

## **Zählung des Fussverkehrs Bahnhof Brugg**

**Erhebung der Fussverkehrsströme in den Personenunterführungen durch Anwendung der Bluetooth- und WiFi-Technologie**

---



## **Schlussbericht**

Verfasser: Christian Pestalozzi, Pestalozzi & Stäheli GmbH

Basel, 9. Juli 2021

---

**Piloterhebung im Rahmen des Forschungsprojektes SVI 2017/009  
Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Projektbeschrieb</b> .....	<b>3</b>
1.1	Ausgangslage mit Bezug zum Forschungsprojekt .....	3
1.2	Zielsetzung .....	3
<b>2</b>	<b>Durchführung der Piloterhebung beim Bahnhof Brugg</b> .....	<b>4</b>
2.1	Standort .....	4
2.2	Eingesetzte Geräte .....	4
2.3	Durchführung der Zählung .....	6
2.4	Datenschutzkonzept .....	7
2.5	Begleitende Informationsmassnahmen .....	7
<b>3</b>	<b>Erhobene Daten und Kalibration</b> .....	<b>9</b>
3.1	Ausgewertete Wegbeziehungen .....	9
3.2	Kalibrierung der Bluetooth- und Wifi-Signale .....	9
3.3	Auswertung der rohen Bluetooth- und Wifi-Signale .....	11
3.4	Vergleich mit manuellen Zählungen .....	11
<b>4</b>	<b>Erste Ergebnisse</b> .....	<b>14</b>
4.1	Personenunterführung Süd .....	14
4.2	Personenunterführung Nord .....	17
4.3	Vergleich mit den Daten des öffentlichen Verkehrs .....	20
<b>5</b>	<b>Korrigierte Ergebnisse</b> .....	<b>22</b>
5.1	Personenunterführung Süd .....	22
5.2	Personenunterführung Nord .....	26
<b>6</b>	<b>Einfluss der der Studienzeiten der FHNW</b> .....	<b>31</b>
<b>7</b>	<b>Einfluss der Pandemie</b> .....	<b>32</b>
<b>8</b>	<b>Beurteilung der eingesetzten Technologien</b> .....	<b>33</b>
8.1	Wärmebildkamera Nilousense IRview, Universität Lausanne .....	33
8.2	Bluetooth-WiFi-Geräte Nilousense BTpath, Universität Lausanne .....	34
8.3	Fazit .....	35
<b>9</b>	<b>Schlussbemerkungen</b> .....	<b>36</b>
<b>10</b>	<b>Anhang</b> .....	<b>38</b>
10.1	Projektbeschrieb der Forschung .....	38
10.2	Datenschutzkonzept .....	40

# 1 Projektbeschreibung

## 1.1 Ausgangslage mit Bezug zum Forschungsprojekt

Ein wichtiges Element der Forschungsarbeit SVI 2017/009 «Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs» sind Piloterhebungen von Fussverkehrsfrequenzen, die in verschiedenen Deutschschweizer Städten erhoben werden. Bei diesen Piloterhebungen werden verschiedene Zählmethoden angewendet, um deren Vor- und Nachteile sowie deren optimales Einsatzspektrum bestimmen zu können. Im Weiteren liefern die erhobenen Daten den Städten wichtige Informationen zu Fussverkehrsfrequenzen und tragen dazu bei, Informationslücken zu füllen. Einen detaillierteren Projektbeschreibung der Forschung befindet sich im Anhang dieses Berichtes.

## 1.2 Zielsetzung

Mit der Erhebung in den Personenunterführungen am Bahnhof Brugg/Windisch sollen die Fussverkehrsfrequenzen und Belastungsströme abgebildet werden. Zusätzlich wird angestrebt, Erkenntnisse über die Häufigkeit der verschiedenen Laufwege (Anteil den Bahnhof querender Personen, Anteil der Personen, die mit dem Zug ankommen oder von dort abfahren) zu gewinnen.

Um diese Daten zu gewinnen, wird ein Pilotversuch mit Bluetooth/WiFi-Sensoren (BTWF-Sensoren), die an geeigneten Stellen installiert werden, durchgeführt. Zur Kalibration der Daten aus den BTWF-Sensoren kommen Wärmebildkameras zum Einsatz. Als Resultat werden möglichst gute Angaben zu den Belastungsströmen im Tagesgang erwartet.

Die Daten werden, wenn möglich mit jenen der SBB (Zu-/Aussteigende) und allenfalls von Postauto Schweiz ergänzt bzw. abgeglichen. Abklärungen bei den Transportbetrieben werden seitens des Kantons in Koordination mit dem Projekt vorgenommen.

Mit diesem Pilotversuch wird auch angestrebt, möglichst verlässliche Daten über die Tauglichkeit und Präzision von Bluetooth-/WiFi-Sensoren für die Erhebung von Fussverkehrsströmen zu gewinnen sowie die Relevanz und Möglichkeiten von Kalibrationszählungen in Verbindung mit jenen Technologien zu bestimmen.

## 2 Durchführung der Piloterhebung beim Bahnhof Brugg

### 2.1 Standort

Die Standorte der BTWF-Sensoren sowie der Wärmebildkameras zur Kontrollmessungen liegen in den beiden Personenunterführungen des Bahnhofs Brugg (Nachfolgend Unterführung Nord und Unterführung Süd genannt) sowie in den Zugängen. Das gesamte Erhebungskonzept wie auch die einzelnen Standorte wurden mit den zuständigen Personen der SBB besprochen.

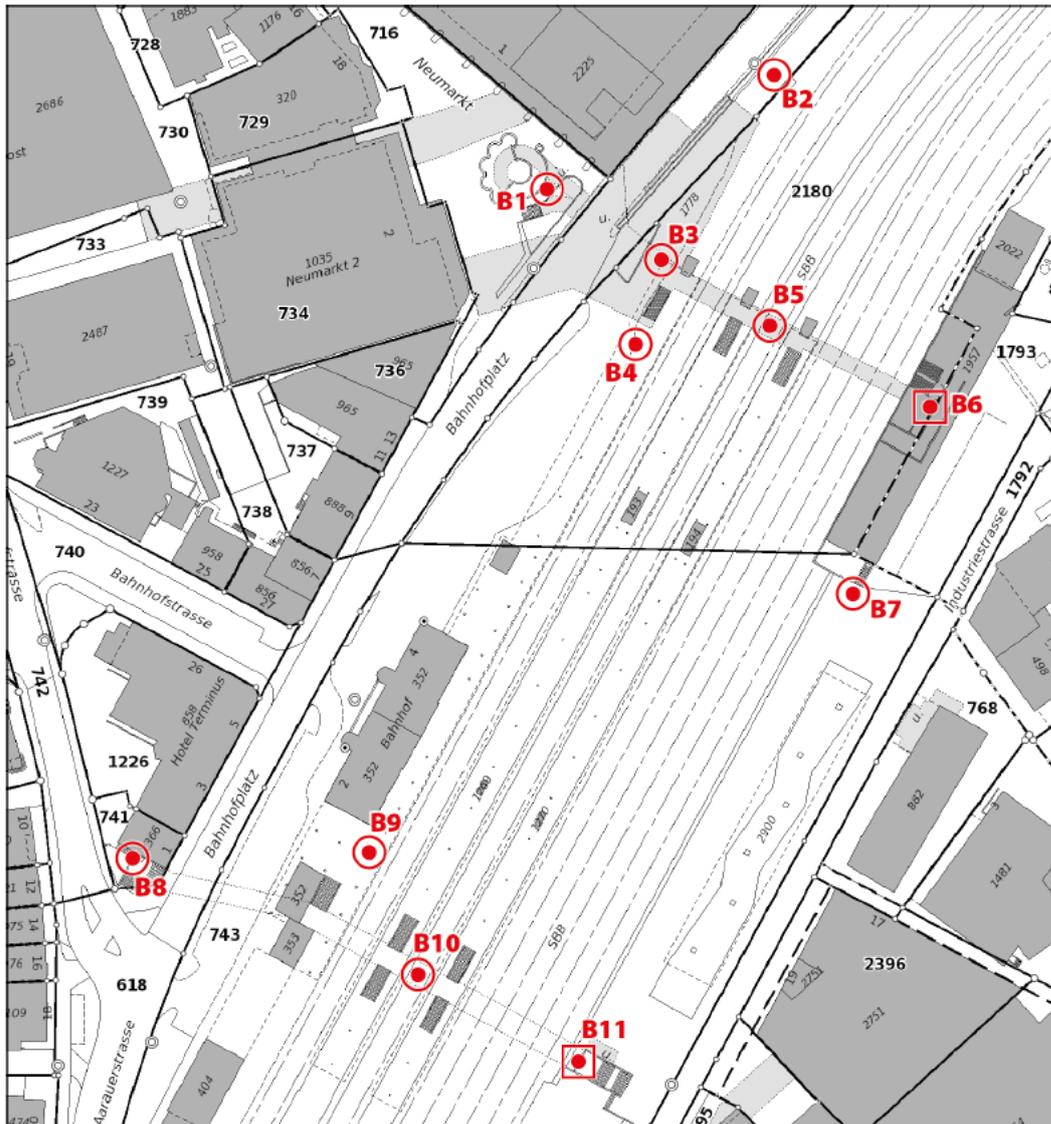


Abb. 1 Bahnhof Brugg, Erhebungsstandorte (B6 und B11: zusätzlich Wärmebildkameras zur Datenkalibration)

### 2.2 Eingesetzte Geräte

Die Erfassung der Wegbeziehungen setzt voraus, die Personen zwischen zwei Zählpunkten verfolgen zu können. Dazu werden Bluetooth- und WiFi-Signale der Passanten erfasst. Die Reichweite dieser Signale liegt bei ungefähr 10 bis 30 Metern für Bluetooth und etwas mehr für die WiFi-Signale. Die erfassten Signale werden zusammen mit einer codierten Identifikation des jeweiligen Apparates gespeichert. Die Kombination der auf verschiedenen Messgeräten gespeicherten Information erlaubt es, Rückschlüsse auf die Wege der Personen zu ziehen.

Es ist davon auszugehen, dass Personen unterwegs sind,

- die ein oder mehrere Geräte mit aktiviertem Bluetooth oder WiFi auf sich tragen,
- die ein oder mehrere Geräte auf sich tragen, jedoch Bluetooth oder WiFi nicht aktiviert haben,
- die kein Gerät auf sich tragen.

Aus diesem Grund müssen die von den BTWF-Sensoren erfassten Signale mit einer anderen Erhebungsmethode kalibriert werden, um zuverlässige Frequenzdaten zu erhalten. Für dieses Projekt wurden dazu Wärmebildkameras ausgewählt.

Für die Erhebung in Brugg wurden die folgenden Prototypen der Universität Lausanne eingesetzt:

	<b>Wärmebildkamera (Infrarot-Kamera)</b>	<b>Bluetooth-/WiFi</b>
		
<b>Produktname</b>	Nilousense IRview	Nilousense BTpath
<b>Gewicht Gerät</b>	0.975 kg	0.4 kg (ohne Batterie) 25 kg (mit Batterie)
<b>Abmessungen</b>	220 x 135 x 105 mm	600 x 300 x 480 mm (im Batteriebetrieb) 90 x 60 x 30 mm (mit Stromanschluss)
<b>Empfohlene Installations- höhe Gerät</b>	2.5 m	grundsätzlich flexibel, meist ca. 10 cm über Boden.
<b>Reichweite</b>	Max. 12 m	Etwa 20 m
<b>Stromzufuhr und Betriebsdauer Batterie</b>	Interne Batterie (hält bei dauernder Aufnahme max. 3 Tage, bei Bewe- gungsaktivierung 1-2 Wochen)	Interne Batterie (hält ca. 2 Wochen)
<b>Installationsdauer inkl. ein- richten und kalibrieren</b>	0.5 h	0.5 h + bei Wandbefestigung Bohrha- ken montieren (+ 0.5h)
<b>Speicherort der Daten</b>	Micro-SD-Karte, Übertragung mit spezi- ellem Datentransfer-Programm	Transfer per SIM-Karte oder Ethernet- Netzwerk auf Server
<b>Kosten Gerät (exkl. MwSt.)</b>	CHF 1'580	CHF 340 (nur Zählgerät) CHF 850 (komplett ausgerüstet mit Bat- terie und Batteriekoffer)
<b>Kosten Zubehör / Beschrei- bung Zubehör (exkl. MwSt.)</b>	–	Ersatz-Batterie: CHF 260 Kosten für SIM-Karten-Übertragung: 15 CHF / Monat
<b>Miete Gerät inkl. Zubehör pro Monat (exkl. MwSt.)</b>	CHF 420	CHF 160 nur Zählgerät CHF 330 pro Gerät bei Batteriebetrieb
<b>Kosten Datenmanagement (exkl. MwSt.)</b>	CHF 0.40/h beim Kauf des Geräts sind 800 h Aus- wertung inbegriffen Bei Miete Auswertung inbegriffen	-

	<p><b>Wärmebildkamera (Infrarot-Kamera)</b></p> 	<p><b>Bluetooth-/WiFi</b></p> 
<p><b>Beabsichtigte Weiterentwicklung der Geräte</b></p>	<p>2022: Neuer Auswertungsalgorithmus 2022: Auswertung vor Ort mit Computer-Modul (kompatibel mit existierendem Gerät)</p>	<p>2022: integrierte Kalibrierung möglich</p>
<p><b>Neue Geräte voraussichtlich auf dem Markt ab</b></p>	<p>Revidierte Hardware ab 2022 auf dem Markt</p>	<p>ab 2022 auf dem Markt</p>

Die Geräte wurden durch Christian Kaiser, Universität Lausanne, gemäss untenstehender Skizze installiert. Die erforderlichen Bohrhaken wurden durch eine externe Firma gesetzt.

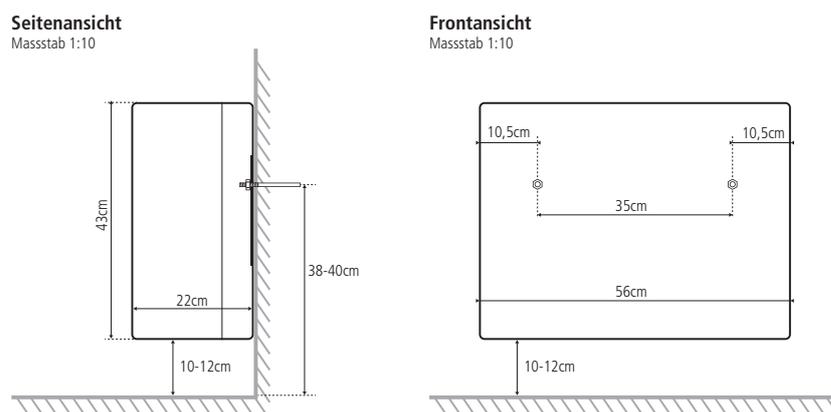


Abb. 2 Montage der Bluetooth/WiFi-Geräte

Zur Kontrolle wurden an den Standorten der Wärmebildkameras zusätzliche manuelle Zählungen vorgenommen.

### 2.3 Durchführung der Zählung

Die Erhebung wurde von Montag 31.8.2020 bis am Sonntag 20.9.2020 während 24 Stunden pro Tag durchgeführt.

Beide Gerätetypen hatten jedoch grosse Ausfallzeiten, weshalb keine vollständige Auswertung über 3 Wochen vorliegt.

Ergänzend zu den automatischen Erhebungen wurden an zwei Standorten während 3 Stunden händische Kontrollzählungen durchgeführt, und zwar am 1.9.2020 und am 17.9.2020 beim Standort B11 und am 8.9.2020 am Standort B6, jeweils von 7:30 bis 8:30 Uhr, von 9:30 bis 10:30 sowie von 11:30 bis 12:30 Uhr.

## 2.4 Datenschutzkonzept

Die Erkennung der Bluetooth- und WiFi-Geräten geschieht mittels der MAC-Adresse der jeweiligen Geräte. Diese Adressen können alleine nicht einem Besitzer zugeordnet werden, werden aber im Rahmen dieses Projektes trotzdem als schützenswert betrachtet. Die MAC-Adressen werden mit je zwei sich alle 5 Minuten wechselnden Zufallswerten kombiniert und danach mit einer Einweg-Hashfunktion irreversibel in einen Hashwert verrechnet. Da sich die Erneuerungsperioden der beiden Zufallswerten überlappen, erlaubt es dies, ein Gerät als dasselbe zu erkennen, auch wenn es sich genau im Moment des Wechsels eines Zufallswertes im Radius des Empfängergerätes befindet. Somit werden Geräte, die sich innerhalb von einem Zeitraum von maximal 5-10 Minuten (einfache bis doppelte Wechselferioden des Zufallswertes) im Radius eines Empfängergerätes befinden, identisch identifiziert. Ein Gerät, das nach einer längeren Zeitspanne, z. B. nach 12 Minuten wieder von einem Empfängergerät erfasst wird, wird jedoch als neues Gerät erfasst. Die MAC-Adressen werden sofort nach Umwandlung gelöscht, wie auch die gebrauchten Zufallswerte.

Dies erlaubt es, zusammenhängende Wegstrecken von Benutzern innerhalb des Bahnhofes aufzunehmen, ohne nebenbei längerfristige, spezifische Bewegungsmuster aufzunehmen, die einer bestimmten Person zugeordnet werden könnten.

Das Thema Datenschutz wurde vorgängig mit der Beauftragten für Öffentlichkeit und Datenschutz des Kantons Aargau sowie mit der SBB besprochen. Das ausführliche Datenschutzkonzept befindet sich im Anhang.

## 2.5 Begleitende Informationsmassnahmen

Die Datenerhebung wird der Bevölkerung transparent kommuniziert. Der Lead für die Kommunikation zu dieser Kampagne ist eindeutig bezeichnet über einen Single Point of Contact (SPoC). Sowohl die aktive Kommunikation zur Kampagne als auch Anfragen von Journalisten oder Einwohnerinnen und Einwohnern werden über diesen SPoC beantwortet. Bei allfälligen Anfragen an die Medienstelle SBB wird diese an den SPoC verwiesen. Der SPoC für diese Kampagne ist die Kommunikationsstelle des Kantons Aargau.

Im Rahmen der transparenten Kommunikation zuhanden der Bevölkerung und den Medien werden folgende Massnahmen getroffen:

- Im Sektor der Datenerhebung werden Informationstafeln aufgestellt, die über die Kampagne informieren.
- Die Informationen zur Kampagne werden im Weiteren auch den Medien zur Verfügung gestellt.
- Eine spezielle Webseite mit Informationen zur Kampagne wird aufgeschaltet. Diese Webseite informiert über alle Belange der Datenerhebung, weist auf die getroffenen Datenschutzmassnahmen hin und erklärt, was mit den erhobenen Daten geschieht.
- Auf jedem BTWF-Gerät und auf den Wärmebildkameras wird eine Informationsetikette angebracht mit dem Zweck des Gerätes, dem Link zu der Webseite, sowie Kontaktinformationen des SPoC.
- Die Gemeindeverwaltungen von Brugg und Windisch sowie die Regionalpolizei wurden ebenfalls informiert.

# In den beiden Unterführungen werden die Fussgänger erfasst

Informationen fliessen in die Planungen rund um den Bahnhof ein.

**Brugg** Der Kanton Aargau erhebt gemeinsam mit den SBB die Fussverkehrsfrequenzen in den beiden Hauptunterführungen am Bahnhof Brugg und ermittelt ebenfalls die zurückgelegten Wegstrecken der Passanten. Erhoben werden die Daten im Auftrag des Bundesamts für Strassen von der Universität Lausanne im Rahmen des Forschungsprojekts «Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs», hält das kantonale Departement Bau, Verkehr und Umwelt in einer Medienmitteilung fest.

Konkret soll die Frequenzmessung aufzeigen, wie viele Personen den Zug nehmen und wie viele Personen die Unterführung nur zur Querung benutzen. Diese Informationen fliessen in die Stadt- und Bahnhofplanungen ein.

