., 2023) oder ungünstige Wetterbedingungen (Rum et al., 2024). Auch das Alter der Fahrzeuge könnte eine Rolle spielen, da ältere Fahrzeuge möglicherweise anfälliger für technische Störungen sind und dadurch Verspätungen verursachen könnten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Pünktlichkeit der Trams in der Stadt Zürich zu analysieren und mögliche Faktoren, welche zu Verspätungen führen zu identifizieren. Im Fokus stehen dabei die folgenden Fragestellungen:

- Gibt es Unterschiede in der durchschnittlichen Ankunftsverspätung der Trams in der Stadt Zürich zwischen den analysierten Jahren?
- Gibt es Unterschiede in der durchschnittlichen Ankunftsverspätung zwischen verschiedenen Tageszeiten?
- Unterscheidet sich die durchschnittliche Ankunftsverspätung zwischen den verschiedenen Trammodellen (Mirage, Tram2000, Cobra, Flexity)?

Methoden

Für die Beantwortung dieser Fragen wurde eine Kombination von Python (Version 3.11.6) und R (Version 4.4.2) eingesetzt. Für den Datenbezug wurde Python verwendet, für die Datenaufbereitung und die Datenauswertung wurde R verwendet. Aufgrund der grossen Datenmenge von rund 300 Millionen Datenpunkten wurden alle Berechnungen auf dem Hochleistungsrechner (HPC) des IUNR durchgeführt.

Datensatz

Beim verwendeten Datensatz handelt es sich um einen umfangreichen Datensatz mit sämtlichen geplanten und effektiven Ankunfts- und Abfahrtszeiten aller öffentlichen Verkehrsmittel der Verkehrsbetriebe Zürich (VBZ) an jeder Station von den Jahren 2016 bis 2022. Dabei steht für jede Kalenderwoche eine CSV-Datei mit den entsprechenden Informationen zur Verfügung. Für den Datenbezug wurden deshalb über die API von opendata.swiss die Download-URL's aller CSV-Dateien bezogen.

Datenaufbereitung

Um die Daten für die Analyse aufzubereiten, wurden nur Einträge von regulären Fahrten von Tramlinien berücksichtigt, dies geschah anhand der Liniennummer (≤ 20 gefiltert). Weiter wurden Spalten, welche für die Analyse nicht benötigt wurden, entfernt.

Anschliessend wurde aus der Differenz der geplanten und effektiven Ankunftszeit die Verspätung in Sekunden berechnet. Dabei wurde die maximale Abweichung auf ± 1 Stunde begrenzt. Fahrten mit einer grösseren Abweichung wurden auf diesen Wert korrigiert. Zudem wurden die Daten gemäss der Verspätungsdefinition der VBZ (Wirz, 2020) in Kategorien eingeteilt: Fahrten, die mehr als 1 Minute zu früh ankamen, galten als zu früh. Pünktlich waren Fahrten mit einer Verspätung von bis zu 2 Minuten, verspätet bei weniger als 5 Minuten und stark verspätet bei über 5 Minuten.

Für die Analyse der Verspätungen nach Tageszeit wurden die Daten stundenweise kategorisiert. Jede Fahrt wurde dabei der vollen Stunde zugeordnet, in der sie stattfand (z. B. 08:00:00 - 08:59:59 zur 8-Uhr-Kategorie).

Zur Auswertung der Verspätung nach Trammodellen wurden die Fahrten anhand der Fahrzeugnummer kategorisiert: 1601–1690 für «Mirage», 2001–2435 für «Tram2000», 3001–3088 für «Cobra» und 4001–4070 für «Flexity» (*Trams*, o. J.).

Statistische Auswertung

Alle statistischen Tests wurden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ durchgeführt. Die Varianzhomogenität der Stichprobengruppen wurde zunächst mit einem Bartlett-Test

überprüft. Da die Varianzen in allen Fällen heterogen waren, wurde eine Welch-ANOVA (One-way-Test) durchgeführt. Anschliessend wurden paarweise t-Tests berechnet, wobei die Holm-Korrektur zur Anpassung des Signifikanzniveaus angewendet wurde.

