

## UNTERSUCHUNGEN ZUR ZUVERLÄSSIGKEIT DES STRABEN- BAHNNETZES IN KRAKAU

**M. Dudek**<sup>\*</sup>, M. Richter

<sup>\*</sup> Cracow University of Technology, Chair of Transport Systems,  
Ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Poland  
E-mail: mariusz@transys.wil.pk.edu.pl

**Keywords:** public transport, modelling, network reliability, priorities for public transport.

**Abstract.** *Der Begriff der Zuverlässigkeit spielt eine zentrale Rolle bei der Bewertung von Verkehrsnetzen. Aus der Sicht der Nutzer des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) ist eines der wichtigsten Kriterien zur Beurteilung der Qualität des Liniennetzes, ob es möglich ist, mit einer großen Sicherheit das Reiseziel in einer vorgegebenen Zeit zu erreichen. Im Vortrag soll dieser Zuverlässigkeitsbegriff mathematisch gefasst werden. Dabei wird zunächst auf den üblichen Begriff der Zuverlässigkeit eines Netzes im Sinne paarweiser Zusammenhangswahrscheinlichkeiten eingegangen. Dieser Begriff wird erweitert durch die Betrachtung der Zuverlässigkeit unter Einbeziehung einer maximal zulässigen Reisezeit. In vergangenen Arbeiten hat sich die Ring-Radius-Struktur als bewährtes Modell für die theoretische Beschreibung von Verkehrsnetzen bewährt. Diese Überlegungen sollen nun durch Einbeziehung realer Verkehrsnetzstrukturen erweitert werden. Als konkretes Beispiel dient das Straßennetz von Krakau. Hier soll insbesondere untersucht werden, welche Auswirkungen ein geplanter Ausbau des Netzes auf die Zuverlässigkeit haben wird.*

# 1 EINLEITUNG

Die Qualität des öffentlichen Personennahverkehrs (ÖPNV) wird durch verschiedene Parameter beschrieben, etwa die Pünktlichkeit, die Regelmäßigkeit oder die Wartezeit der Passagiere an den Haltestellen. Für viele Benutzer des ÖPNV ist eines der wichtigsten Kriterien, ob sie das Reiseziel in einer vorgegebenen Zeit erreichen. Dieses Kriterium wird oftmals als Zuverlässigkeit der Verbindung bezeichnet. In vielen Städten beobachtet man starke Bestrebungen, die Qualität des ÖPNV zu verbessern. Die Passagiere werden in zunehmendem Maße als „Gäste“ im Fahrzeug betrachtet, die Zufriedenheit der Passagiere hat oberste Priorität. Eine zu geringe Attraktivität des ÖPNV-Systems verursacht im übrigen unmittelbar eine Vergrößerung der Verkehrsmenge im Motorisierten Individualverkehr (MIV), was die Verkehrsbedingungen für ÖPNV-Fahrzeuge wiederum zusätzlich verschlechtert.

Es gibt viele Faktoren, die einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit eines Verkehrsnetzes haben. Man kann sie in zwei Gruppen teilen, wobei die erste Gruppe aus den Faktoren besteht, die man vorhersehen kann:

- Reparatur der Straßenbahngleisanlagen oder von Elementen der technischen Infrastruktur (z. B. Wasseranschluss, Gasleitung),
- Sperrung wegen öffentlicher Kundgebungen, Sport- oder Kulturveranstaltungen,
- Sperrung wegen Durchfahrt „wichtiger Personen“.

In diesen Fällen kann und soll der Verkehrsunternehmer langfristig über die vorliegende Situation informiert werden, um entsprechende Umleitungen zu organisieren. Wenn es möglich ist, Umleitungen über Strecken mit einer entsprechenden Kapazität zu planen, haben die beschriebenen Faktoren einen relativ geringen Einfluss auf die Möglichkeit, das Reiseziel innerhalb einer vorgegebenen Zeit zu erreichen.