Erfasst wird die Anzahl Personen zwischen zwei Zählpunkten. Das geschieht gemäss Kanton auf der Basis von Bluetooth- und WiFi-Signalen. Da eine Person mehrere entsprechende Geräte auf sich tragen kann – oder auch gar keine –, werden die Daten zusätzlich mit einer Wärmebildkamera abgeglichen. «Die Sensoren, mit denen die Bluetooth- und WiFi-Signale ge-

Insgesamt **3** Wochen wird die Zählung dauern am Bahnhof Brugg.

messen werden, empfangen nur Signale, die von den Geräten im Normalbetrieb sowieso gesendet werden», betont das Departement Bau, Verkehr und Umwelt. «Es sind keine Rückschlüsse auf Personen oder persönliche Daten möglich.» Anders gesagt: Erfasst werden einzig die anonymisierten

Personenbewegungen pro Wegstrecke und der Zeitpunkt dieser Personenbewegung auf 15 Minuten genau. Das Vorgehen sei mit der Datenschutzbeauftragten des Kantons Aargau besprochen und gutgeheissen worden.

Für eine gute Abdeckung des Bahnhofs werden insgesamt elf Messpunkte mit Sensoren ausgerüstet. Platziert werden sie an den Eingängen zu den Unterführungen sowie in der Mitte der jeweiligen Unterführung. Die Zählung findet ab nächstem Freitag, 28. August, während dreier Wochen rund um die Uhr statt. (mhu)



Die Messung soll aufzeigen, wie viele Personen den Zug nehmen und wie viele die Unterführung zur Querung benutzen. Bild: jam/Archiv

**KANTON AARGAU**

# MOBILITÄT

## Messung der Fussgängeranzahl am Bahnhof Brugg ab 28.08.2020

Der Kanton Aargau erfasst in Zusammenarbeit mit den SBB ab 28. August 2020 für etwa drei Wochen die Fussverkehrsfrequenzen in den zwei Unterführungen am Bahnhof Brugg.

Die Informationen werden für die Stadt- und Bahnhofplanung benötigt. Sie sollen aufzeigen, wie viele Personen den Zug nehmen und wie viele Personen nur die Unterführung zur Querung benutzen.

Mehr Informationen zur Frequenzmessung:  
[www.ag.ch/frequenzmessung\\_bahnhofbrugg](http://www.ag.ch/frequenzmessung_bahnhofbrugg)



Departement  
Bau, Verkehr und Umwelt

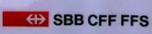


Abb. 3 Publikation Medienmitteilung am 21.8.2020 (links) und Informationstafel (rechts)

### 3 Erhobene Daten und Kalibration

#### 3.1 Ausgewertete Wegbeziehungen

Insgesamt wurden in der Zählperiode rund 32 Millionen BTWF-Signale empfangen. Diese wurden durch die Uni Lausanne in die folgenden Wegbeziehungen umgerechnet:

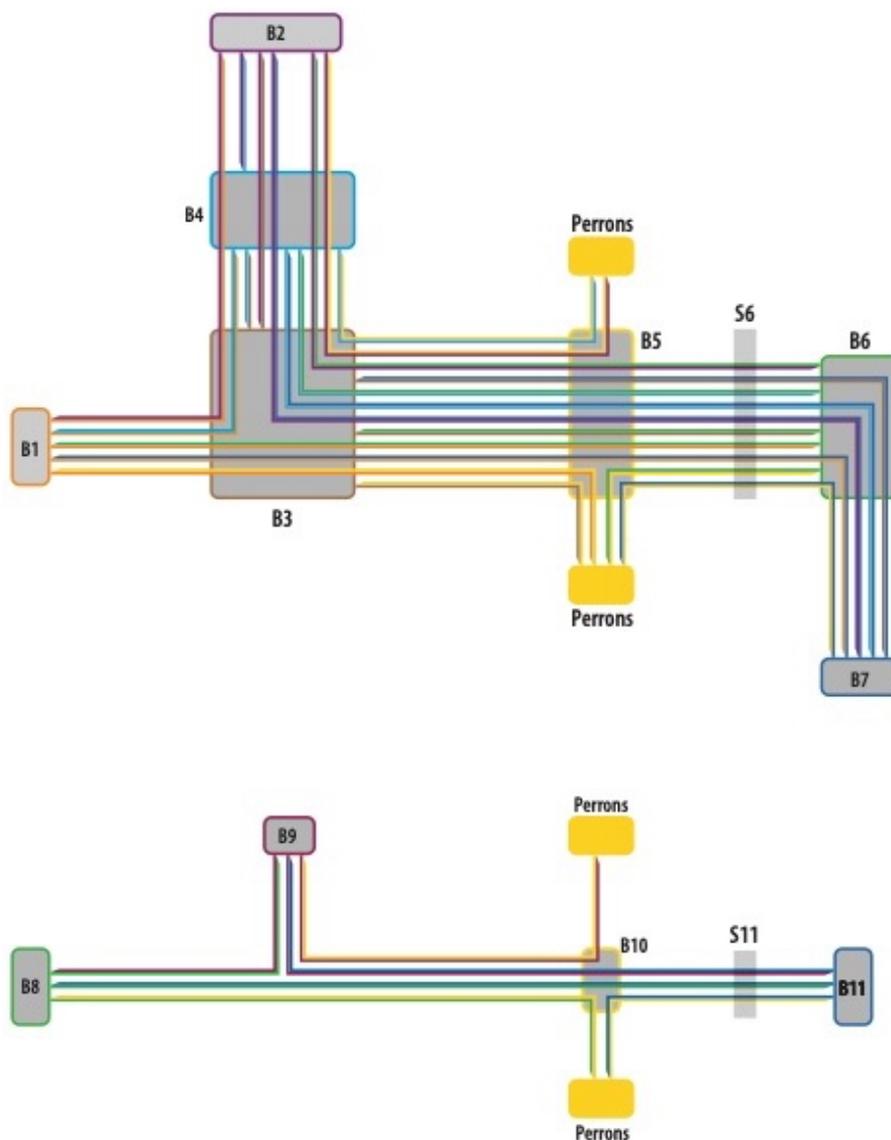


Abb. 4 Ausgewertete Wegbeziehungen zwischen den BTWF-Sensoren (B1 bis B11), Personenunterführung Nord (oben) und Süd (unten), Wärmebildkameras bei S6 und S11

Gesamthaft wurden somit die erfassten Signale auf 50 Wegbeziehungen umgelegt.

#### 3.2 Kalibrierung der Bluetooth- und WiFi-Signale

Wie bereits erwähnt, entspricht die Anzahl der empfangenen Signale i.d.R. nicht der Anzahl der zu Fuss Gehenden. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Passant\*innen an den Standorten S6 und S11 zusätzlich mit Wärmebildkameras erhoben.

Die Kalibrationswerte wurden durch die Uni Lausanne aufgrund des Verhältnisses von den auf die Wegbeziehungen umgelegten Werte der BTWF-Geräte zu den durch die thermischen Kameras gezählten Werten an derselben Stelle berechnet. Die viertelstündlichen Werte wurden dabei statistisch analysiert und anschliessend modelliert mittels einem

Random-Forest-Regressions-Modell. Andere Modelle wurden getestet aber waren weniger genau.

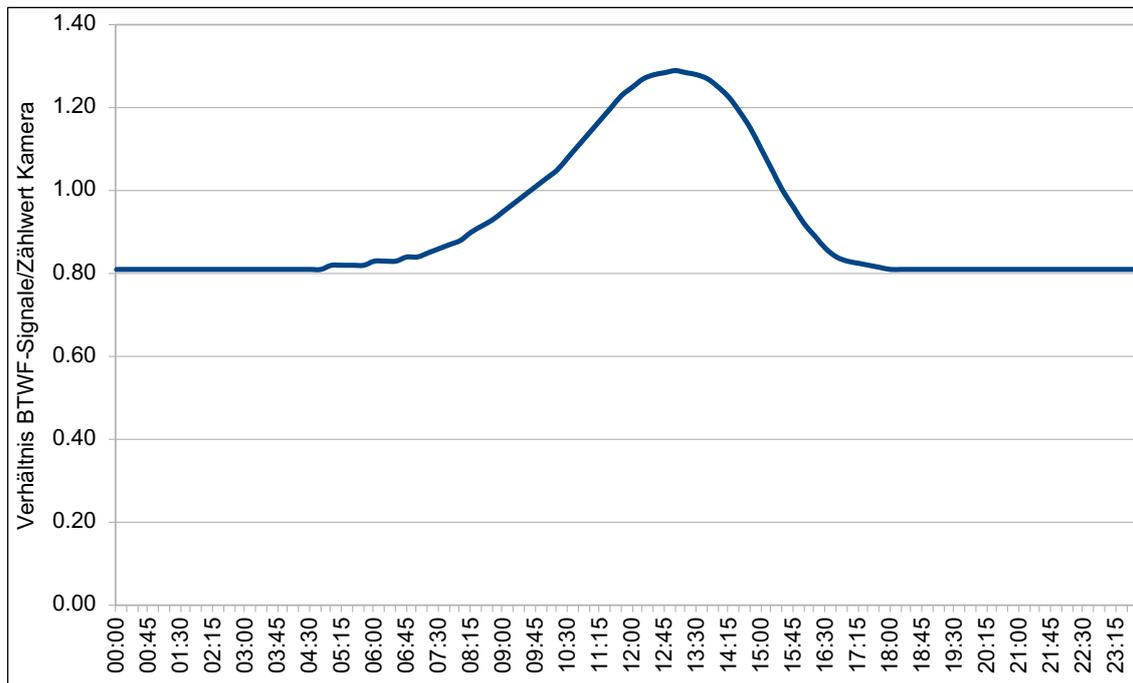


Abb. 5 Kalibrationswerte im Tagesverlauf für Werktage

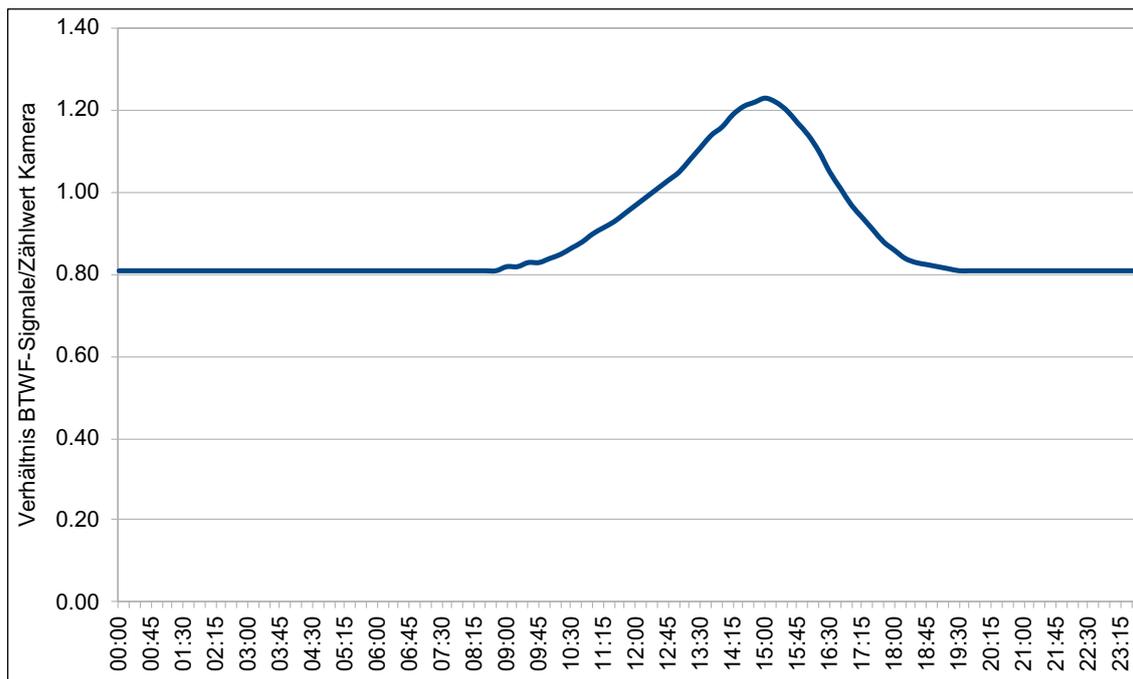


Abb. 6 Kalibrationswerte im Tagesverlauf am Wochenende

Die Anzahl empfangener BTWF-Signale pro Person sind nicht konstant über den Tag. An Werktagen ist dieser Wert über die Mittagszeit mit rund 1.2 am höchsten, während der höchste Wert am Wochenende am Nachmittag auftritt. Es ist deutlich erkennbar, dass tagsüber die Aktivitäten der Passanten mit den BTWF-Geräten höher ist. Die genaue Ursache für die deutliche Spitze über Mittag bzw. am Nachmittag ist allerdings nicht bekannt.

### 3.3 Auswertung der rohen Bluetooth- und WiFi-Signale

Die rohen Daten aus den BTWF-Geräten wurden durch die Uni Lausanne wie erwähnt auf die definierten Wegbeziehungen umgelegt und zu Viertelstundenwerten zusammengefasst. Jeder einzelne Viertelstundenwert wurde mit den Kalibrationswerten gemäss Abbildungen 5 und 6 korrigiert.

Die Viertelstundenwerte wurden durch uns zu Stundenwerten zusammengefasst. Eindeutig unplausible Werte, insbesondere Nullwerte, wurden für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt.

### 3.4 Vergleich mit manuellen Zählungen

An den beiden Standorten, an denen die Wärmebildkameras installiert waren, wurden durch uns während 3 Stunden Zählungen von Hand durchgeführt, und zwar am 1.9.2020 und am 17.9.2020 beim Standort B11 und am 8.9.2020 am Standort B6, jeweils von 7:30 bis 8:30 Uhr, von 9:30 bis 10:30 sowie von 11:30 bis 12:30 Uhr. Ein Vergleich mit der Wärmebildkamera konnte nur am 8.9.2020 am Standort B6 gemacht werden, da zu den anderen Zeiten die Kamera nicht funktionierte. Auch der Vergleich mit den BTWF-Daten war nur an diesem Datum möglich.

Am 15.9.2020 von 16-18 Uhr hat zudem das Büro ewp bei beiden Standorten ebenfalls Handzählungen durchgeführt. Der Vergleich mit der Wärmebildkamera konnte nur am Standort B11 gemacht werden, da das andere Gerät zu diesem Zeitpunkt nicht funktionierte. Der Vergleich mit den BTWF-Geräten war hingegen nur am Standort B6 möglich.

*Vergleich der Handzählungen mit den Daten der Wärmebildkameras*

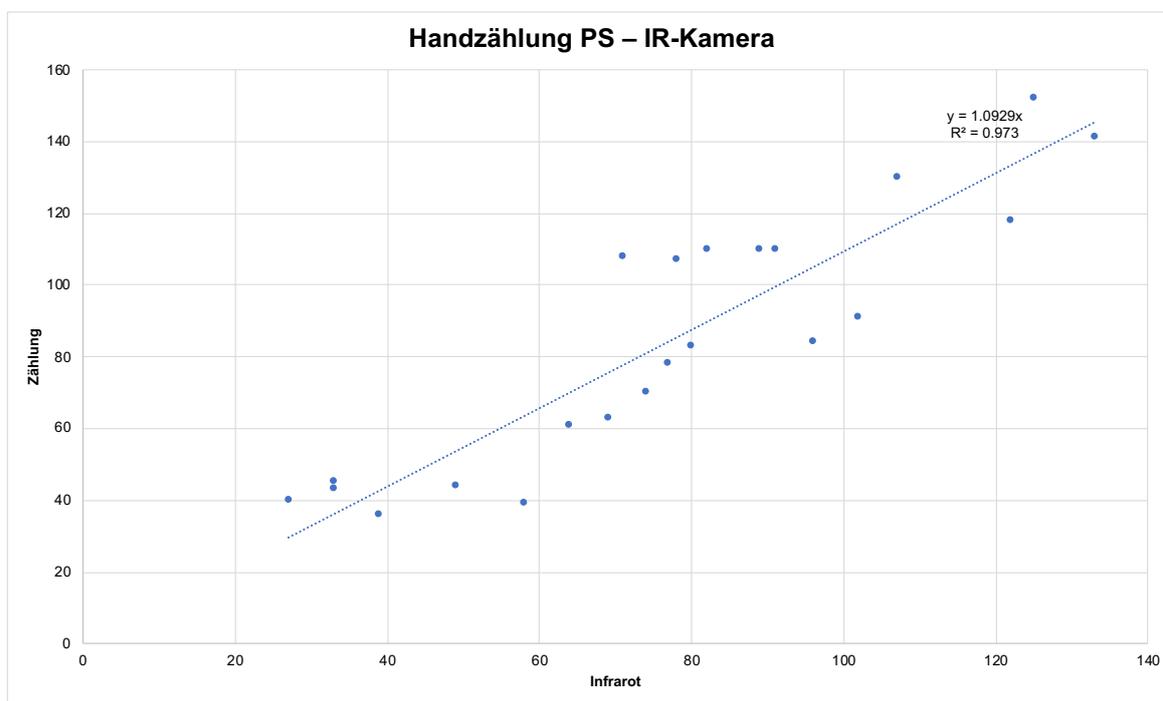


Abb. 7 Vergleich der Handzählung durch Pestalozzi & Stäheli (PS) mit der Wärmebildkamera (B6)

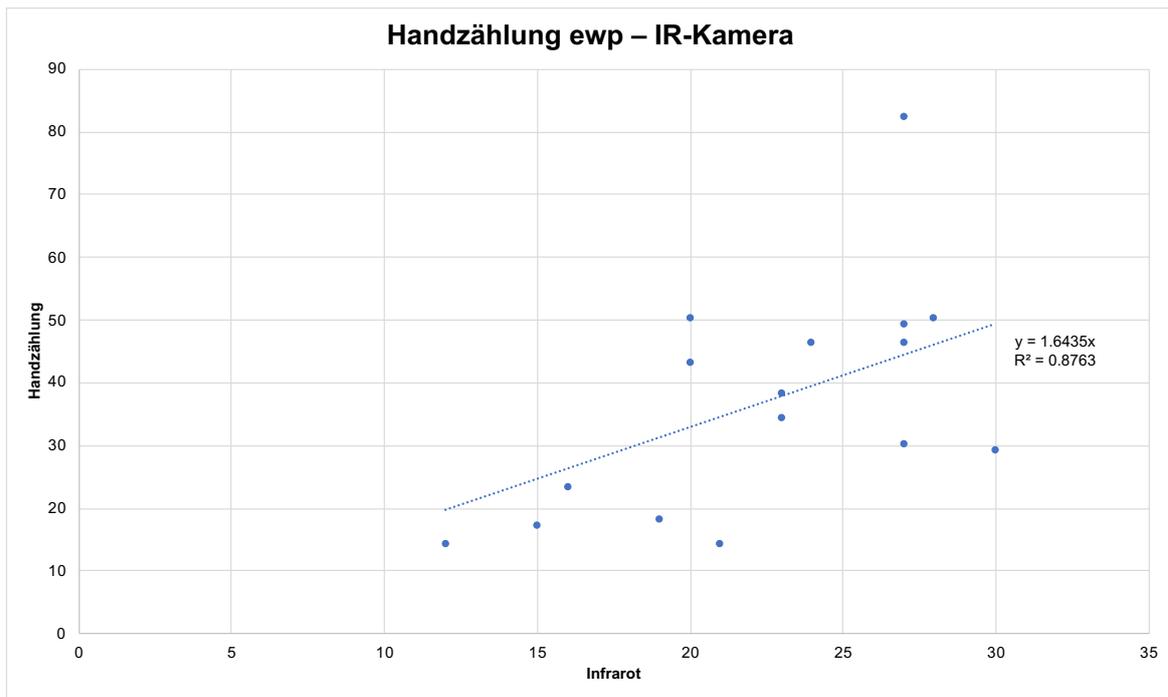


Abb. 8 Vergleich der Handzählung durch ewp mit der Wärmebildkamera (B11)

Während die Wärmebildkamera am Standort B6 im Vergleich zur Handzählung von PS eine sehr gute Genauigkeit aufweist (Abweichung ca. 9%), zeigt der Vergleich der Kamera B11 mit der Zählung von ewp ein schlechtes Ergebnis. Allerdings ist dieser 2. Vergleich wenig aussagekräftig, da nur Zählwerte in einem kleinen Zählbereich verglichen wurden.