Resultate

Verspätung pro Jahr

Die statistische Analyse der durchschnittlichen Ankunftsverspätungen mit der Welch-ANOVA ergab signifikante Unterschiede zwischen den Jahren ($p < 0.001$). Auch der anschliessende Post-Hoc-Test zeigte signifikante Unterschiede zwischen allen untersuchten Jahren ($p < 0.001$). Die mittleren Verspätungswerte reichten von 10.3 ± 73.3 Sekunden (\pm Standardabweichung) im Jahr 2020 bis zu 25.2 ± 78.0 Sekunden im Jahr 2017. Die Jahre 2018 und 2019 lagen mit durchschnittlichen Verspätungen von 25.0 ± 85.1 Sekunden beziehungsweise 24.8 ± 91.2 Sekunden auf einem ähnlichen Niveau. Im letzten betrachteten Jahr, 2022, betrug die durchschnittliche Ankunftsverspätung 16.9 ± 91.0 Sekunden.

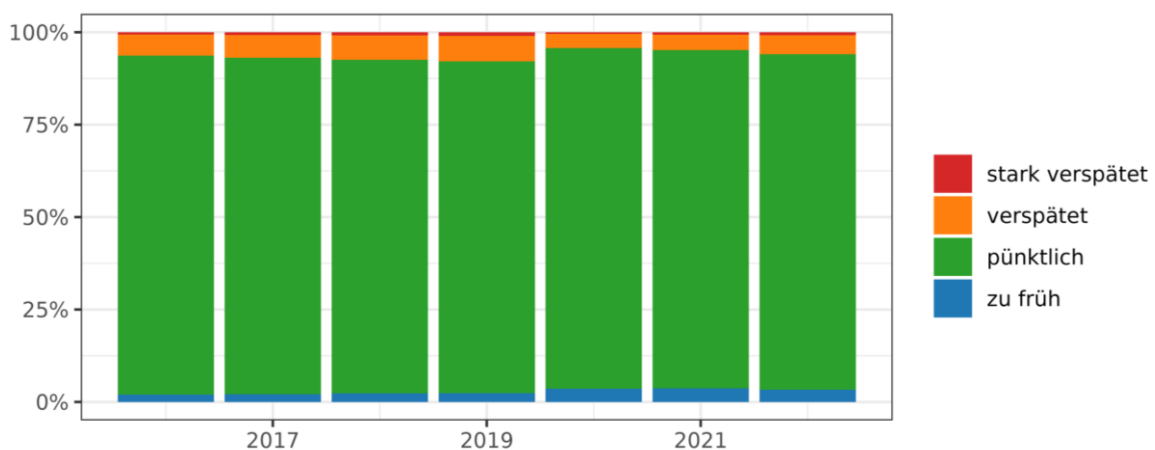


Abbildung 1 Anteile der Verspätungskategorien «zu früh», «pünktlich», «verspätet» und «stark verspätet» pro Jahr (2016-2022). Die relativen Häufigkeiten der Tramfahrten in den jeweiligen Kategorien werden für jedes Jahr dargestellt.

Diese Unterschiede spiegeln sich auch in den Anteilen der Verspätungskategorien wider (→ Abbildung 1). Im Jahr 2020 waren 3.9 % aller Fahrten verspätet und 0.4 % stark verspätet, womit dieses Jahr die niedrigsten Werte aufwies. In den Jahren 2017 bis 2019 lagen die Anteile verspäteter Fahrten bei 6.2 %, 6.6 % und 6.9 %, während die Anteile stark verspäteter Fahrten bei 0.7 %, 0.9 % und 1.0 % lagen.

Verspätung pro Tageszeit

Auch die Auswertung bezüglich der Verspätung pro Tageszeit ergab signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Tageszeiten ($p < 0.001$). Der nachfolgende Post-Hoc Test zeigte, dass sich einzig die Verspätung zwischen 15 Uhr und 16 Uhr ($p = 0.20$) und zwischen 18

Uhr und 22 Uhr ($p = 0.12$) nicht signifikant unterscheiden. Alle anderen Uhrzeiten unterscheiden sich signifikant untereinander ($p < 0.001$).

Die höchsten mittleren Verspätungen zeigten sich um 1 Uhr (27.1 ± 138.2 Sekunden) und 2 Uhr morgens (34 ± 116.6 Sekunden) und um 17 Uhr (28.4 ± 104.7 Sekunden). Die tiefsten mittleren Verspätungen wurden um 5 Uhr (6.9 ± 63.7 Sekunden), 4 Uhr (8.0 ± 70.1 Sekunden) und 11 Uhr (12.5 ± 70.7 Sekunden) gemessen.