Beim Projekt in Zürich ergaben sich ähnliche Abweichungen der Wärmebildkamera wie bei unserer Zählung am Standort B6. Die Werte der Wärmebildkamera wurden für die Kalibration der Daten der BTWF-Geräte nicht korrigiert.

Vergleich der Handzählungen mit den Daten der BTWF-Geräte

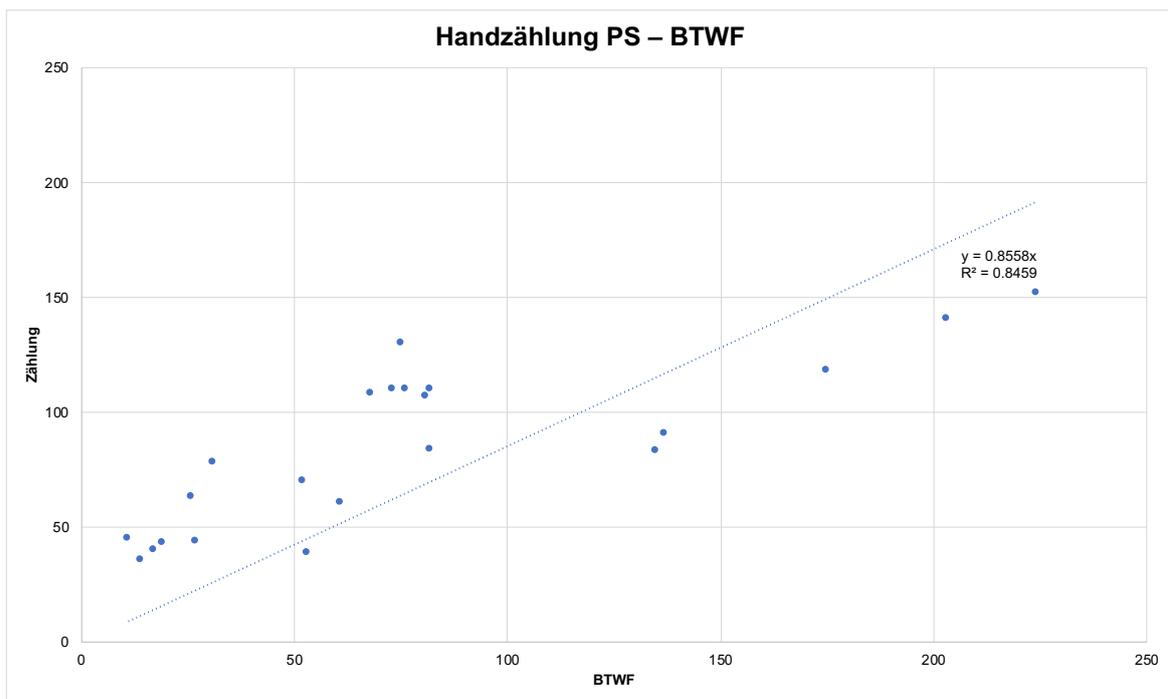


Abb. 9 Vergleich der Handzählung durch Pestalozzi & Stäheli (PS) mit den Daten der BTWF-Geräte (B6)

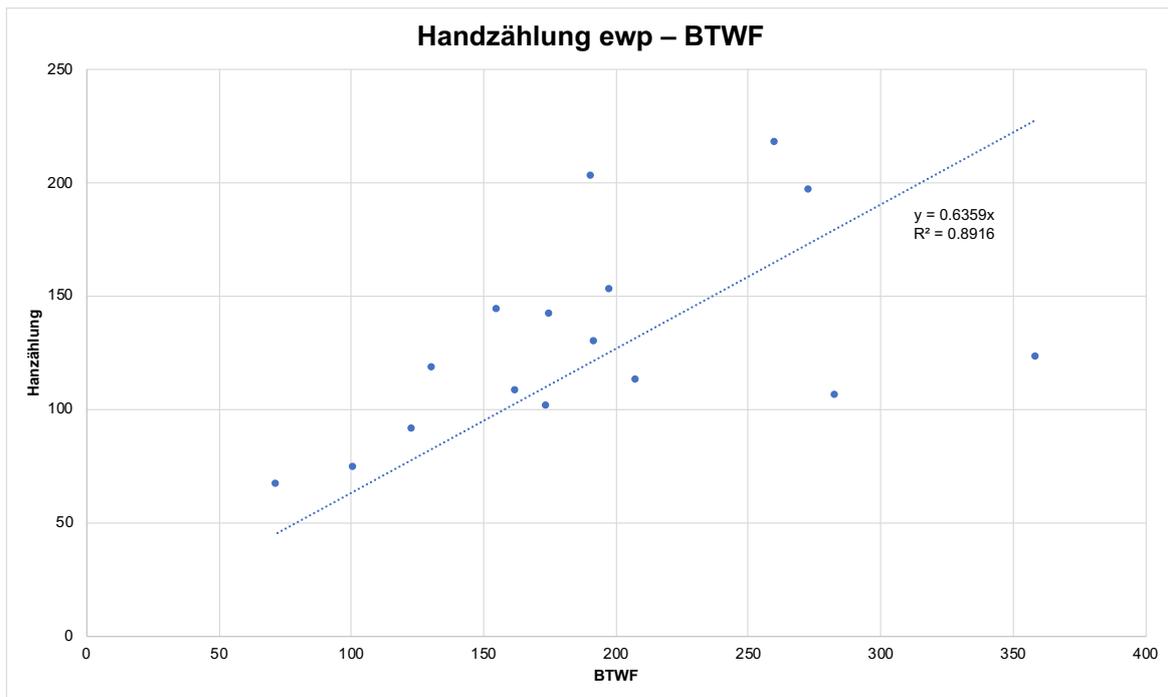


Abb. 10 Vergleich der Handzählung durch ewp mit den Daten der BTWF-Geräte (B6)

Gegenüber den Handzählungen sind die Werte der BTWF-Geräte um ca. 15% (Zählung PS) bzw. um ca. 35% (Zählung ewp) zu hoch. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Handzählwerte nicht direkt mit der Anzahl Signale, die das BTWF-Geräte B6 empfangen hat, verglichen wird. In den obigen Grafiken als BTWF-Wert dargestellt, ist die Summe aus den Wegbeziehungen, die am Standort B6 vorbeikommen. Ein möglicher Fehler kann also auch von einem anderen Gerät innerhalb einer Wegbeziehung stammen bzw. sich als Summe mehrerer Abweichungen ergeben. Allfällige Fehler bei den BTWF-Werten sind deshalb nicht systematisch und können somit auch nicht kalibriert werden.

Die Abweichung der erhobenen Daten kann somit, funktionierende Geräte vorausgesetzt, auf ca. 15-20% geschätzt werden.

## 4 Erste Ergebnisse

### 4.1 Personenunterführung Süd

Für die Unterführung Süd wurden 12 Wegbeziehungen für die Auswertung definiert. Die auswertbaren Daten sind aufgrund langer Ausfallzeiten der Geräte allerdings relativ gering. Insbesondere liegen weder für einen Samstag noch einen Sonntag vollständige Daten vor, weshalb nur Auswertungen für die Werktage möglich waren. Für alle Wegbeziehungen von der bzw. zur Aarauerstrasse konnten nur 3 Tage in der 1. Woche ausgewertet werden. Für die anderen Wegbeziehungen liegen von allen drei Wochen, jedoch nicht von allen Tagen, auswertbare Daten vor.

#### Zugang Aarauer- und Industriestrasse

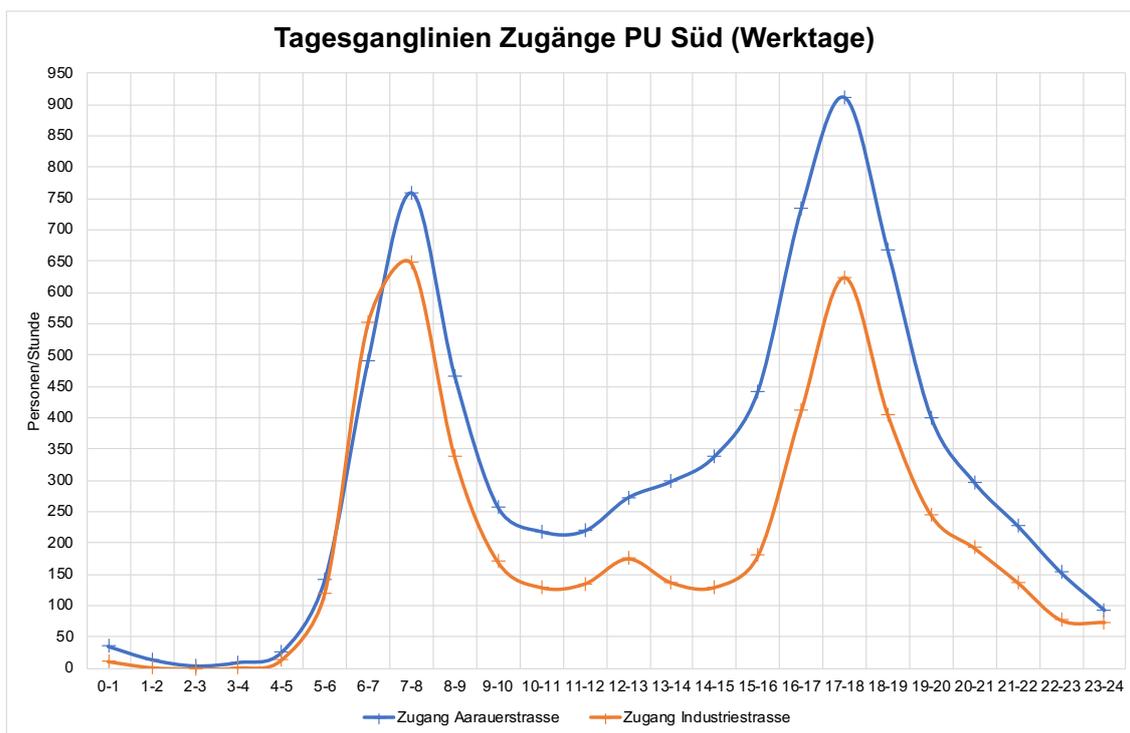


Abb. 11 Tagesganglinien an Werktagen an den beiden Zugängen zur Personenunterführung Süd

Beide Zugänge zur Unterführung weisen an Werktagen deutliche Morgen- und Abendspitzen auf, was für einen Zugang zu einem Bahnhof als typisch bezeichnet werden kann. Während beim Zugang Aarauerstrasse die Abendspitze rund 20% höher liegt, ist beim Zugang Industriestrasse die Morgenspitze leicht höher. Der Zugang von der Aarauerstrasse wird erwartungsgemäss stärker begangen als derjenige von der Industriestrasse.

### Zugänge zu den Perrons

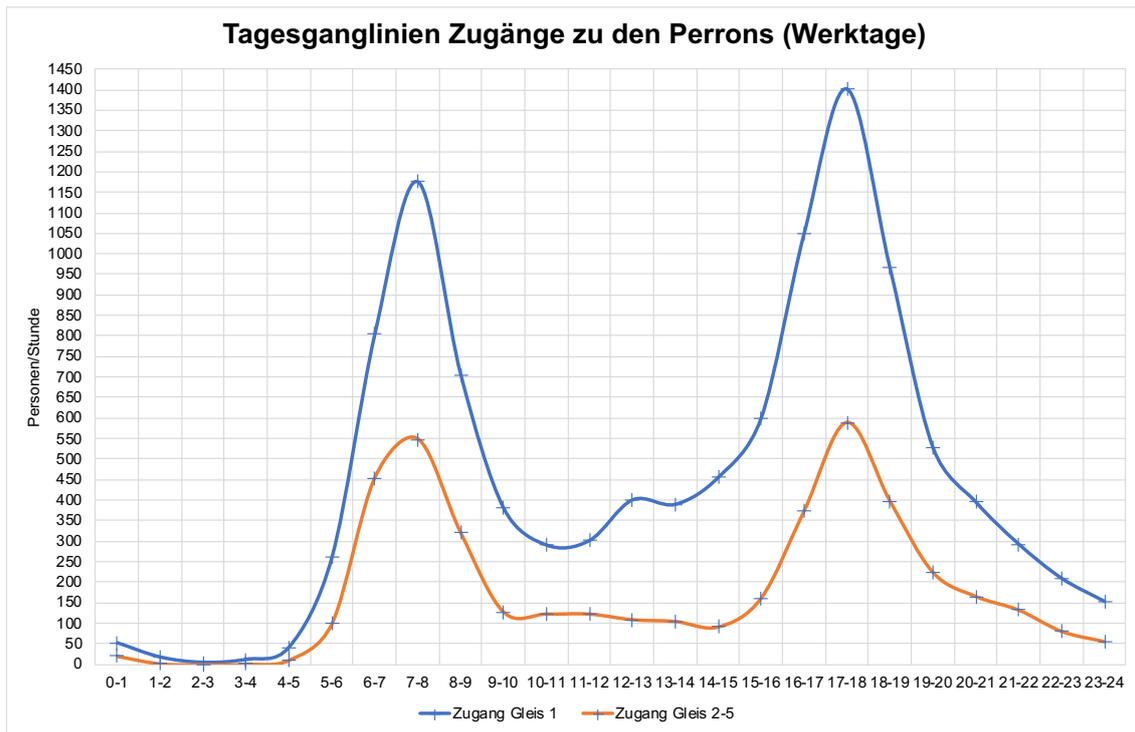


Abb. 12 Tagesganglinien an Werktagen der Perronzugänge von der Personenunterführung Süd

Die Zugänge zu Gleis 1 und zu den beiden Perrons für die Gleise 2-5 weisen ebenfalls deutliche Morgen- und Abendspitzen auf, wobei die Abendspitze höher liegt als die Morgenspitze. Der Zugang zu Gleis 1 weist zudem eine leichte Mittagsspitze auf, was mit dem Einkaufsangebot beim Gleis zu tun hat.

### Verkehrsflussdiagramm

Aus den einzelnen Wegbeziehungen wurden für die Morgen- und Abendspitze Verkehrsflussdiagramme erstellt.

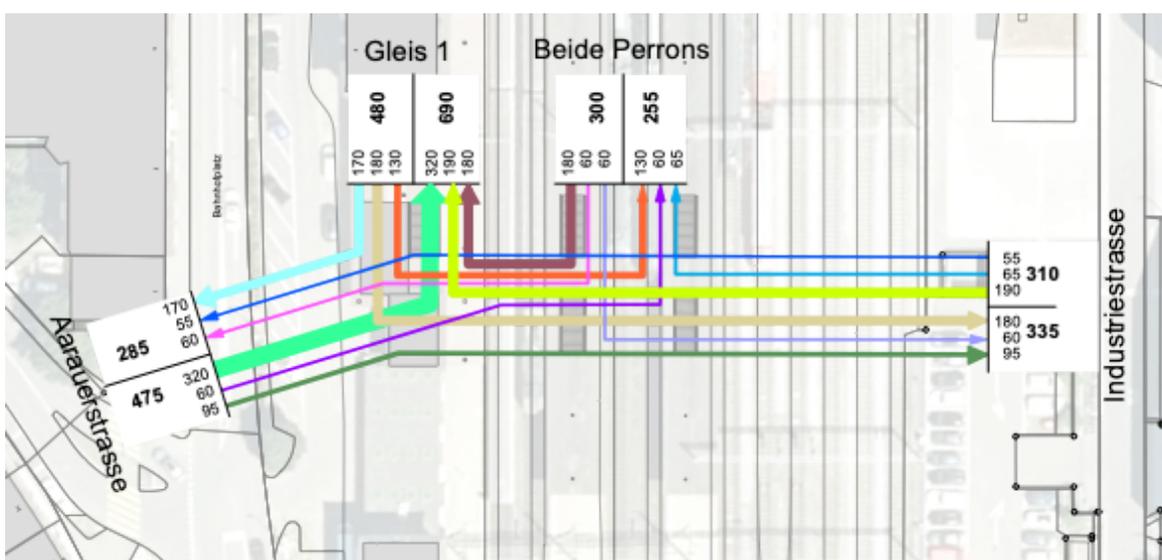


Abb. 13 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Süd, Morgenspitzenstunde werktags von 07-08 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

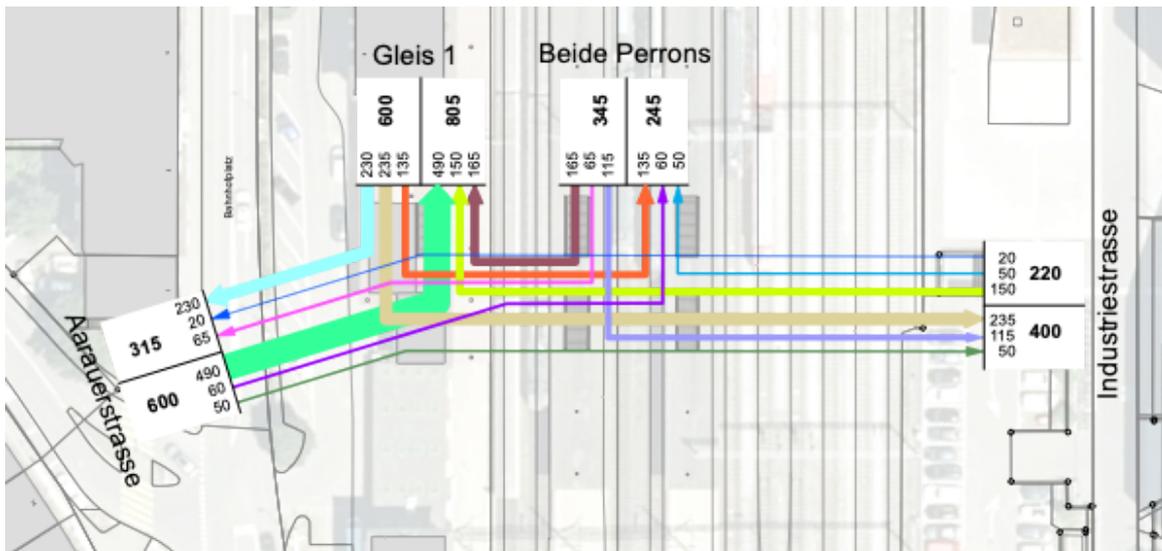


Abb. 14 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Süd, Abendspitzenstunde werktags von 17-18 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

**Beurteilung der ersten Ergebnisse für die Personenunterführung Süd**

- Die Beziehung von der Aarauerstrasse zu Gleis 1 wird eindeutig als zu hoch beurteilt. Es ist zu vermuten, dass die beiden BTWF-Geräte auch Signale von Motorfahrzeugen in Richtung Brugg oder in die Vorfahrt empfangen haben.
- Dass mehr Personen die Unterführung in Richtung Industriestrasse als in Richtung Aarauerstrasse begehen, scheint nicht plausibel. Eine schlüssige Erklärung liegt nicht vor.
- Ob die deutliche höhere Menge von/zu Gleis 1 als zu den beiden Perrons mit den Gleisen 2-5 korrekt ist, ist unklar. Die Passagierfrequenzen der SBB von Gleis 1 sind deutlich tiefer als von den Gleisen 2-5. Allerdings befinden sich beim Perron zu Gleis 1 ein Coop ToGo, ein Kiosk, Post- und Bankomat sowie der SBB-Schalter. Zudem ist dies der Zugang zu den Bussen, zu den Taxis und zur Bahnhofsvorfahrt.
- Da für die Erhebung der beiden Perronzugänge nur ein Gerät zwischen den beiden Zugängen installiert wurde, kann es sein, dass nicht jede Person erfasst wurde, die von oder zu den Perrons unterwegs war.

**Korrektur der Beziehung Aarauerstrasse – Gleis 1**

Detaillierte Verkehrsdaten für die Kantonsstrasse K112 liegen nur für das Jahr 1997 vor. Zusätzlich gibt es einen DTV-Wert aus dem Jahr 2007. In diesen 10 Jahren hat der DTV um ca. 15% zugenommen. Wir schätzen, dass der Verkehr bis 2020 seit 2007 nochmals um 15% zugenommen hat, somit seit 1997 um rund 30%. Aus den Angaben für das Jahr 1997 für die Fahrtrichtung Brugg schätzen wir die erfassten Motorfahrzeuge wie folgt:

	Erhebung 1997	Schätzung 2020 (+ 30%)	Annahme: 30% erfasste Fz
Morgenspitzenstunde	400 Fz/h	520 Fz/h	ca. 150
Abendspitzenstunde	560 Fz/h	730 Fz/h	ca. 220

Wir schätzen, dass für die Wegbeziehung Aarauerstrasse – Gleis 1 rund 30% der Fahrzeuge fälschlicherweise durch die BTWF-Geräte erfasst wurden, d.h. am Morgen rund 150 Fz und am Abend rund 220 Fz. In der anderen Richtung erachten wir eine Korrektur

als nicht angebracht, da ansonsten das Verhältnis zwischen Zu- und Weggang Aarau-erstrasse nicht mehr plausibel erscheint.

## 4.2 Personenunterführung Nord

Für die Unterführung Nord wurden 38 Wegbeziehungen für die Auswertung definiert. Auch die Geräte in der Unterführung Nord sind über einige Zeit ausgefallen, teilweise nur einige Stunden, andere Geräte aber auch über mehrere Tage. Die Auswertungen der einzelnen Wegbeziehungen beziehen sich deshalb auf eine unterschiedliche Datenbasis.

### Zugang Neumarkt und Industriestrasse

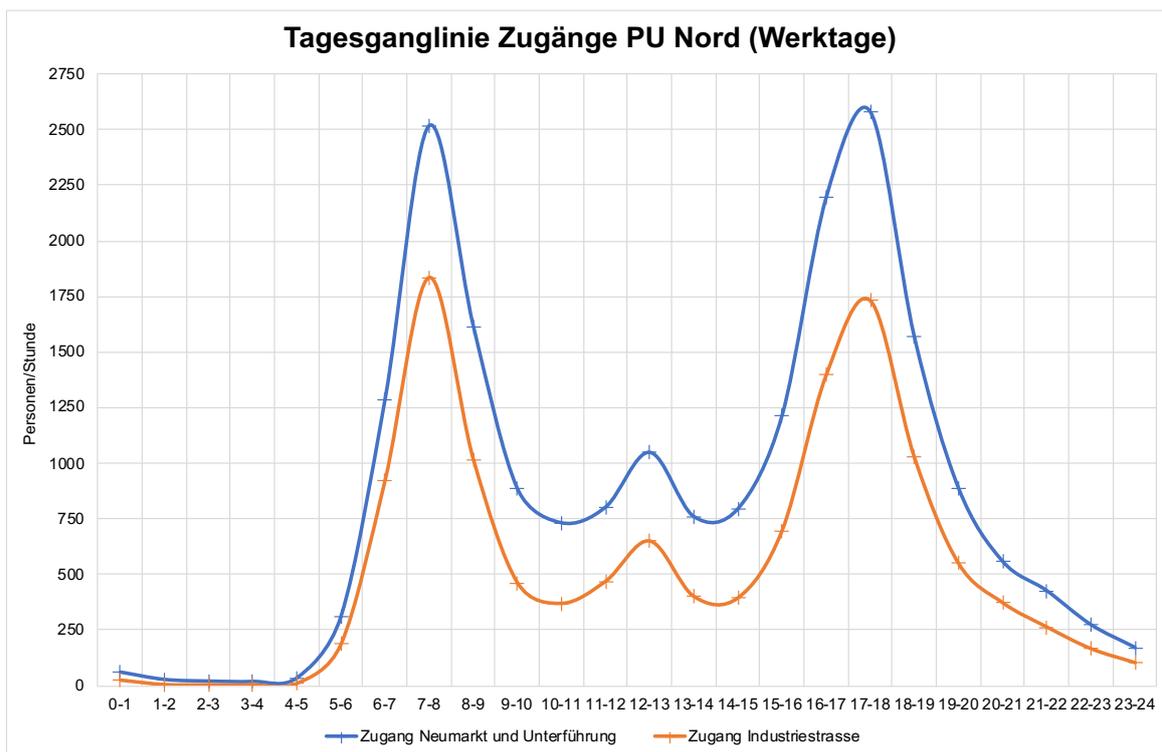


Abb. 15 Tagesganglinien an Werktagen an den beiden Zugängen zur Personenunterführung Nord

Beide Zugänge weisen für einen Bahnhof typische Morgen- und Abendspitzen auf. Beim Zugang vom Neumarkt ist die Abendspitze leicht höher, beim Zugang von der Industriestrasse hingegen die Morgenspitze. Bei beiden Zugängen ist auch eine klare Mittagsspitze feststellbar, dies im Gegensatz zu den Zugängen zur Unterführung Süd. Diese Mittagsspitze wird vermutlich durch Mitarbeitende der Fachhochschule und anderer Firmen auf der Windischerseite, die im Zentrum von Brugg zum Mittagessen gehen, verursacht.

### Zugänge zu den Perrons

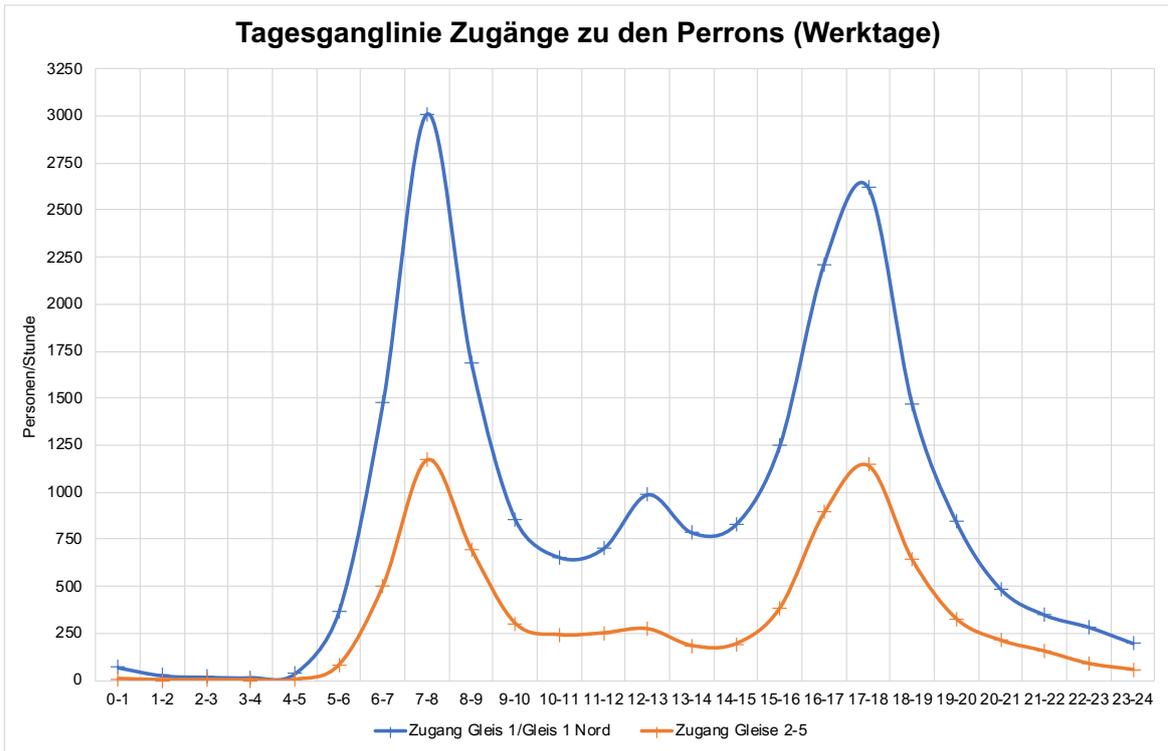


Abb. 16 Tagesganglinien an Werktagen der Perronzugänge von der Personenunterführung Nord

Die Zugänge zu den Perrons weisen erwartungsgemäss ebenfalls deutliche Morgen- und Abendspitzen auf. Der Zugang zu Gleis 1 ist um einen Faktor 2 bis 2.5 höher als zu den Gleisen 2-5. Wie bei der Unterführung Süd weist der Zugang zu Gleis 1 auch eine Mittagspitze auf, was mit den zusätzlichen Angeboten bei diesem Perron zu tun hat.

### Verkehrsflussdiagramm

Aus den einzelnen Wegbeziehungen wurden für die Morgen- und Abendspitze Verkehrsflussdiagramme erstellt.



Abb. 17 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Nord, Morgenspitzenstunde werktags von 07-08 Uhr, Angaben in Personen/Stunde



Abb. 18 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Nord, Abendspitzenstunde werktags von 17-18 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

### Beurteilung der ersten Ergebnisse für die Personenunterführung Nord

- Die Daten für die Wegbeziehung von Gleis 1 zu Gleis 1 Nord konnten nicht verwendet werden. Die Auswertung ergab unplausibel hohe Werte. Zu vermuten ist, dass Signale von Personen in den ab- und anfahrenen Zügen ebenfalls mitgezählt wurden.
- Wie bei der Unterführung Süd ist das Verhältnis der Frequenz zu den Perrons mit den Gleisen 2-5 zur Frequenz zu Gleis 1 und Gleis 1 Nord schwierig zu erklären (s. dazu nachfolgenden Vergleich mit den Daten der SBB). Einen Einfluss hat sicher das zusätzliche Angebot beim Gleis 1 mit einem Coop ToGo, einem Kiosk, Post- und Bankomaten sowie dem SBB-Schalter. Zudem ist dies der Zugang zu den Bussen, zu den Taxis und zur Bahnhofsvorfahrt.
- Nicht plausibel erscheint, dass am Abend mehr Personen zu den Gleisen 2-5 gehen, als von dort kommen.

### 4.3 Vergleich mit den Daten des öffentlichen Verkehrs

Von der SBB haben wir von 2018 die Daten der Ein- und Aussteiger für jeden Zug an einem durchschnittlichen Werktag erhalten.

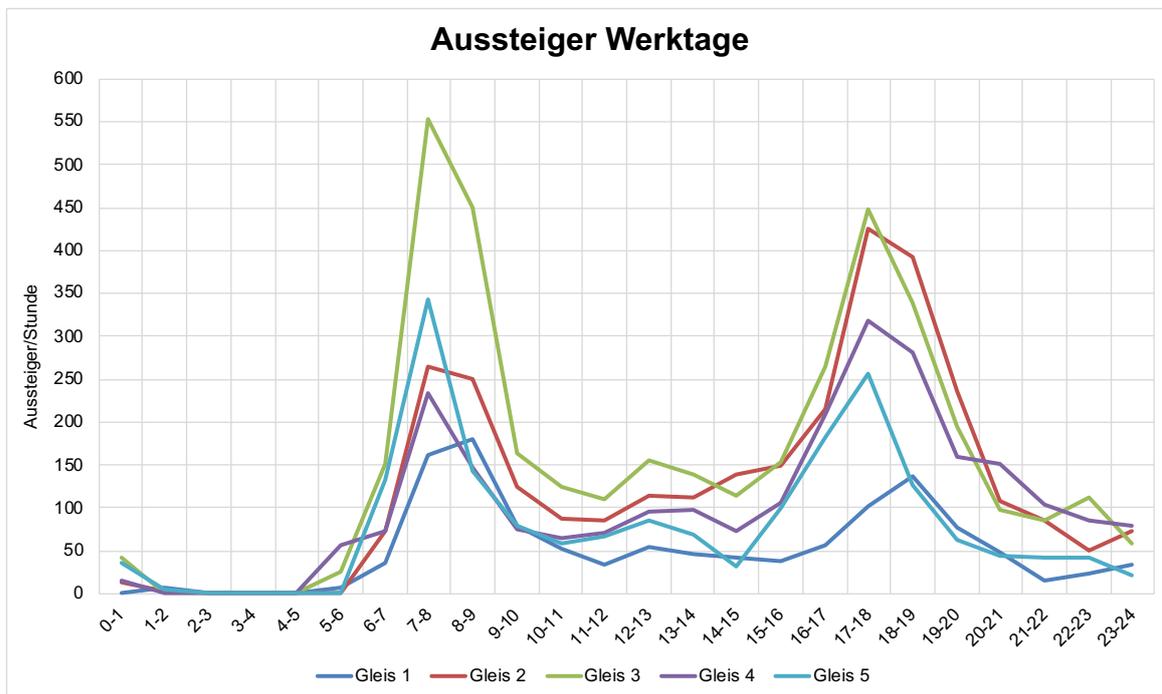


Abb. 19 Tagesganglinien der aussteigenden Personen am Bahnhof Brugg (Quelle: SBB)

Wie zu erwarten zeigen die Tagesganglinien eindeutige Morgen- und Abendspitzen. Beim Gleis 3 steigen eindeutig am meisten Personen aus, gefolgt von Gleis 2. Am wenigsten Personen steigen beim Gleis 1 aus.

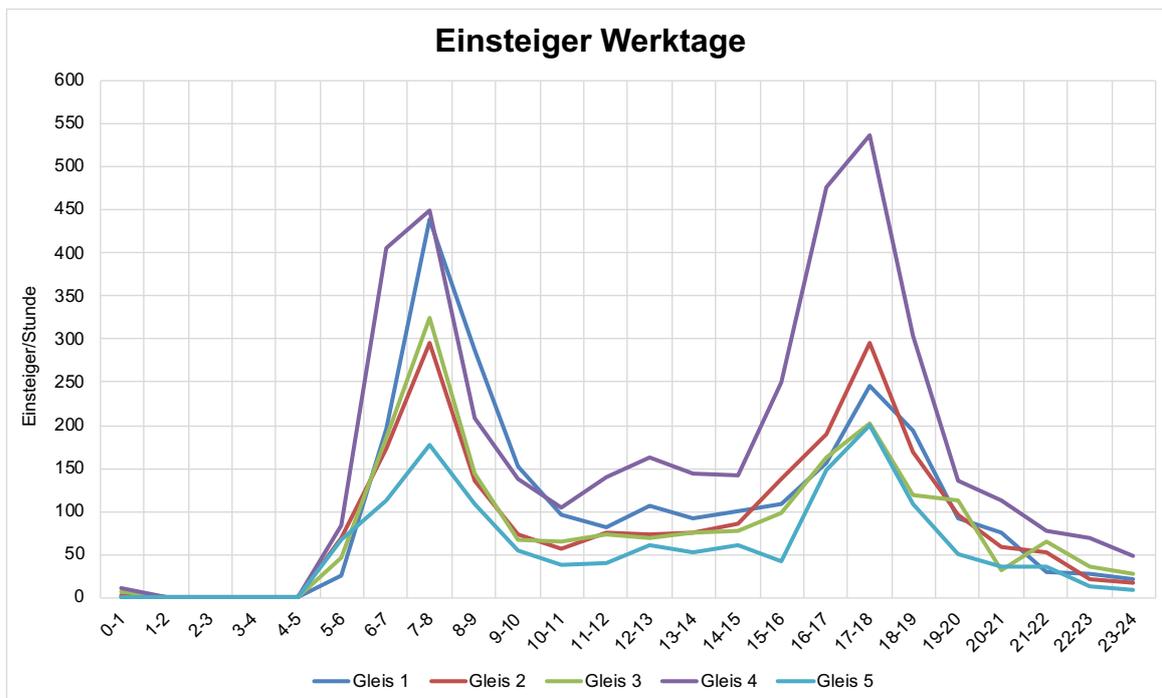


Abb. 20 Tagesganglinien der einsteigenden Personen am Bahnhof Brugg (Quelle: SBB)

Auch bei den Einsteigern zeigen sich die beiden Spitzenstunden am Morgen und am Abend. Die höchsten Frequenzen zeigen sich bei Gleis 4 und die zweithöchsten bei Gleis 1, dies insbesondere am Morgen.

Gemäss Angaben der SBB hat die Passagierfrequenz von 2018 bis 2019 um ca. 5% zugenommen, hingegen Covid bedingt von September 2019 bis September 2020 (Zeitpunkt der Erhebung) um ca. 30% abgenommen. Für die Daten im September 2020 gehen wir somit von einer Reduktion um 25% gegenüber den oben dargestellten Werten aus.

Die Daten der SBB für die Ein- und Aussteiger auf den beiden Perrons für die Gleise 2-5 können direkt mit den Daten unserer Erhebung verglichen werden. Die Tageswerte der SBB für die Aussteiger liegen rund 50% und für die Einsteiger rund 10% über den erhobenen Werten.

Die erhobenen Daten für die Zugänge von den Personenunterführungen Süd und Nord zu den Gleisen 2-5 wurden an die Daten der SBB angepasst. Dabei wurde die grössere Korrektur für den Zugang von der Unterführung Nord vorgenommen. Für jede Stunde wurden die Korrekturwerte entsprechend dem Vergleich mit den SBB-Daten berücksichtigt und die Stundenwerte entsprechend korrigiert.

Von Postauto liegen nur pauschale Daten von 2017 vor:

- Ein-/Aussteiger (inkl. Umsteiger) an der Haltestelle Brugg Bahnhof/Zentrum an Werktagen: ca. 6'000 Personen
- Ein-/Aussteiger (inkl. Umsteiger) an der Haltestelle Brugg Bahnhof/Campus an Werktagen: ca. 5'100 Personen

Diese Daten können jedoch für eine Überprüfung der erhobenen Werte nicht beigezogen werden.

## 5 Korrigierte Ergebnisse

Die Daten gemäss Kapitel 4 wurden nun wie folgt korrigiert:

- Korrektur der fälschlicherweise erfassten Motorfahrzeuge in der Wegbeziehung Aarauerstrasse – Gleis 1 gemäss Kapitel 4.1.
- Korrektur gemäss den Daten der SBB für die Ein- und Aussteiger auf den beiden Perrons Gleise 2-5 gemäss Kapitel 4.3.

### 5.1 Personenunterführung Süd

#### Tagesganglinien

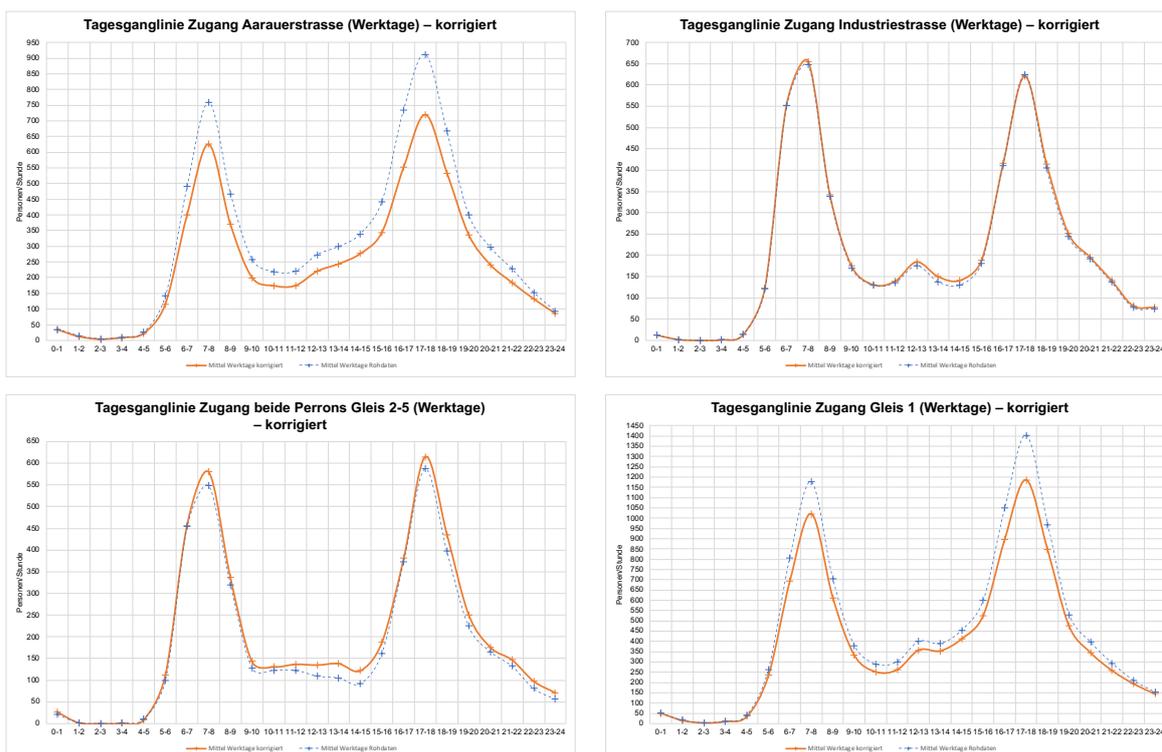


Abb. 21 Korrigierte Tagesganglinien der Unterführung Süd

Durch die Korrekturen haben sich insbesondere die Tagesganglinien für den Zugang Aarauerstrasse und den Zugang zu Gleis 1 verändert, und zwar mit durchwegs reduzierten Stundenfrequenzen. Eine leichte Erhöhung der Frequenzen ergab sich für den Zugang zu den Gleisen 2-5 durch die Anpassung an die Daten der SBB.