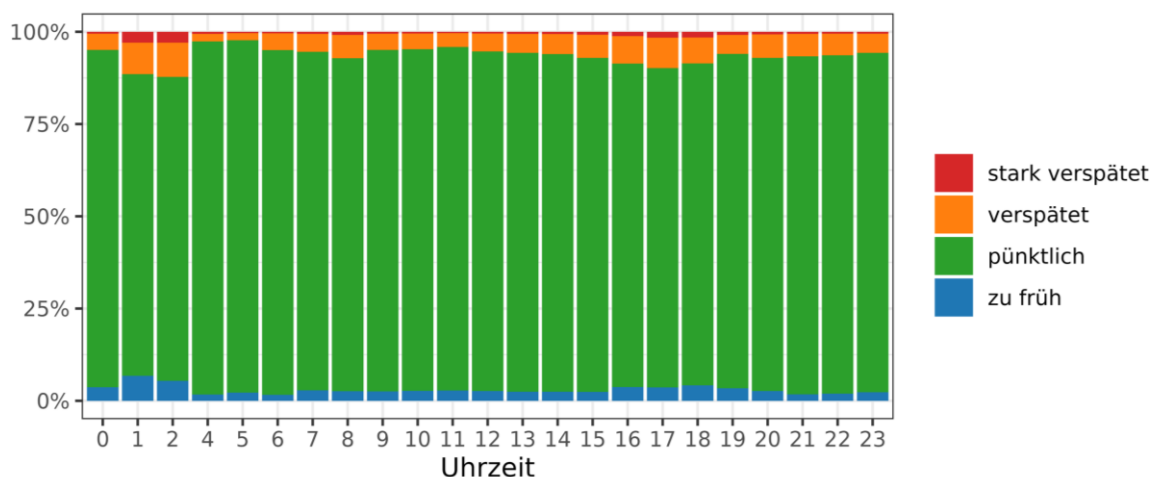


Abbildung 2: Anteile der Verspätungskategorien «zu früh», «pünktlich», «verspätet» und «stark verspätet» pro Uhrzeit des Tages. Die relativen Häufigkeiten der Tramfahrten in den jeweiligen Kategorien werden für jede Stunde dargestellt.

Dies zeigt sich auch in Abbildung 2: Die höchsten Anteile an verspäteten und stark verspäteten Fahrten weisen die Stunden 1 Uhr (8.6 % und 3.0 %) und 2 Uhr (9.2 % und 3.0 %) auf, gefolgt von 17 Uhr (8.3 % und 1.6 %). Die geringsten Verspätungen wurden in den frühen Morgenstunden um 4 Uhr (2.1 % und 0.6 %) und 5 Uhr (1.9 % und 0.4 %) und um 11 Uhr (3.8 % und 0.4 %) registriert.

Verspätung pro Trammodell

Die statistische Analyse der durchschnittlichen Ankunftsverspätung pro Trammodell ergab signifikante Unterschiede ($p < 0.001$). Auch der anschließende Post-Hoc Test ergab signifikante Unterschiede in der durchschnittlichen Ankunftsverspätung zwischen allen untersuchten Trammodellen ($p < 0.001$). Die höchste Verspätung hat dabei das älteste Trammodell «Mirage» mit einer durchschnittlichen Ankunftsverspätung von 50.5 ± 134 Sekunden, gefolgt vom neuesten Modell «Flexity» mit 27.2 ± 101.9 Sekunden. Die weiteren Trammodelle «Tram2000» und «Cobra» weisen eine durchschnittliche Ankunftsverspätung von 19.7 ± 85.3 Sekunden respektive 19.3 ± 82.3 Sekunden auf.