### Verkehrsflüsse im Tagesgang

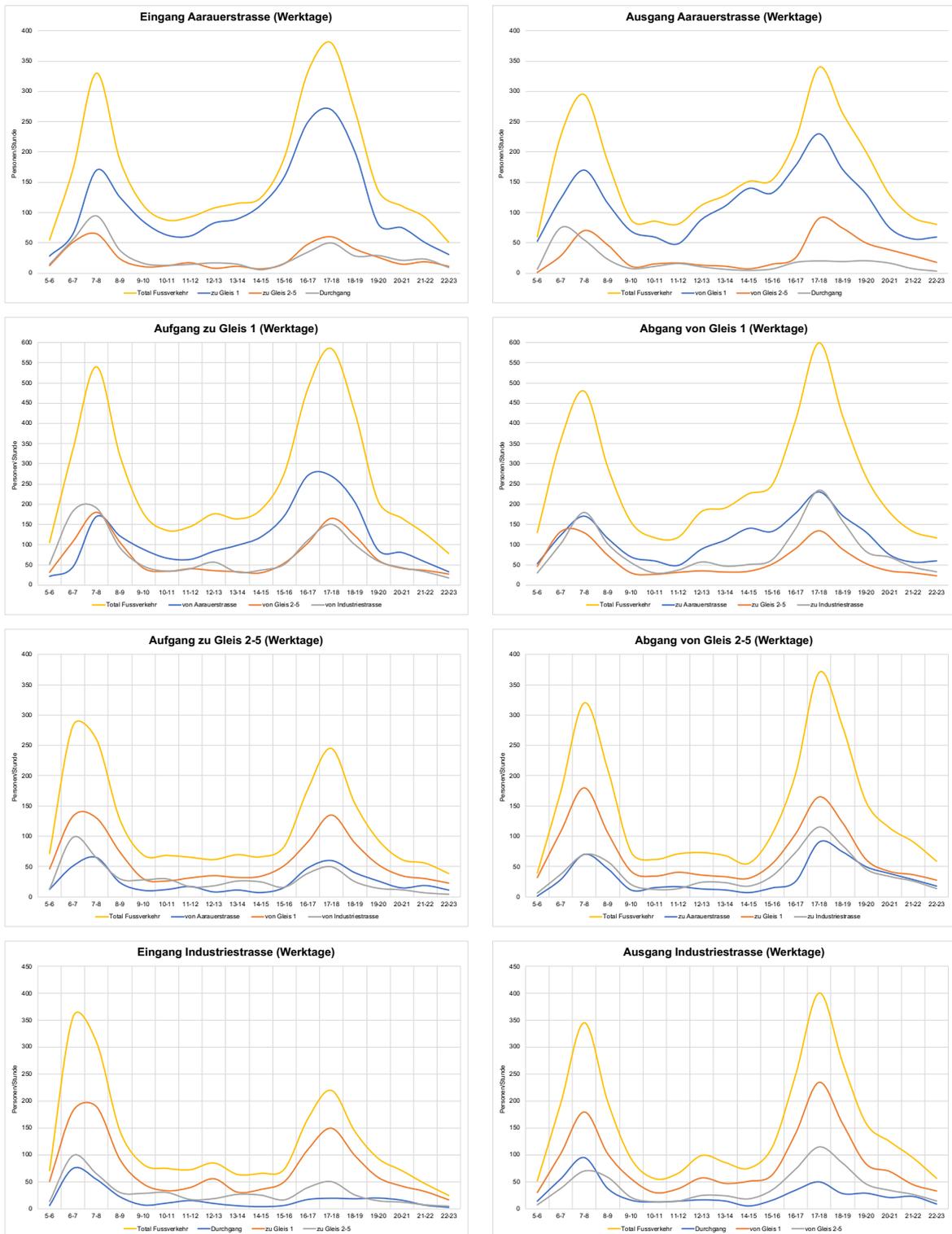


Abb. 22 Ziel- und Quellorte bei den verschiedenen Zu- und Weggängen der Personenunterführung Süd

Die Verteilung auf die Ziel- und Quellorte beträgt für die beiden Zugänge Aarauer- und Industriestrasse im Tagesdurchschnitt:

	von/zu Aarauerstrasse	von/zu Industriestrasse
von/zu Gleis 1	70%	55-60%
von/zu Gleise 2-5	15-20%	25%
Durchgang	10-15%	15-20%

Der Ziel- und Quellort Gleis 1 weist bei den Tagesganglinien der Aarauer- und Industriestrasse sowie von Gleis 2-5 durchwegs den höchsten Anteil auf, was in dieser Deutlichkeit nicht plausibel erscheint. Die anderen Ziel- und Quellorte haben bei diesen Ganglinien jeweils in etwa einen ähnlichen Anteil. Für die Ganglinie zu Gleis 1 ist der Anteil von/zur Aarauerstrasse am höchsten.

Die Verteilung für den Tagesverkehr kann wie folgt zusammengefasst werden (gerundet):

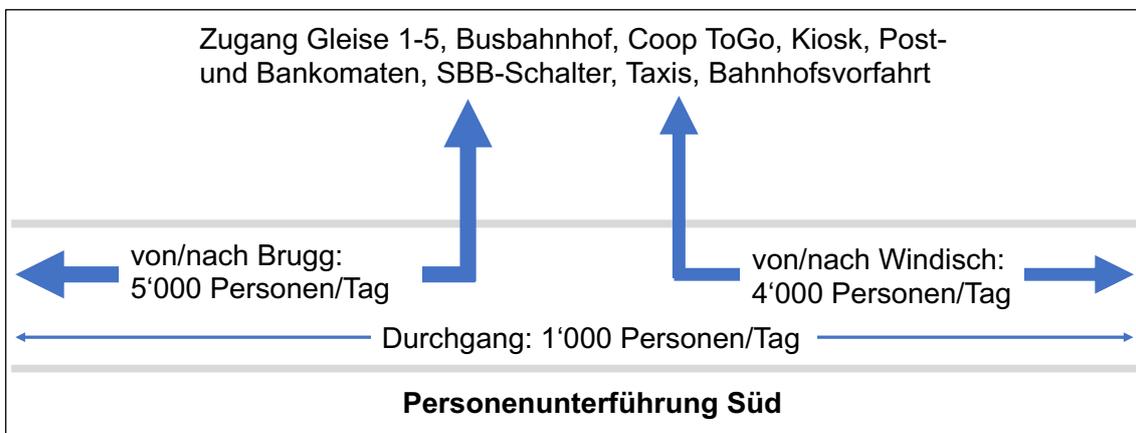


Abb. 23 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Süd für den Tagesverkehr

**Verkehrsflussdiagramme für die Spitzenstunden (korrigiert)**

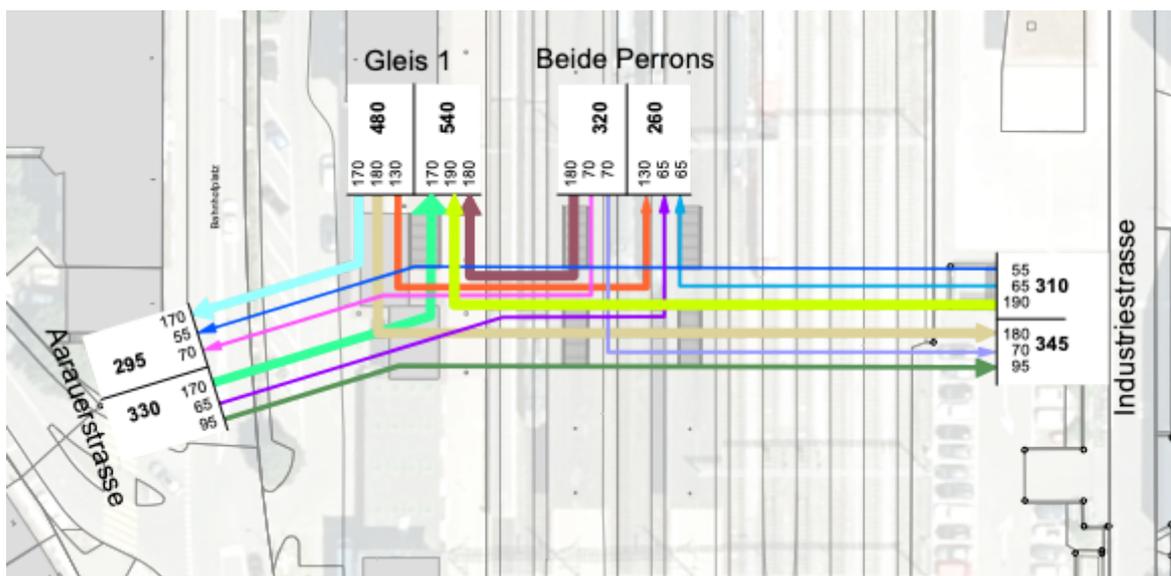


Abb. 24 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Süd, korrigiert, Morgenspitzenstunde werktags von 07-08 Uhr, Angaben in Personen/Minute

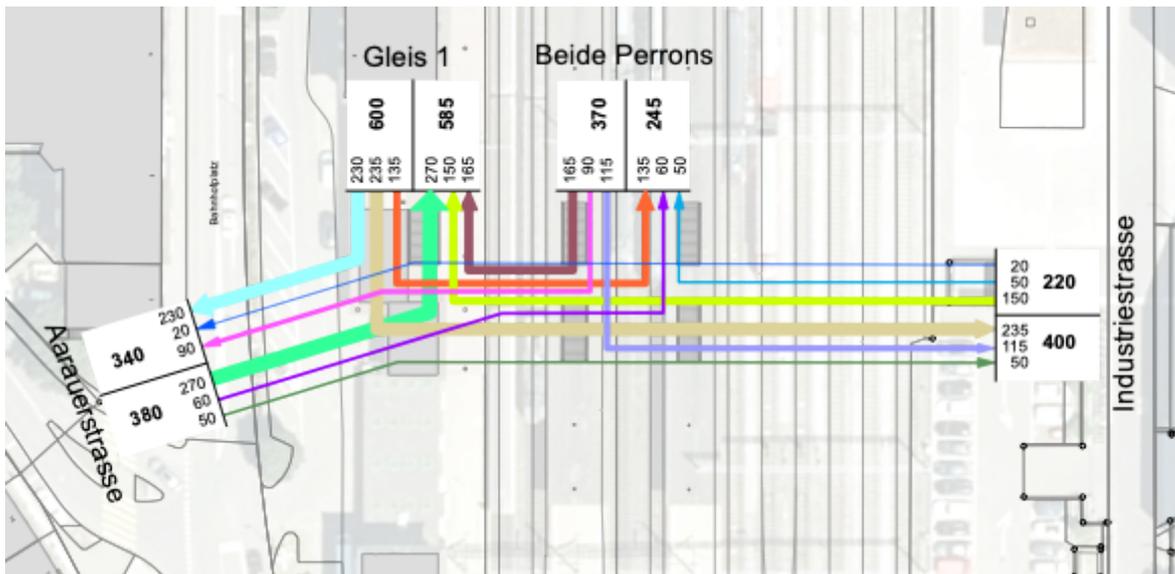


Abb. 25 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Süd, korrigiert, Abendspitzenstunde werktags von 17-18 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

### Beurteilung der definitiven Ergebnisse für die Personenunterführung Süd

- Den Verlauf der Tagesganglinien gemäss Abb. 21 erachten wir für die Passantenströme an einem Bahnhof als plausibel.
- Die Verteilung der Personen an einem Quell-/Zielort auf die anderen Quell-/Zielorte (s. Abb. 22 bis Abb. 25) sind – abgesehen von nachfolgender Bemerkung – ebenfalls plausibel.
- Die Verkehrsflüsse zum bzw. von Gleis 1 erachten wir, insbesondere im Vergleich zu denjenigen zu/von Gleis 2-5, immer noch als zu hoch. Dies kann folgende Ursachen haben:
  - Es wurden mehr Signale von Motorfahrzeugen erfasst, als wir für die Korrektur geschätzt haben.
  - Die Personen von und zu den beiden Perrons wurden nicht vollständig erfasst, da nur ein Gerät zwischen den beiden Zugängen installiert wurde. Dies haben wir zwar mit den Daten der SBB so weit möglich korrigiert, was jedoch auch mit Unsicherheiten behaftet ist.
  - Unbekannte Fehlerhebungen von einem oder mehreren Geräten.

### Hinweise zum Wochenendverkehr

Wie bereits erwähnt liegen für die Unterführung Süd keine vollständigen Daten für das Wochenende vor. Aus den Daten einzelner Wegbeziehungen können für den Tagesverkehr folgende pauschalen Angaben gemacht werden:

- Der Tagesverkehr an Samstagen beträgt 40 – 60% des Werktagesverkehrs.
- Der Tagesverkehr an Sonntagen beträgt 30 – 45% des Werktagesverkehrs.

Gemäss den Daten der SBB beträgt die Tagessumme der Ein- und Aussteiger am Wochenende ca. 50% der Summe an Werktagen, was somit in etwa mit den erhobenen Daten übereinstimmt.

## 5.2 Personenunterführung Nord

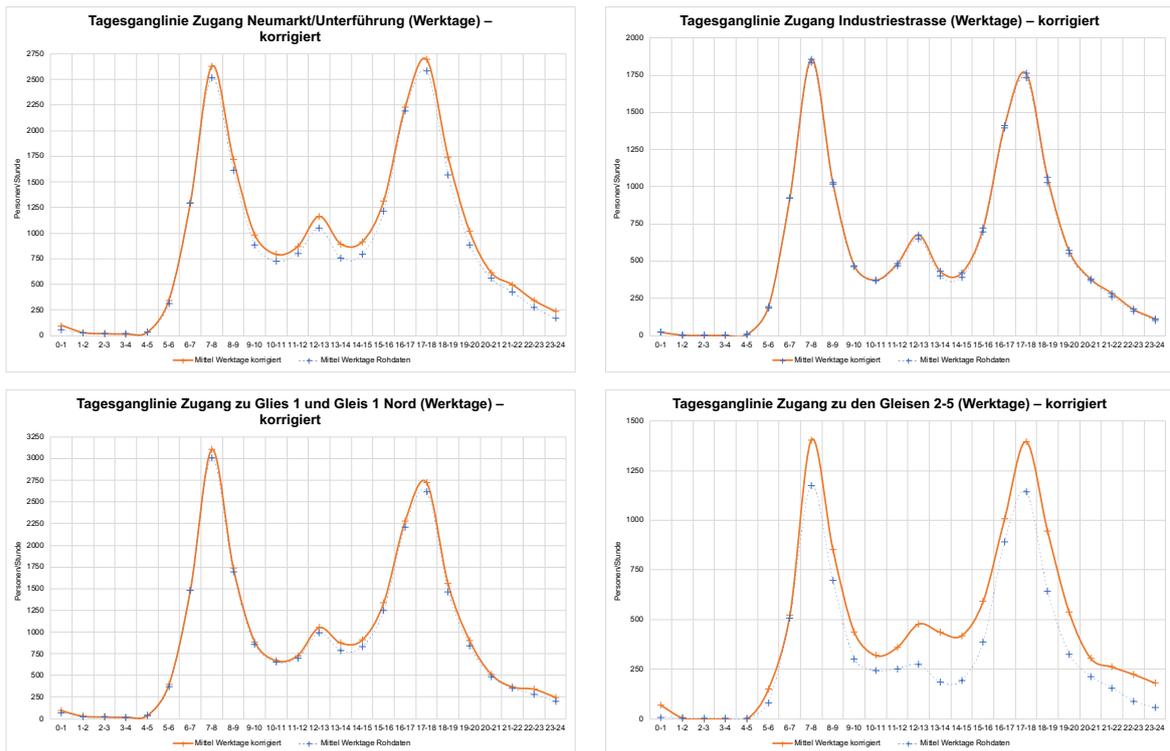


Abb. 26 Korrigierte Tagesganglinien der Unterführung Nord (Werktage)

Durch die Anpassung an die Daten der SBB haben sich die Tagesganglinien für den Zugang Neumarkt/Unterführung und insbesondere für den Zugang zu den Gleisen 2-5 verändert, und zwar mit durchwegs höheren Stundenfrequenzen. Nur eine leichte Erhöhung der Frequenzen ergab sich für den Zugang zu Gleis 1 und den Zugang Industriestrasse.