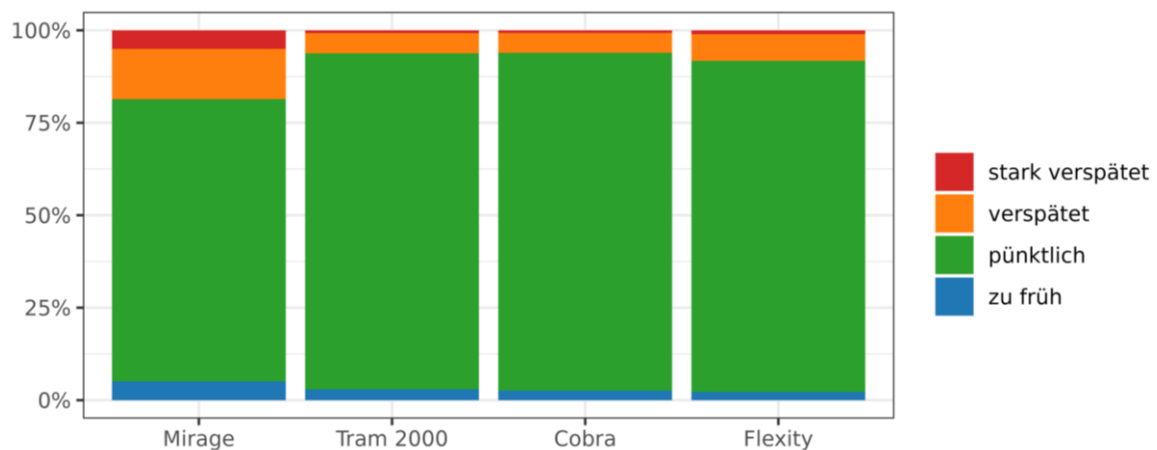


Abbildung 3: Anteile der Verspätungskategorien «zu früh», «pünktlich», «verspätet» und «stark verspätet» pro Trammodell (Mirage, Tram2000, Cobra, Flexity). Die relativen Häufigkeiten der Tramfahrten in den jeweiligen Kategorien werden für jedes Modell dargestellt

Diese Unterschiede spiegeln sich auch in der Verteilung der Verspätungskategorien wider (→ Abbildung 3). «Mirage» weist mit 13.6 % verspäteten und 5.0 % stark verspäteten Fahrten die höchsten Anteile auf. Deutlich niedriger sind die Werte für «Flexity» (7.2 % und 1.0 %), «Tram2000» (5.5 % und 0.7 %) sowie «Cobra» (5.4 % und 0.7 %).

Diskussion

Die Unterschiede in der Ankunftsverspätung der Trams zwischen den Jahren sind insgesamt gering, jedoch zeigt sich ein Rückgang der Verspätungen im Jahr 2020. Dies könnte mit der geringeren Auslastung des öffentlichen Verkehrs und dem reduzierten Verkehrsaufkommen während der COVID-19-Pandemie zusammenhängen. In den folgenden Jahren zeichnet sich eine Tendenz zurück auf das Niveau der Vor-COVID-Zeit ab.

Die Analyse nach Tageszeiten zeigt signifikante Unterschiede, insbesondere die erhöhten Verspätungen um 1 und 2 Uhr morgens fallen auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist die geringere Anzahl an Fahrten in diesen Zeiträumen – beispielsweise wurden um 2 Uhr lediglich 23488 Fahrten erfasst, während zwischen 6 und 20 Uhr jeweils über 11 Millionen Fahrten registriert wurden. Dadurch könnte der Einfluss einzelner verspäteter Fahrten in den nächtlichen Stunden überproportional stark ins Gewicht fallen. Zudem könnte es sein, dass aufgrund des ausgedünnten Fahrplans Fahrzeuge für Anschlussverbindungen länger warten und dadurch Verspätungen in Kauf nehmen.

Auffällig ist zudem, dass in der abendlichen Hauptverkehrszeit (16–18 Uhr) mehr Verspätungen auftreten als in der morgendlichen (7–9 Uhr). Generell zeigt sich während der Hauptverkehrszeiten eine höhere durchschnittliche Verspätung im Vergleich zu den übrigen Tageszeiten. Dies ist wenig überraschend, da während der Stosszeiten ein erhöhtes Fahrgastaufkommen herrscht, wodurch sich die Haltezeiten an den Stationen verlängern können.

Die Analyse der Trammodelle zeigt, dass Tram2000 und Cobra die geringsten Verspätungen aufweisen, während Mirage und Flexity häufiger verspätet sind. Bei Mirage ist jedoch zu beachten, dass dieses Modell aufgrund von Lieferverzögerungen bei den neuen Flexity-Trams zwischen November 2019 und April 2021 wieder in Betrieb genommen wurde – allerdings nur während der Stosszeiten (Furer & Djurdjevic, 2019; Tobler, 2019). Die erhöhte Verspätung des Mirage-Modells ist daher nicht zwingend auf das Fahrzeug selbst zurückzuführen, sondern auf seine Einsatzzeiten, da in den Stosszeiten generell mehr Verspätungen auftreten als ausserhalb, wie bereits diskutiert. Bei den Flexity-Trams könnten zudem technische Störungen zu Beginn des Betriebs für die vermehrten Verspätungen verantwortlich sein (Siegrist, 2021). Hier wäre interessant zu sehen, wie sich die Verspätung dieses Trammodells in Zukunft entwickelt.