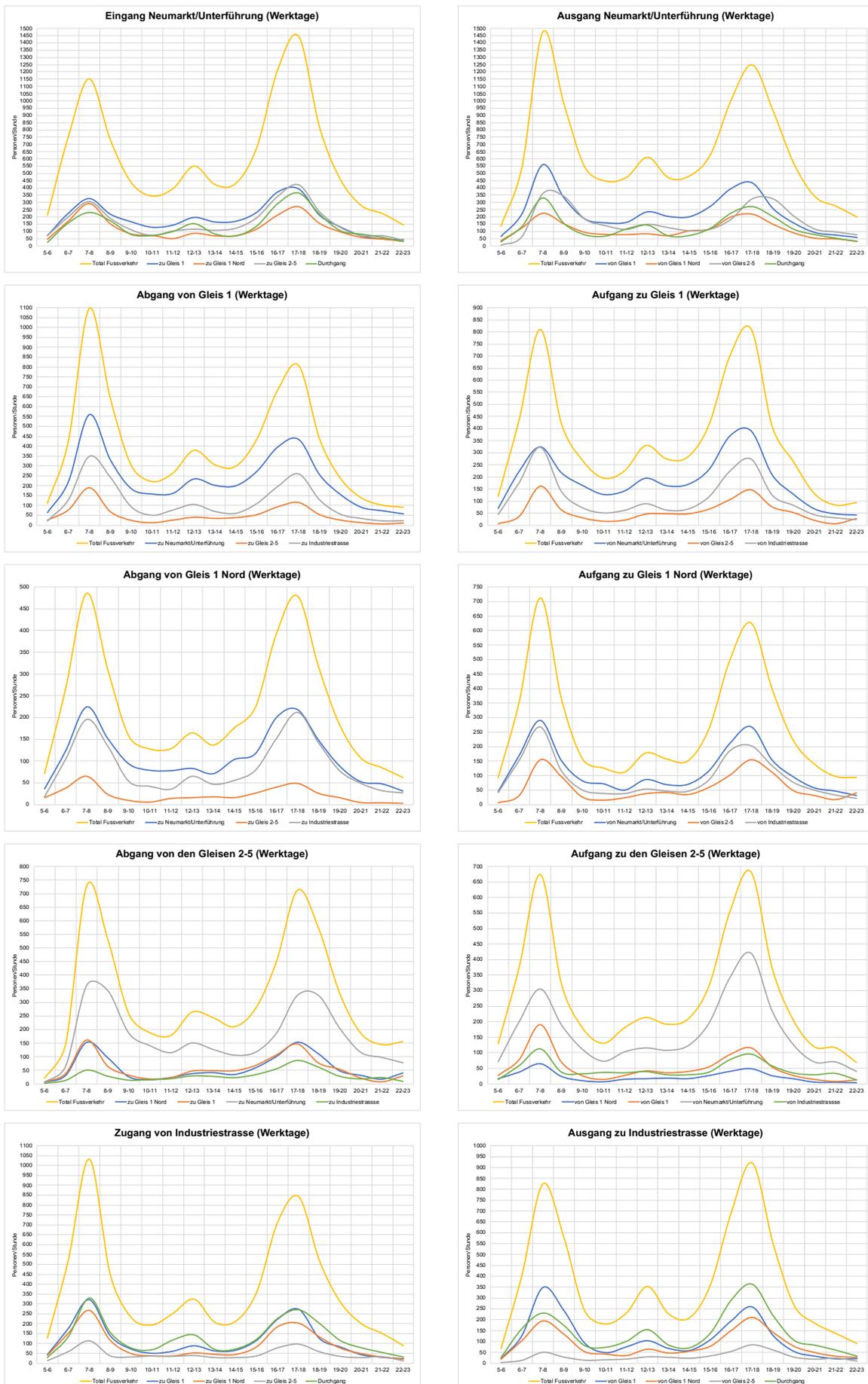


Abb. 27 Ziel-/Quellorte bei den verschiedenen Zu-/Weggängen der Personenunterführung Nord

Die Verteilung auf die Ziel- und Quellorte beträgt für die beiden Zugänge Neumarkt/Unterführung und Industriestrasse im Tagesdurchschnitt an Werktagen:

	von/zu Neumarkt/ Unterführung	von/zu Industriestrasse
von/zu Gleis 1 und Gleis 1 Nord	50-55%	55%
von/zu Gleise 2-5	25%	10%
Durchgang	20-25%	35%

Die Verteilungen auf die einzelnen Ziel- und Quellorte scheinen grundsätzlich plausibel. Einzig die Frequenzen zu/von Gleis 1 und Gleis 1 Nord erachten wir als tendenziell zu hoch. Als Durchgang von Windisch nach Brugg oder umgekehrt wird die Unterführung Nord häufiger begangen als die Unterführung Süd.

Die Verteilung für den Tagesverkehr kann wie folgt zusammengefasst werden (gerundet):

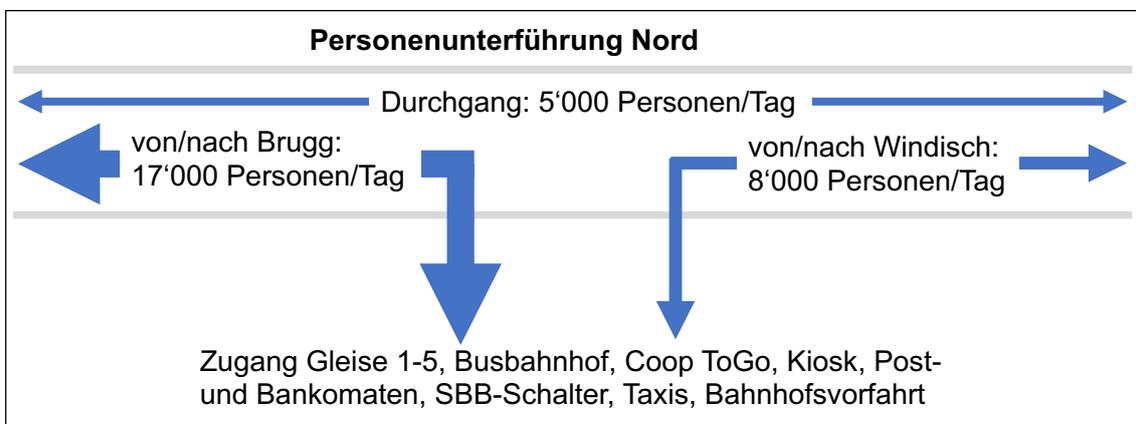


Abb. 28 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Nord für den Tagesverkehr

**Verkehrsflussdiagramme für die Spitzenstunden (korrigiert)**

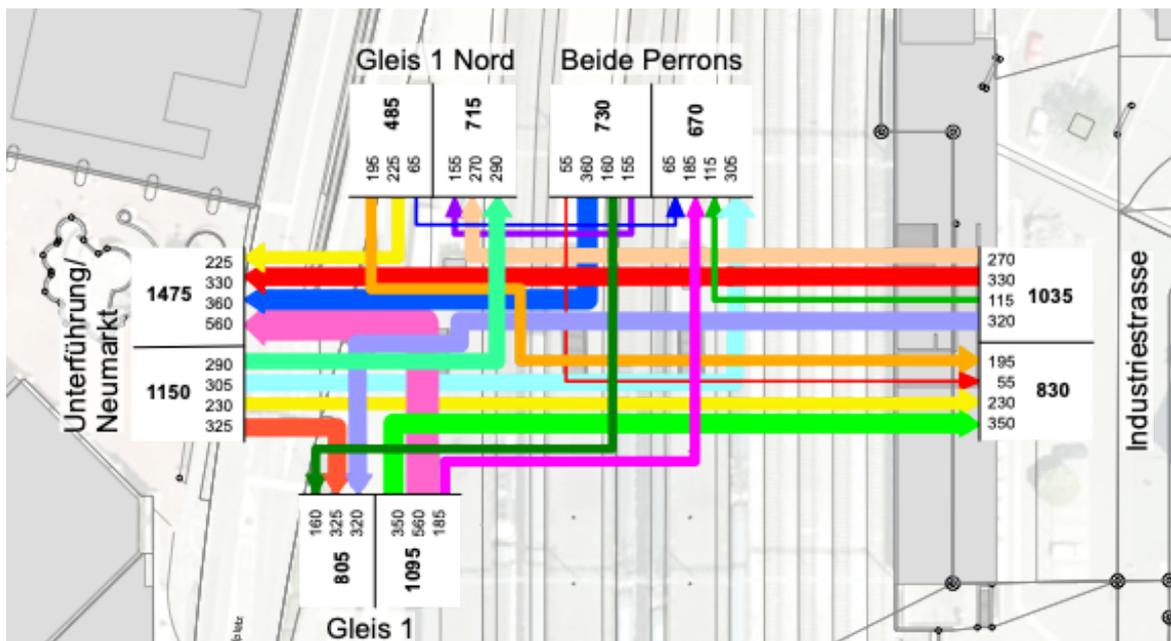


Abb. 29 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Nord, korrigiert, Morgenspitzenstunde werktags von 07-08 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

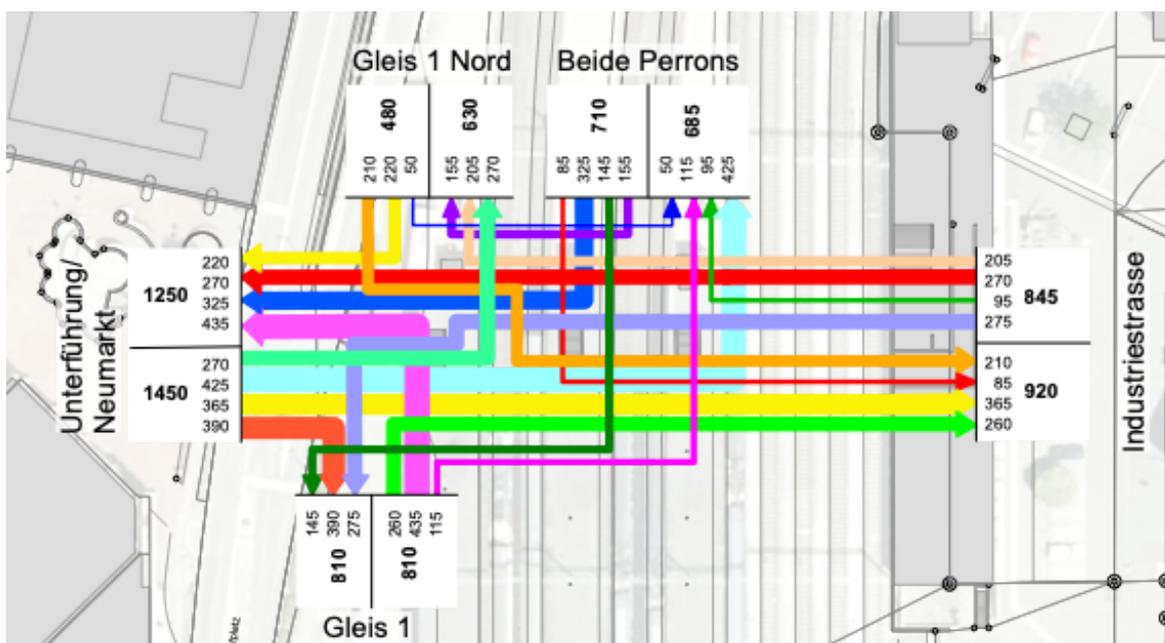


Abb. 30 Verkehrsflussdiagramm Personenunterführung Nord, korrigiert, Abendspitzenstunde werktags von 17-18 Uhr, Angaben in Personen/Stunde

### Beurteilung der definitiven Ergebnisse für die Personenunterführung Nord

- Den Verlauf der Tagesganglinien gemäss Abb. 26 erachten wir für die Passantenströme an einem Bahnhof als plausibel.
- Die Verteilung der Personen an einem Quell-/Zielort auf die anderen Quell-/Zielorte (Abb. 27 bis Abb. 30) sind – abgesehen von nachfolgenden Bemerkungen – ebenfalls plausibel.
- Die Verkehrsflüsse zum bzw. von Gleis 1 schätzen wir, insbesondere im Vergleich zu denjenigen zu/von Gleis 2-5, als zu hoch ein. Mögliche Ursachen sind jedoch schwierig auszumachen. Allerdings ist unbekannt, wie viele Nicht-Bahn- bzw. Busbenützer diesen Auf-/Abgang zu den zusätzlichen Angeboten beim Gleis 1 (Coop ToGo, Kiosk, Post- und Bankomaten, SBB-Schalter, Zugang zu den Taxis und zur Bahnhofsvorfahrt) benutzen. Im Weiteren ist zu berücksichtigen, dass Personen, die von Gleis 1 zur Migros in der Unterführung gehen und anschliessend wieder hinauf zum Gleis 1 zweimal erfasst wurden.
- Die Verkehrsflüsse von und zu Gleis 1 Nord erachten wir ebenfalls als zu hoch, wobei auch hier die Ursachen unbekannt sind.

### Wochenganglinien

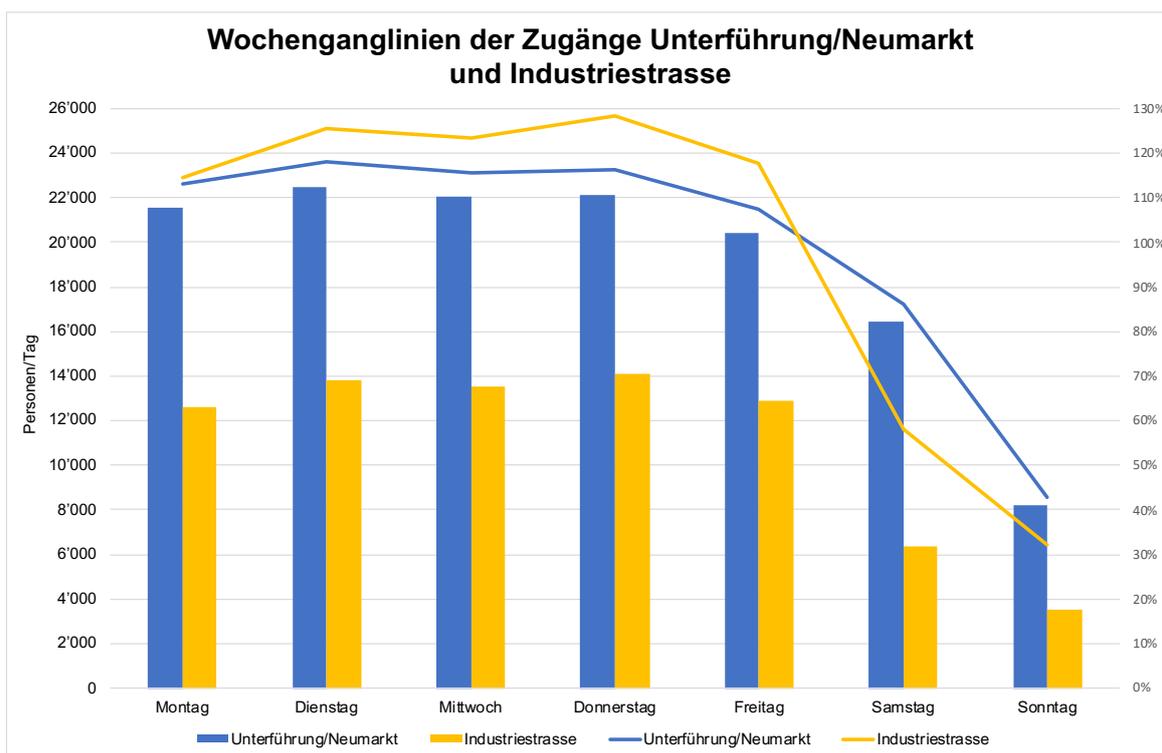


Abb. 31 Wochenganglinien für die Querschnitte Unterführung/Neumarkt und Industriestrasse

Die Wochenganglinien widerspiegeln typische Ganglinien für den Verkehrszweck «Pendlerverkehr». Dienstag bis Donnerstag sind in etwa gleich stark frequentiert und Montag und Freitag weisen eine leicht geringere Frequenz auf. Der Samstag ist durch den Einfluss des Einkaufsverkehr zwischen Windisch und Brugg noch stark begangen, während die Frequenz am Sonntag dann deutlich geringer ist.

Die Verteilung auf die Ziel- und Quellorte beträgt für die beiden Zugänge Neumarkt/Unterführung und Industriestrasse im Tagesdurchschnitt am Wochenende:

	Samstag		Sonntag	
	von/zu Neumarkt/Unterführung	von/zu Industriestrasse	von/zu Neumarkt/Unterführung	von/zu Industriestrasse
von/zu Gleis 1 und Gleis 1 Nord	70%	50-55%	70%	55-60%
von/zu Gleise 2-5	10-15%	5%	10-15%	5%
Durchgang	15-20%	40-45%	15-20%	35-40%

Die Verteilung auf die einzelnen Ziel- und Quellorte von/zur Industriestrasse ist ähnlich wie an Werktagen, wobei insbesondere am Samstag der Anteil «Durchgang» höher ist. Der im Vergleich zu den Werktagen (50-55%) deutlich höhere Anteil der Wegbeziehung «Gleis 1/ Gleis 1 Nord – Neumarkt/Unterführung» ist schwierig zu erklären. Er könnte mit den Angeboten beim Perron zu Gleis 1 zusammenhängen.

## 6 Einfluss der der Studienzeiten der FHNW

In der 1. Erhebungswoche waren Semesterferien an der Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW. Der Semester startete offiziell in der 3. Erhebungswoche. Die Studienanfänger begannen das Semester mit einer Einführungswoche in der 2. Erhebungswoche.

Die Fachhochschule schätzte die Anwesenheit von Studierenden und Mitarbeitenden während der Erhebungszeit wie folgt:

Kalenderwoche	Daten	2020	Zunahme gegenüber KW 36
KW36	31.8. – 6.9.	700	
KW37	7.9. – 13.9.	1000	+ 43%
KW38	14.9. – 20.9.	1700	+ 143%

Die Anzahl der Studierenden und Mitarbeitenden der FHNW haben insbesondere auf folgende Wegbeziehungen einen Einfluss:

- PU Süd: Gleis 1–Industriestrasse und Gleise 2-5–Industriestrasse
- PU Nord: Gleis 1–Industriestrasse, Gleis 1 Nord–Industriestrasse und Gleise 2-5–Industriestrasse

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Veränderungen dieser Wegbeziehungen über die drei Erhebungswochen.

Kalender- woche	PU Süd			PU Nord			Total		
	07 – 09 Uhr	16 – 18 Uhr	Tagesauf- kommen	07 – 09 Uhr	16 – 18 Uhr	Tagesauf- kommen	07 – 09 Uhr	16 – 18 Uhr	Tagesauf- kommen
<b>KW 36</b>	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
<b>KW 37</b>	185 %	140 %	140 %	120 %	95 %	105 %	145 %	110 %	120 %
<b>KW 38</b>	210 %	140 %	155 %	205 %	140 %	160 %	205 %	140 %	155 %

Die Daten sind allerdings mit Vorsicht zu geniessen, da der Datenumfang und die Datenqualität nicht in allen drei Wochen identisch sind. Dennoch ist ersichtlich, dass sich die Veränderung der Anzahl der Studierenden und Mitarbeitenden der FHNW auf die oben erwähnten Wegbeziehungen deutlich auswirkt, und zwar in der Morgenspitze deutlicher als am Abend.

In Kapitel 5 sind die Mittelwerte der drei Wochen dargestellt. Bei Vollbelegung der FHNW (KW 38) müssten die Werte für die oben erwähnten Wegbeziehungen am Morgen um 20-30 %, am Abend um 10-20 % und beim Tagesaufkommen ebenfalls um 10-20 % erhöht werden.

## 7 Einfluss der Pandemie

Gemäss SBB lagen die Passagierfrequenzen im September 2020 rund 30% unter denjenigen im September 2019. Die Frequenzen zu den Gleisen 2-5 müssten somit für den «Normalzustand» um ca. 30% erhöht werden. Den Einfluss der Pandemie auf die Frequenzen zu Gleis 1 schätzen wir als geringer ein. Wir nehmen an, dass sich die Zahl der Personen, die den Kiosk, den Shop usw. benutzen, weniger stark reduzierte als diejenige der Benutzer des öffentlichen Verkehrs. Dementsprechend schätzen wir, dass die Frequenzen zu Gleis 1 vor der Pandemie um ca. 20% höher lagen als während der Erhebungszeit.

Die Fachhochschule schätzte die Anwesenheit von Studierenden und Mitarbeitenden während der Erhebungszeit im Vergleich zum Vorjahr wie folgt:

Kalenderwoche	Daten	2019	2020	Veränderung
KW36	31.8. – 6.9.	1000	700	-30 %
KW37	7.9. – 13.9.	1200	1000	-17 %
KW38	14.9. – 20.9.	2000	1700	-15 %

Im Mittel waren somit während der Erhebungszeit im Vergleich zum Vorjahr rund 20% weniger Personen an der FHNW tätig. Dies korreliert somit in etwa mit den Schätzungen der SBB.

## 8 Beurteilung der eingesetzten Technologien

### 8.1 Wärmebildkamera Nilousense IRview, Universität Lausanne

Im Gegensatz zu einer normalen Videokamera zeichnet die Wärmebildkamera keine Bilder im sichtbaren Lichtspektrum auf, sondern erstellt ein Video von Wärmeunterschieden in der Umgebung. Die aufgezeichneten Bilder werden mittels Algorithmen ausgewertet. Dank Infrarot ist man nicht von den Lichtverhältnissen abhängig und Personen sind nicht identifizierbar. Das in der Studie verwendete Produkt ist ein Prototyp, das weiterentwickelt wird.

#### Installation

- Installation an einem Pfosten oder Geländer in ca. 2.5m Höhe
- Grösse: 220 x 135 x 105 mm
- Gewicht: 975 Gramm leicht inkl. Batterie
- Maximale Erfassungsbreite für einen Sensor beträgt 12m
- Installation erfolgte durch den Anbieter
- Energieversorgung durch Batterie, keine externe Stromversorgung notwendig
- Installationsaufwand: gering

#### Betrieb, Durchführung der Zählung

- Speicherung: auf einer Micro-SD-Karte; je nach Aufkommen muss sie alle 5-7 Tage ausgelesen werden.
- Batterie: bei dauernder Aufnahme hält sie maximal 3 Tage, bei Bewegungsaktivierung 1-2 Wochen.
- Vandalismusgefahr: leicht erhöht, da relativ niedrige Montagehöhe; das Gerät ist aber relativ klein und sticht dadurch nicht besonders stark hervor.
- Das Gerät ist grundsätzlich multimodal ausgelegt, das heisst, es kann neben den zu Fuss Gehenden auch verschiedene Fahrzeugkategorien inkl. Velo erfassen. Dies funktioniert gemäss Anbieter allerdings noch nicht optimal. Beim Bahnhof Brugg wurde nur die Zahl der zu Fuss Gehenden ausgewertet.
- Technische Ausfälle/Erfassungslücken: Ein Gerät war während rund 40% der Zeit ausgefallen, dass andere sogar während rund 70%. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es sich um Prototypen handelt. Für die Weiterentwicklung des Geräts muss die Stabilität deutlich verbessert werden.
- Zählgenauigkeit: Bei einem Gerät wurde eine Abweichung gegenüber der Handzählung von rund 10% festgestellt. Dies ist grundsätzlich genügend genau und erfordert keine Kalibration. Beim anderen Gerät wurde im Vergleich zu einer Zählung von ewp eine Abweichung von rund 35% festgestellt. Ob dieses Gerät wirklich ungenauer war oder ob die grosse Abweichung nur aufgrund des Datenvergleichs bei geringer Frequenz entstand, kann nicht beurteilt werden.
- Eine Kontrollzählung ist grundsätzlich erforderlich, um Fehler bei der Einrichtung oder von unerwünschten Fremdeinflüssen festzustellen.

#### Datenbereinigung und Auswertung der Zählung

- Die Online-Übertragung der Daten funktionierte nicht. Deshalb konnten die Ausfälle erst im Nachhinein erkannt werden.
- Die Daten werden auf einem Server der Universität Lausanne ausgewertet und als Viertelstundenwerte geliefert. Für die Erhebung am Bahnhof Brugg wurden die Daten zur Kalibration der BTWF-Signale verwendet.

#### Kosten

- Miete pro Gerät: Fr. 780 (pauschal) für drei Wochen inkl. Auswertung und Installation
- Kosten für die Benutzung der Datenplattform: inklusive
- Kauf des Geräts: Fr. 1'580 (ohne Installationszubehör)
- Auswertung: Fr. 0.40 pro Stunde

## 8.2 Bluetooth-WiFi-Geräte Nilousense BTpath, Universität Lausanne

Die Bluetooth-WiFi-Geräte empfangen die Signale, welche Geräte (Mobiltelefone, Tablets, Laptops, Kopfhörer usw.) mit aktiviertem Bluetooth oder WiFi aussenden. Gemäss dem Datenschutzkonzept werden diese anonymisiert gespeichert und auf einen Server übertragen. Die Kombination der auf verschiedenen Messgeräten gespeicherten Informationen erlaubt es, Rückschlüsse auf die Wege der Personen zu ziehen.

### Installation

- Die Geräte wurden mehrheitlich auf eine Höhe von 10 cm über Boden installiert.
- Vorgängig wurden Bohrhaken gesetzt, um die Koffer mit dem Gerät und der Batterie zu montieren.
- Der Betrieb erfolgte mit Batterie.
- Die Reichweite für eine zuverlässige Datenerfassung des Fussverkehrs beträgt ca. 10 – 30 m.
- Gewicht: Sensor 0.4 kg, Batterie 25 kg
- Abmessung Koffer mit Batterie: 600 x 300 x 480 mm
- Installation der Geräte erfolgte durch die Uni Lausanne
- Installationsaufwand: gering bis mittel je nach Montageart; in Brugg war der Aufwand für 11 Geräte relativ hoch, aufgrund des Setzen der Bohrhaken und der Anforderungen an die Wiederherstellung

### Betrieb, Durchführung der Zählung

- Vor Beginn der Erhebung wurde das Konzept mit der Beauftragten für Öffentlichkeit und Datenschutz des Kantons Aargau sowie mit der SBB abgestimmt.
- Zudem wurden eine Medienmitteilung versandt, um die Bevölkerung über den Grund der Erhebung und das Einhalten der Datenschutzbestimmungen zu informieren, und mehrere Informationstafeln aufgestellt (s. Anhang).
- Die Geräte erforderten während der Erhebungszeit keinen Einsatz.
- Die meisten Geräte hatten während der Erhebungszeit mehrere Unterbrüche.
- Trotz der geringen Montagehöhe wurden die Geräte nicht beschädigt.
- Die Daten wurden über eine SIM-Karte auf einen Server der Uni Lausanne übertragen.
- Die zwingend notwendigen Kontrollzählungen wurden mit zwei Wärmebildkameras sowie von Hand durchgeführt.

### Datenbereinigung und Auswertung der Zählung

- Die Datenauswertung der rund 32 Millionen Signale ist komplex. Neben der Umlegung auf die definierten Routen müssen die Daten auch mit den Zahlen der Wärmebildkamera kalibriert werden.
- Als Ergebnis wurden Excel-Files mit den viertelstündlichen Mengen je Wegbeziehung geliefert.
- Die Plausibilitätskontrolle und weitere Auswertung der gut 100'000 Viertelstundenwerte war ebenfalls recht aufwändig. Dies war insbesondere dadurch bedingt, dass die Geräte während Stunden und Tagen die Signale nicht zuverlässig erfasst hatten.
- Die Ergebnisse wurden im Weiteren mit den Daten der SBB verglichen.
- Wir schätzen, dass die Abweichungen der ausgewerteten Daten rund 15-20% betragen.

### Kosten

- Kauf: Zählgerät: 340 CHF, inkl. Batterie und Koffer: 850 CHF
- zusätzliche Batterie 260 CHF
- Miete: 330 CHF
- Übertragung per SIM-Karte: 15 CHF / Monat

### 8.3 Fazit

Bei den eingesetzten Geräten handelte es sich um Prototypen der Universität Lausanne. Dies war der Grund für die vielen Ausfallzeiten. Dies muss bei der Weiterentwicklung dringend verbessert werden.

Die Erfassung mit den Wärmebildkameras zur Kalibration war in Bezug auf die Technologie eine gute Lösung. Eine automatische Übertragung der erfassten Daten sollte jedoch möglich sein, um allfällige Unterbrüche sofort festzustellen. Rückblickend wäre es besser gewesen, 2 zusätzliche Geräte bei anderen BTWF-Geräten zu installieren, was eine zuverlässigere Kalibration ermöglicht hätte.

Als Alternative zur Wärmebildkamera können auch Lasergeräte zur Kalibrationserhebung eingesetzt werden. Die Genauigkeit dieser Geräte hat sich als sehr gut erwiesen.

Die BTWF-Technologie zur Erfassung von Wegbeziehungen erachten wir grundsätzlich als geeignet. Bei zuverlässiger Datenerfassung können die Verkehrsflüsse des Fussverkehrs gut erfasst werden. Insbesondere für die Erfassung der Wegbeziehungen in Unterführungen sind andere Technologien wenig geeignet. Eine Erhebung von Hand oder eine Befragung wären möglich, jedoch ebenfalls aufwändig und nur für eine kurze Erhebungsdauer machbar.

In einer offenen Situation, z. B. einem Platz, ist eine Erhebung mit mehreren Videokameras und geeigneter Auswertetechnologie ebenfalls denkbar bzw. allenfalls sogar besser geeignet als mit BTWF-Sensoren, da bei Plätzen die Gefahr grösser ist, dass falsche Signale, z. B. von Personen in Motorfahrzeugen, erfasst werden.

Um Fehler möglichst auszuschliessen, ist insbesondere folgendes zu beachten:

- Die synchrone Zeiteinstellung der verschiedenen Geräte muss sehr genau sein. Bereits wenige Sekunden Zeitdifferenz kann zu grösseren Fehlern führen.
- Wegbeziehungen nur zwischen 2 Erfassungsgeräten sind sehr unsicher. Störungen oder Signale von anderen Geräten (z. B. von Personen in anderen Verkehrsmitteln) innerhalb der Erfassungsreichweite der BTWF-Sensoren können bei einer solchen Beziehung die Genauigkeit stark beeinträchtigen. Bei Wegbeziehungen über 3 oder mehr Geräte ist die Wahrscheinlichkeit geringer, dass alle Geräte durch die gleichen „Fehlsignale“ beeinflusst werden. Dies ist vor allem bei Plätzen zu beachten.

## 9 Schlussbemerkungen

Das Ziel, die Fussverkehrsfrequenzen und Belastungsströme in den Personenunterführungen am Bahnhof Brugg/Windisch quantitativ zu erfassen und darzustellen, konnte grundsätzlich erreicht werden. Im Rahmen eines Pilotprojektes für die Forschung «Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs» wurde für diese Aufgabe eine Erhebung mit BTWF-Sensoren gewählt.

Der zeitliche Aufwand für die Erfassung und Auswertung war insbesondere aus folgenden Gründen sehr gross:

- Die Erhebung in den beiden Unterführungen erforderte 11 BTWF-Sensoren und zusätzlich 2 Wärmebildkameras zur Kalibrierung. Besonders die Montage der BTWF-Sensoren mit dem Setzen und Wiederentfernen der Bohrhaken sowie den Anforderungen an die Wiederherstellung war aufwändig.
- Die BTWF-Sensoren erfassten über 30 Millionen Signale, welche mit den Daten der Wärmebildkameras kalibriert und auf 50 Wegbeziehungen umgelegt werden mussten.
- Bei den eingesetzten Geräten der Universität Lausanne handelte es sich um Prototypen, was zu unerwartet vielen Datenlücken führte. Dies wiederum erforderte einen zusätzlichen Aufwand bei der weiteren Auswertung und Darstellung der Daten.
- Die noch geringe Erfahrung mit BTWF-Sensoren zur Zählung des Fussverkehrs führte zu fehlerhaften Daten, z. B. durch die Erfassung fremder Signale, was die Auswertung erschwerte.
- Die erhobenen Daten wurden zusätzlich mit den Daten der SBB abgeglichen und bereinigt.

Die Erfassung der Wegbeziehungen in Unterführungen mit der BTWF-Technologie erachten wir dennoch als gute Methode. Andere Technologien sind in einer solchen Situation (Unterführung, kein Durchblick, viele Quell-/Zielorte) wenig geeignet. Auch auf einem offenen Platz kann diese Technologie grundsätzlich eingesetzt werden, wenn es um die Erfassung von verschiedenen Wegbeziehungen geht. Allerdings steigt in einer offenen Situation das Risiko, dass die BTWF-Sensoren nicht nur Signale des Fussverkehrs erfassen, sondern auch von Personen in Motorfahrzeugen oder im öffentlichen Verkehr. Diese Gefahr kann reduziert werden, wenn für jede Wegbeziehung mindestens 3 BTWF-Sensoren installiert werden.

Die Ergebnisse erachten wir grundsätzlich als plausibel, wobei wir die Unsicherheit mit  $\pm 20\%$  schätzen. Die Verkehrsflüsse zum bzw. von Gleis 1 erachten wir, insbesondere im Vergleich zu denjenigen zu/von Gleis 2-5, jedoch als zu hoch. Für die Zugänge zu den Gleisen 2-5 konnte eine Angleichung an die Daten der SBB vorgenommen werden. Dies war für die Zugänge zum Gleis 1 nicht möglich, da diese Zugänge nicht nur von Bahnbenützern begangen werden, sondern auch von Personen zu den zusätzlichen Angeboten beim Gleis 1 (Busbahnhof, Coop ToGo, Kiosk, Post- und Bankomaten, SBB-Schalter, Zugang zu den Taxis und zur Bahnhofsvorfahrt). Wie gross die Passantenströme zu diesen Angeboten sind, kann nicht abgeschätzt werden.

Zusammenfassendes Ergebnis für die Personenunterführung Süd:

- Knapp 1'000 Personen pro Tag benutzen die Unterführung als Verbindung von Brugg nach Windisch bzw. umgekehrt.
- Etwa 4'000 Personen pro Tag benutzen die Unterführung als Zugang von Windisch zu den Gleisen 1-5 inkl. Zugang zu den Zusatzangeboten beim Gleis 1 bzw. umgekehrt und rund 5'000 Personen pro Tag von Brugg aus.

---

Zusammenfassendes Ergebnis für die Personenunterführung Nord:

- Knapp 5'000 Personen pro Tag benutzen die Unterführung als Verbindung von Brugg nach Windisch bzw. umgekehrt.
- Gut 8'000 Personen pro Tag benutzen die Unterführung als Zugang von Windisch zu den Gleisen 1-5 inkl. Zugang zu den Zusatzangeboten beim Gleis 1 bzw. umgekehrt und rund 17'000 Personen pro Tag von Brugg aus.

Für eine Zeit ausserhalb der Pandemie müssten die Zahlen um ca. 20-30% erhöht werden.

## 10 Anhang

### 10.1 Projektbeschreibung der Forschung



*Daniel Sauter*  
*Urban Mobility Research*

## Forschungsprojekt SVI 2017/009: Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs



### Projektbeschreibung

#### Problemstellung

Fussverkehrsdaten können auf allen Ebenen zweckdienlich in die Planung des Fussverkehrs einbezogen werden: Modellierung, Projektierung, Unterhalt und Controlling. Die technische Entwicklung der letzten Jahre hat Fussgängerzählungen vereinfacht und bezahlbar gemacht, wobei sich die Instrumente und Methoden z.T. ergänzen und zugleich auch immer mehr überlagern. In der Praxis bildet eine evidenzbasierte Planung des Fussverkehrs jedoch weiterhin die Ausnahme. Grund dafür sind folgende Schwierigkeiten:

- Flexibles Bewegungsverhalten von Fussgängern, das Erhebung z.T. anspruchsvoller macht als bei anderen Verkehrsmitteln
- Wenige Standards zur Erhebung und Nutzung von Fussverkehrsdaten
- Fragmentierte, projektbezogene Datengrundlage
- Systematische, permanente Erhebung des Fussverkehrs erst im Aufbau
- Komplexe technologische Entwicklungen im Bereich der Zählssysteme

#### Projektziel

Das Forschungsprojekt SVI 2017/009 adressiert dieses Probleme und zeigt auf, wie die Planung des Fussverkehrs anhand von Zähldaten evidenzbasierter erfolgen kann. Ziel ist es, praxisorientierte Hinweise für die konkrete Vorbereitung, Durchführung und Aufbereitung von Zählungen zu erarbeiten.

#### Forschungsfokus

Es besteht ausgewiesener Forschungsbedarf zu den auf dem Markt verfügbaren Technologien, zu Erhebungsorten und erforderlicher Zählstellendichte sowie zur Art und Weise, wie die Daten in die Planung einfließen können.

Dazu werden Grundlagen für verschiedene Planungsphasen (übergeordnete Planung, Detailplanung, Monitoring) und Anwendungsbereiche (Modellierung, Projektierung von Anlagen, Wirkungsanalysen) erarbeitet. Weiter wird eine Übersicht über geeignete Erhebungstechnologien und deren Anwendungsbereiche erstellt.

Der räumliche Fokus des Forschungsprojektes liegt dabei auf öffentlichen Räumen im Siedlungsgebiet und den Schnittstellen des öffentlichen Verkehrs. Es werden heute marktfähige Technologien betrachtet und Grundlagen für Bedürfnisse auf allen Ebenen (Bund, Kantone, Agglomerationen, Städte und Gemeinden) erarbeitet.

### Vorgehen

Das Forschungsprojekt SVI 2017/009 gliedert sich in drei Phasen:

In Phase 1 werden relevante Planungsfragen und der Datenbedarf eruiert, verfügbare Technologien systematisch zusammengestellt, vorhandene Daten und Projekte evaluiert und eine Synthese erstellt.

In Phase 2.1 werden **Piloterhebungen** mit interessierten Partnern durchgeführt. Dabei wird anhand ausgewählter Praxistests die Handhabbarkeit konkreter Fragestellungen möglichst mit unterschiedlichen Technologien vergleichend getestet. Ziel ist die Beantwortung offener Fragen und die systematische Sammlung von Erfahrungen zu konkreten Anwendungen. Die Erhebung soll zugleich auch für die Partner-Orte nützlich sein.

In Phase 2.2 werden mittels grösserer Datenbestände Erkenntnisse (z. B. Hochrechnungsfaktoren, Ganglinien nach Siedlungstypologie und Wegzwecken, der Wettereinfluss) überprüft und aktualisiert. Ziel ist es, Empfehlungen zur Verknüpfung verschiedener Datenquellen und zur Aufarbeitung von Zählungen zu formulieren.

Phase 3 beinhaltet die Erarbeitung des Forschungsberichtes, der den aktuellen Stand der Forschung zusammenfasst, neue Erkenntnisse zeigt und Empfehlungen für die Vorbereitung, Durchführung und Aufbereitung von Fussverkehrszählungen formuliert.

### Nutzen

Das Forschungsprojekt SVI 2017/009 mit den darin eingeschlossenen praxisorientierten Empfehlungen soll die Hürden für Erhebungen des Fussverkehrs senken und zwar auf zwei Arten. Einerseits können folgende Resultate direkt in der planerischen Praxis verwendet werden:

- Hilfestellung zur Vorbereitung, Durchführung und Aufbereitung von Erhebungen
- Technologie-Übersicht und spezifische Eignung in der Planungspraxis
- Übersicht zur Verwendung und Kombination von verfügbaren Datensätzen

Andererseits wird mit der Veröffentlichung des Forschungsberichts eine breite Gruppe von Fachleuten in Verwaltung, Planung und der Wirtschaft für Bedeutung und Nutzen der Erhebungen des Fussverkehrs sensibilisiert. Das Forschungsprojekt SVI 2017 leistet so einen Beitrag dazu, die Planung des Fussverkehrs evidenzbasierter zu gestalten.

### Forschungsteam

#### **Pestalozzi & Stäheli GmbH – Umwelt, Mobilität, Verkehr**

Christian Pestalozzi, Projektleitung, dipl. Ing. ETH/SIA, Verkehrsingenieur SVI

Andreas Stäheli, dipl. Bauing. FH, Verkehrsingenieur SVI, Raumplaner NDS/FH

Vera Conrad, dipl. Ing. Raumplanung, Dr.-Ing.

Matthias Mahler, BA Geografie

#### **Fussverkehr Schweiz**

Thomas Schweizer, dipl. Geograf, Verkehrsingenieur SVI

Dominik Bucheli, dipl. Geograf

#### **Urban Mobility Research**

Daniel Sauter, lic. phil. I, Soziologe, Büroinhaber

## 10.2 Datenschutzkonzept

### Frequenzzählung und Erfassung der Wegbeziehungen am Bahnhof Brugg/Windisch Informationssicherheits- und Datenschutzkonzept (ISDS-Konzept)

**Autor:** Christian Kaiser, Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne

**Datum:** 18. März 2020

**Version:** 1.2.1

#### 1. Ausgangssituation

---

Die Fussgängerfrequenzen in den beiden Hauptunterführungen am Bahnhof Brugg/Windisch sowie die von den Passanten zurückgelegten Wegstrecken (kurz «Wegbeziehungen») sollen zu Planungszwecken ermittelt werden. Gleichzeitig werden die eingesetzten Erfassungsgeräte auf die Messgenauigkeit hin überprüft um die Anwendbarkeit in ähnlichen Situationen zu evaluieren. Im Wesentlichen soll der Anteil der Personen die den Zug nehmen bzw. der Personen die nur die Unterführung benutzen ermittelt werden.

Diese Zielsetzung wird mittels Geräten zur Erfassung von anonymisierten Bluetooth- und Wifi-Signalen (BTWF) sowie Wärmebildkameras (WBK) erreicht. Die BTWF-Geräte können erfassen, dass ein bestimmtes elektronisches Gerät zu einem bestimmten Zeitpunkt einen bestimmten Punkt passiert hat. Sie sind somit für das Erkennen einer von einem elektronischen Gerät zurückgelegten Wegstrecke geeignet. Die BTWF-Geräte können jedoch nicht erkennen, welche Anzahl von Personen hinter der erfassten Anzahl elektronischer Geräte steht. Zur Ermittlung der Personen-Frequenzen müssen deshalb zusätzlich WBK eingesetzt werden (im Einzelnen vgl. unten).