Ausblick

Die Analyse hat gezeigt, dass Verspätungen durch verschiedene Faktoren beeinflusst werden. Besonders auffällig waren die signifikanten Unterschiede im Zusammenhang mit der Tageszeit. Das Trammodell, obwohl ebenfalls mit signifikanten Unterschieden, scheint hingegen einen weniger starken Einfluss zu haben. Eine weiterführende Untersuchung könnte durch eine mehrfaktorielle Analyse erfolgen, um die Wechselwirkungen zwischen den Faktoren genauer zu erfassen und der Einfluss einzelner Faktoren zu quantifizieren. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, die Untersuchung um eine räumliche Komponente zu erweitern, um zu ermitteln, welche Tramlinien oder Stadtgebiete zu bestimmten Zeiten besonders betroffen sind. Eine zusätzliche Perspektive könnte die Einbeziehung anderer Verkehrsmittel, wie Busse, sein. Langfristig könnte das Ziel darin bestehen, die Abläufe im öffentlichen Verkehr der Stadt Zürich zu modellieren, um präzisere Prognosen für mögliche Verspätungen zu entwickeln und so die Planung und Effizienz des Systems weiter zu optimieren.

Literatur

- Arsić, M., & Jovanović, D. (2024). The role of public urban passenger transport in sustainable mobility. *Ekološko inženjerstvo - mesto i uloga, stanje i budući razvoj* (16), 2. Aspekti zaštite prostora, 146–151. <https://doi.org/10.5937/EKO-ENG24011A>
- Furer, J., & Djurdjevic, M. (2019, Oktober 21). «Das übersteigt meine schlimmsten Träume». *20 Minuten*. <https://www.20min.ch/story/das-uebersteigt-meine-schlimmsten-traeume-151046265443>
- Göransson, J., & Andersson, H. (2023). Factors that make public transport systems attractive: A review of travel preferences and travel mode choices. *European Transport Research Review*, 15(1), 32. <https://doi.org/10.1186/s12544-023-00609-x>
- Neradilová, H., Fedorko, G., Molnár, V., Fabianová, J., Michalik, P., & Lacková, L. (2023). Increasing public transport system operation efficiency in the city of Košice—The case study. *Transportation Research Procedia*, 74, 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.145>
- Roselló, X., Langeland, A., & Viti, F. (2016). *Public Transport in the Era of ITS: The Role of Public Transport in Sustainable Cities and Regions* (G. Gentile & K. Noekel, Hrsg.; S. 3–27). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-25082-3_1
- Rum, S. N. M., Yusoff, M. M. N. M., & Mahdi, A. (2024). Public Transport Delay Prediction using Deep Learning. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 168–177. <https://doi.org/10.37934/araset.59.2.168177>
- Siegrist, P. (2021, Februar 10). Wie schlägt sich das Flexity im Alltag? *Tages-Anzeiger*. <https://www.tagesanzeiger.ch/wie-schlaegt-sich-das-flexity-im-alltag-842218023697>
- Tobler, D. (2019). *Zusatzkurs auf der Linie 8 ab 25. Februar 2019* [Medienmitteilung]. <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/die-vbz/medien/medienmitteilung/2019/01/zusatzkurs-auf-der-linie-8-ab-25--februar-2019.html>
- Trams*. (o. J.). Abgerufen 27. Januar 2025, von <https://www.stadt-zuerich.ch/vbz/de/die-vbz/fahrzeuge/trams0.html>
- Wirz, U. (2020, September 8). «Pünktlichkeit ist die Tugend der Gelangweilten». *VBZ Online*. <https://vbzonline.ch/puenktlichkeit-ist-die-tugend-der-gelangweilten/>

Code

Für dieses Projekt erstellte Skripte sind auf GitHub verfügbar:

https://github.com/juliankraft/DaAn_Projektarbeit

Bilder

Das Titelbild wurde mit DALL·E generiert