Diese Kampagne ist Teil des SVI<sup>1</sup> Forschungsprojekt 2017/007 «Empfehlungen zur Zählung des Fussverkehrs» im Auftrag des Bundesamtes für Strassen ASTRA. Als Bestandteil des Forschungsprojektes sind Piloterhebungen vorgesehen. Eine dieser Piloterhebungen ist die Erhebung der Fussgängerfrequenzen in den beiden Personenunterführungen (PU) am Bahnhof Brugg.

Dieses Dokument fasst die Aspekte der Informationssicherheit und des Datenschutzes im Zusammenhang mit diesem Projekt zusammen und hält die Angaben zur Erhaltung und Verbesserung der Informationssicherheit und des Datenschutzes fest.

#### 2. Methodologie zur Erfassung von Bluetooth- und Wifi-Signalen

---

Die Geräte zur Erfassung von BTWF-Signalen ermöglichen es, die zurückgelegten Wegstrecken zwischen mehreren Zählpunkten zu erstellen. Dazu werden vom BTWF-Gerät die MAC-Adressen von Bluetooth- und Wireless-fähigen Geräten erfasst, also insbesondere von Smartphones, Tablets, Laptops, Smartwatches, Bluetooth-Kopfhörer und wireless-fähigen e-Reader. Das BTWF-Gerät funktioniert dabei bloss als passiver Empfänger, das heisst es empfängt nur Signale, die von diesen verschiedenen Geräten sowieso gesendet werden. Die BTWF-Geräte interagieren in keinem Fall mit den Bluetooth- und Wireless-fähigen Geräten. Somit entstehen auch keine Auswirkungen auf die Geräteleistung oder den Batteriever-

---

<sup>1</sup> SVI: Schweizerische Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten; <https://www.svi.ch>

brauch, und die Geräte werden in keinerlei Weise in der Funktion beeinflusst oder gar beeinträchtigt.

Die von den Bluetooth- und Wireless-fähigen Geräte gesendete MAC-Adresse ist eine eindeutige Identifikationsnummer der Netzwerkkarte des Gerätes. Die MAC-Adresse erlaubt es den Hersteller der eingesetzten Netzwerkkarte zu ermitteln. Um jedoch eine MAC-Adresse einem konkreten Gerät oder sogar dem betreffenden Besitzer zuzuordnen zu können, benötigt man Zusatzinformationen die typischerweise nur der Besitzer des Gerätes oder das Gerät mit Zustimmung des Besitzers liefern können, oder man benötigt physischen Zugriff auf das Gerät. Die an der Durchführung des Projekts beteiligten Personen verfügen deshalb über keine Möglichkeit, eine MAC-Adresse einer bestimmten Person zuzuordnen. Aus ihrer Sicht handelt es sich bei der MAC-Adresse bereits um eine anonymisierte Information.

Dennoch wird diese Information so behandelt als sei sie schützenswert, weshalb die Verarbeitung so aufgesetzt wird, dass die MAC-Adresse zu keinem Zeitpunkt irgendwo abgespeichert wird, weder auf dem BTWF-Gerät noch während eines nachgelagerten Verarbeitungsschrittes. Sie wird sofort innerhalb von Sekundenbruchteilen weiterverarbeitet. In einem ersten Schritt wird die MAC-Adresse mit einem sich periodisch automatisch ändernden Zufallswert kombiniert<sup>2</sup> und anschliessend mittels einer kryptographischen Einweg-Hashfunktion irreversibel zu einem Hash-Wert verrechnet<sup>3</sup>. Dieser Hash-Wert erlaubt es nicht Rückschlüsse auf den ursprünglichen Wert zu ziehen. Dieser Hash-Wert wird anschliessend zusammen mit der aktuellen Zeit sowie der Signalstärke<sup>4</sup> auf dem BTWF-Gerät abgespeichert. Diese Daten werden nach erfolgreicher Datenübertragung wieder vom BTWF-Gerät gelöscht (vgl. unten).

Solange der vom Gerät für das Hashverfahren verwendete Zufallswert derselbe ist, erzeugt eine MAC-Adresse auch immer denselben Hashwert. Damit die von einer Person zurückgelegte Wegstrecke erkennbar ist, müssen die Zufallswerte und die daraus generierten Hashwerte auf allen eingesetzten BTWF-Geräten zur gleichen Zeit identisch sein, und die Zufallswerte müssen so lange gültig sein, als eine Person benötigt, um die auszuwertende Wegstrecke zwischen zwei BTWF-Geräten zurückzulegen. Dies weil ein bei Wegpunkt A erfasstes elektronisches Gerät beim nächsten Wegpunkt B erkannt werden muss, da sonst der von diesem Gerät zurückgelegte Weg nicht erfasst werden kann. Andererseits soll vermieden werden, dass Bewegungsprofile erstellt werden können, welche über das einmalige Erfassen einer Wegstrecke hinausgehen. Um beiden Zielen gerecht zu werden, bleibt der Zufallswert während etwa fünf Minuten gleich und wird danach ersetzt.

Um die elektronischen Geräte über den exakten Zeitpunkt des Wechsels des Zufallswert hinaus erkennen zu können werden parallel jeweils zwei Hash-Werte berechnet, jeweils mit einem alten und einem neuen Zufallswert. Somit kann die gleiche MAC-Adresse über einen Zeitraum von 5 bis 10 Minuten (einfache bis doppelte Wechselperiode) wiedererkannt

---

2 Bei einer MAC-Adresse «0123456789ab» (6 Bytes) und einem Zufallswert «4fa1a3696ac237665dd6e2ff90d65274» (16 Bytes) wird die Sequenz «0123456789ab4fa1a3696ac237665dd6e2ff90d65274» erzeugt.

3 Eine kryptographische Einweg-Hashfunktion errechnet aus dem Eingangswert einen Ausgabewert, wobei es jedoch praktisch unmöglich ist, vom Ausgabewert irgendwelche Rückschlüsse auf den Eingangswert zu ziehen. Im konkreten Fall wird der Algorithmus BLAKE2b als Hashfunktion benutzt. Es handelt sich dabei um eine state-of-the-art Hashfunktion ohne bekannte Sicherheitsmängel. Als Beispiel wird die obige Sequenz «0123456789ab4fa1a3696ac237665dd6e2ff90d65274» in den Hash-Wert «0bb72cc73b7f0b9ce6ebc3518efb4bb1e9f605f11e6203b2589dd7808323e114a76b19cd8de34f31ad0e4a4c12c129d051828291fa373ed22e9a96747649a649» umgerechnet.

4 Die Signalstärke wird weiter unten genauer diskutiert.

werden, jedoch nicht über diesen Zeitraum hinaus. Wird also ein Gerät 12 Minuten später erneut erfasst, wird es als neues Gerät erkannt und Rückschlüsse auf eine vorherige Erkennung sind nicht möglich.

Damit die Erstellung der Wegbeziehungen möglich ist, müssen alle an der Messkampagne beteiligten Geräte dieselben periodischen Zufallswerte besitzen. Diese Zufallswerte werden von einem Server der Universität Lausanne generiert und mittels verschlüsseltem Protokoll über das Mobilfunknetz an die Geräte verteilt<sup>5</sup>. Es werden jeweils die Zufallswerte für 4 Perioden übertragen<sup>6</sup>. Gebrauchte Zufallswerte werden gelöscht.

Die jeweiligen aus den MAC-Adressen errechneten Hashwerte werden einmal pro Stunde zusammen mit den Zeitangaben und der erfassten Signalstärke an einen Server der Universität Lausanne übertragen. Die Übertragung erfolgt wie bei den Zufallswerten mittels asymmetrischem Verfahren verschlüsselt mittels SSH-Protokoll (vgl. Fussnote 4). Der Server überprüft die Vollständigkeit der Daten und meldet dies dem BTWF-Gerät, worauf die übertragenen Daten vom internen Speicher des BTWF-Geräts irreversibel und vollständig gelöscht werden.

Eine Software auf einem Server der Universität Lausanne wertet die übertragenen Daten innerhalb von drei Stunden automatisiert aus und errechnet die verschiedenen Wege. Zeitangaben werden auf 15-Minuten-Intervalle umgerechnet.

Die Reichweite der Bluetooth-Signale liegt bei ungefähr 10 bis 30 Meter, jene für Wifi-Signale liegt bis maximal 50 Meter. Da diese Distanzen zu grob sind für die benötigte räumliche Analyse muss die Signalstärke erfasst und abgespeichert werden. Durch wiederholten Signalempfang kann abgeschätzt werden wann eine Bluetooth- oder Wifi-Gerät dem Sensor am nächsten kommt. Durch diese Angaben können die Wegstrecken errechnet werden.

Die genauen Zeitangaben sowie die Signalstärke werden nach erfolgter Auswertung, also spätestens etwa 2 Stunden nach deren Erfassung durch die BTWF-Geräte irreversibel und automatisch gelöscht. Gespeichert bleiben danach nur die (anonymisierten) Personenbewegungen pro Wegstrecke und auf 15 Minuten genau der Zeitpunkt dieser (anonymisierten) Personenbewegung.

Die auf die 15-Minuten-Intervalle errechneten Frequenzen pro Wegstrecke werden auf einem Server der Universität Lausanne abgespeichert bis die Daten der Wärmebildkameras verfügbar sind. Anschliessend werden die mittels BTWF-Daten errechneten Frequenzen pro Wegstrecke umgerechnet auf Personen-bezogene Frequenzen pro Wegstrecke, mit Hilfe des bei der Kalibrierung errechneten Verhältnis (siehe unten).

Bei 3 Personenbewegungen oder weniger pro (Personen-bezogene) Wegstrecke innerhalb eines 15-Minuten-Intervalls werden die betroffenen Bewegungen pro Wegstrecke auf 1 Stunde aggregiert und dann zufällig wieder auf 15-Minuten-Intervalle verteilt. Daraus ergibt sich bei wenig Bewegungen, z.B. in der Nacht, eine zeitliche Unschärfe. Die Intervalle liessen

---

5 Es wird ausschliesslich das SSH-Protokoll für die Übertragung verwendet. Dieses Protokoll kann nur nach Authentifizierung benutzt werden. Die Übertragung kann nur vom BTWF-Gerät initiiert werden. Dazu werden die Daten noch zusätzlich durch ein asymmetrisches Verfahren verschlüsselt. Bei einem asymmetrischen Verfahren existiert ein öffentlicher Schlüssel, der nur für die Verschlüsselung verwendet werden kann, und ein privater Schlüssel für die Entschlüsselung. Der private Schlüssel wird dabei auf dem BTWF-Gerät installiert, der öffentliche Schlüssel auf dem die Zufallszahlen generierenden Server. Konkret wird die OpenSSH-Implementierung des Ed25519-Verfahrens eingesetzt.

6 Es wird jeweils der aktuelle Zufallswert sowie drei zukünftige Zufallswerte übertragen. Somit ist eine Verbindung mindestens alle 15 Minuten erforderlich.

sich auch bei Bedarf verlängern, was aber zu ungenaueren Aussagen über die Personenbewegungen führen würde. Die Personen-bezogenen Frequenzen pro Wegstrecke werden dem Auftraggeber zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt und für eine Dauer von 3 Monaten auf dem Server der Universität Lausanne aufbewahrt. Die Geräte-bezogenen Frequenzen sowie die aus der Kalibrierung errechneten Verhältnisse zwischen den Geräte- und Personen-Frequenzen werden dagegen irreversibel gelöscht.

### 3. Methodologie zur Kalibrierung der Frequenzen

---

Da eine Person mehrere Apparate mit Bluetooth oder Wifi auf sich tragen kann, oder auch gar keinen, müssen die Daten der Bluetooth/Wifi-Sensoren mit einer anderen Messmethode kalibriert werden, um zuverlässige Frequenzdaten zu erhalten. Durch die Kalibrierung kann festgestellt werden, welches das Verhältnis zwischen erfassten elektronischen Geräten (bzw. MAC-Adressen) und der tatsächlichen Anzahl Personen an einem gegebenen Ort und zu einer gegebenen Zeit ist. Dieses aus der Anzahl erfassten elektronischen Geräten und der gezählten Anzahl Personen errechnete Verhältnis wird benötigt um die Personen-bezogenen Frequenzen der einzelnen Wegstrecken zu bestimmen. Für diese Kalibrierung ist eine Wärmebildkamera vorgesehen.

Die Wärmebildkamera erfasst ein thermisches Bild mit einer Auflösung von 160x120 Pixel<sup>7</sup>. Die Abbildung 1 zeigt drei Beispiele eines solchen thermischen Bildes. Diese Bilder erlauben keine Identifikation einer Person. Dabei werden während 24 Stunden pro Tag 3 Bilder pro Sekunde aufgenommen und auf der internen SD-Karte verschlüsselt abgespeichert. Die Verschlüsselung erfolgt mittels asymmetrischem Verschlüsselungsverfahren anhand eines öffentlichen Schlüssels<sup>8</sup>. Der private Schlüssel existiert nur auf dem Auswertungs-Server der Universität Lausanne, sowie in der entsprechenden Sicherungskopie der Universität Lausanne. Damit ist gewährleistet, dass eine Person, welche ein Gerät entwendet, nicht auf die Bilder auf der SD-Karte zugreifen kann. Die SD-Karte wird spätestens nach 72 Stunden ausgewechselt und die Daten an den Auswertungs-Server übertragen. Das Austauschen der SD-Karte wird vom Auftraggeber durchgeführt, und die verschlüsselten Daten werden anschliessend mittels einem speziellen von der Universität Lausanne entwickelten Programm auf den Auswertungsserver der Universität Lausanne übertragen. Dabei wird eine gesicherte SSH-Verbindung verwendet. Die erfolgreich übertragenen Daten werden vom Übertragungsprogramm sofort automatisch und irreversibel von der SD-Karte gelöscht. Die übertragenen Daten werden dann innerhalb von 48 Stunden an der Universität Lausanne automatisch ausgewertet. Der Server zählt die Anzahl Fussgänger und fasst die Frequenzen in 15-Minuten-Intervallen zusammen.<sup>9</sup> Die Wärmebildaufnahmen werden anschliessend automatisch und irreversibel gelöscht. Die mittels der Wärmebildkamera bestimmten Fuss-

---

7 Es kommt ein Lepton-3-Sensor von FLIR zum Einsatz, der in einer Wellenlänge von 8 bis 14µm arbeitet.

8 Ein asymmetrisches Verschlüsselungsverfahren verwendet ein öffentlicher Schlüssel zur Verschlüsselung der Daten. Zur Entschlüsselung der Daten wird ein zweiter, privater Schlüssel benötigt. Der öffentliche Schlüssel kann frei zugänglich sein, der private Schlüssel muss jedoch geheim gehalten werden. Konkret wird das RSA-Verfahren mit einem 4096-bit Schlüssel eingesetzt. Dieses Verschlüsselungsverfahren ist weit verbreitet und zahlreiche als sicher betrachtete Implementierungen sind verfügbar. Mit einem 4096-bit Schlüssel wird das Verfahren gemäss heutigem Kenntnisstand als sicher betrachtet.

9 Das Auswertungsverfahren erkennt Fussgänger, Velos, Motorräder, Autos, Lastwagen, Trams und in gewissen Umständen auch Rollstühle, Kinderwagen und Trottinette oder ähnliche Verkehrsmittel. Die meisten dieser Kategorien sind für die beschriebene Anwendung jedoch irrelevant, da die Zählung in einer Bahnhofunterführung vorgenommen wird.

gänger-Frequenzen werden anschliessend automatisch dazu verwendet, das Verhältnis mit den Geräte-bezogenen Frequenzen der BTWF-Geräte zu errechnen (vgl. oben). Diese Auswertung geschieht ebenfalls auf dem Server der Universität Lausanne.

Bei 3 oder weniger gezählten Personen pro Richtung und 15 Minuten werden die betroffenen Bewegungen zeitlich so aggregiert, dass mindestens 4 Personenbewegungen pro Richtung im Zeitintervall enthalten sind. Anschliessend werden die Frequenzen zufällig auf die ursprünglichen 15-Minuten-Intervalle verteilt. Daraus ergibt sich bei tiefen Frequenzen eine zeitliche Unschärfe.

Die Fussgänger-Frequenzen pro Richtung werden anschliessend dem Auftraggeber zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt und für eine Dauer von 3 Monaten auf dem Server der Universität Lausanne aufbewahrt. Alle anderen durch die Kamera gespeicherten oder durch die Analyse errechneten Daten werden dagegen sofort irreversibel gelöscht.

Eine Auswertung der Bilder direkt auf der Wärmebildkamera wäre zwar wünschenswert, ist aufgrund der nötigen Rechenleistung derzeit jedoch nicht umsetzbar. Im Weiteren hat die Wärmebildkamera den Vorteil gegenüber anderen Frequenzzählgeräten, dass die Zählung frontal oder schräg erfolgen kann. Geräte die mittels pyroelektrischer Passiv-Infrarot-Technik<sup>10</sup> die Frequenzen erfassen sind auf seitliche Messungen angewiesen. Dadurch werden Personen die parallel nebeneinander gehen nur ungenügend gezählt. In einer Bahnhofunterführung ist dies jedoch sehr häufig der Fall, gerade in Spitzenzeiten.

Total werden eine oder allenfalls zwei Wärmebildkameras eingesetzt (im letzteren Fall je eine pro Unterführung).



Abbildung 1. Beispiele von Aufnahmen der Wärmebildkamera in einem realen Messumfeld.

#### **4. Sicherheitsrelevante Angaben zur Speicherung und Bearbeitung der Daten**

Beim Auswertungsserver handelt es sich um einen virtuellen Server der auf der Server-Infrastruktur des Centre informatique der Universität Lausanne läuft. Der physische Zugang zur Infrastruktur auf welcher der virtuelle Server betrieben wird ist nur autorisierten Mitarbeitern des Centre informatique erlaubt, wobei aufgrund der Verschlüsselung des virtuellen Speichers selbst der physische Zugang zu dieser Infrastruktur keinen Zugriff auf die gespeicherten Daten erlaubt.

Der Zugriff auf den Server (und damit auch der Zugriff auf private Schlüssel zur Entschlüsselung der SD-Karte mit den Wärmebildaufnahmen) erfolgt über das SSH-Protokoll und ist folgenden Personen vorbehalten:

<sup>10</sup> Die pyroelektrische Passiv-Infrarot-Technik wird unter anderem von Bewegungssensoren verwendet.

- **Christian Kaiser**, Maître d'Enseignement et de Recherche, Institut de géographie et durabilité, Faculté des Géosciences et Environnement
- **Simon Hiscox**, Informatiker an der Faculté des Géosciences et Environnement

Der Zugriff auf den Server kann nur innerhalb des Netzwerkes der Universität Lausanne erfolgen. Einmal täglich wird vom Server automatisch ein Backup erstellt. Dieses Backup ist ebenfalls verschlüsselt und der Zugriff ist den gleichen Personen vorbehalten wie beim Auswertungsserver selber. Sobald ein neues Backup erstellt worden ist, wird das vorherige Backup automatisch und irreversibel gelöscht.

C. Kaiser ist verantwortlich für den Betrieb des Servers sowie für die Auswertungs-Pipeline. S. Hiscox hat keine Verantwortung für den Betrieb des Servers, kann aber im Notfall die Administration übernehmen. Beide Personen haben sich schriftlich verpflichtet die direkt von den BTWF-Geräten wie auch den Wärmebildkameras gespeicherten Daten nur auf dem Server zu speichern und bei Problemen mit der Auswertungs-Pipeline nach spätestens 24 Stunden zu löschen.

Es können zusätzlich weitere Benutzerkonten auf dem Server existieren, die bloss zur Datenübertragung verwendet werden können («write-only directories»), und die keinen weiteren Zugriff auf den Server erlauben.