Die zweite Gruppe besteht aus Faktoren, die einen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Strecke haben und die unvorhersehbar sind, zum Beispiel

- eine Panne der Straßenbahn, die die Durchfahrt anderer Fahrzeuge blockiert,
- ein Autounfall oder eine Autopanne, die die Durchfahrt der Straßenbahnen blockieren,
- Beschädigung einer Brücke oder der technischen Infrastruktur (z. B. Wasseranschluss, Gasleitung),
- Naturkatastrophen, zum Beispiel Hochwasser, Erdbeben,
- terroristische Anschläge (oder das Vorliegen von entsprechenden Verdachtsmomenten),
- Überlastung durch den Straßenverkehr (Stau).

Die mathematische Fassung subjektiver Einschätzungen zum Begriff der „Zuverlässigkeit“ ist nicht immer einfach. Hier soll der Zuverlässigkeitsbegriff wie folgt gefasst werden. Das Liniennetz wird zunächst als Graph modelliert. Die Kanten werden dabei mit gewissen Verfügbarkeiten (Zuverlässigkeiten) bewertet. Zu zwei vorgegebenen Knoten wird unter geeigneten Annahmen untersucht, mit welcher Wahrscheinlichkeit im Graph ein Weg existiert, auf dem man vom Quell- zum Zielknoten gelangen kann. Ein solcher Zuverlässigkeitsbegriff wird auch in der Literatur oft verwendet (vgl. zum Beispiel [1,2]). Zusätzlich gibt es in letzter Zeit Bestrebungen, das Verlangen nach einer akzeptablen Reisezeit einer funktionierenden Ver-

bindung mit in den Zuverlässigkeitsbegriff einzubeziehen (ein guter Überblick ist in [3] zu finden). Eine solche Modifikation ist sicher sinnvoll, denn allein die Tatsache, dass irgendein funktionierender Weg zwischen Start- und Zielknoten existiert, ist sicher nicht so aussagekräftig für die Qualitätsbeurteilung des Netzes wie die Aussage, dass ein entsprechender Weg existiert, der in einer vorgegebenen (a priori festlegbaren) Zeitspanne zurückgelegt werden kann.

Die in der Literatur verwendeten mathematischen Modellvoraussetzungen sind unterschiedlich. Während in [2] ein stochastisch unabhängiges Versagen der einzelnen Kanten unterstellt wird, existieren zunehmend auch Ansätze zur Modellierung stochastischer Abhängigkeiten [3]. Nichtsdestotrotz soll hier die Unabhängigkeit eine zentrale Voraussetzung sein. Während in der Literatur (etwa in [2,3]) oftmals Verfahren zur numerischen Bestimmung von Abschätzungen verschiedener Zuverlässigkeitskennzahlen entwickelt werden, soll sich das Vorgehen hier auf eine exakte Berechnung der entsprechenden Kenngrößen konzentrieren. Es ist bekannt, dass entsprechende Verfahren im allgemeinen numerisch aufwendig sind. Mit den Überlegungen in [4] kann beispielsweise gezeigt werden, dass das oben beschriebene Problem der Bestimmung der Wahrscheinlichkeit, mit der zwischen zwei vorgegebenen Punkten eine funktionsfähige Verbindung existiert, NP-schwer ist. Auf der anderen Seite zeigte sich aber bei den Untersuchungen in [5,6] (wo Zuverlässigkeitskennzahlen mit strukturellen Kennzahlen verglichen werden), dass gerade bei sehr komplexen Netzwerken, wie sie in der Realität auftreten, eine exakte Bestimmung der Zuverlässigkeit zweckmäßig ist.

## 2 VERKEHRSNETZSTRUKTUREN

Für theoretische Untersuchungen hat sich die Ring-Radius-Struktur bewährt, die auf der einen Seite klar strukturiert und gut handhabbar ist und auf der anderen Seite reale Straßennetze gut widerspiegelt. Neben diesem theoriebezogenen Beispiel soll hier auch ein reales Verkehrsnetz, namentlich das Krakauer Straßennetz, betrachtet werden

### 2.1 Ring-Radius-Struktur

Aus der Vielzahl der theoretisch denkbaren Verkehrsnetzstrukturen spiegelt die Ring-Radius-Struktur die realen Straßennetze am besten wider. Eine Ring-Radius-Struktur ist charakterisiert durch eine Menge  $R$  von Ringen  $R_1, R_2, \dots, R_S$  (paarweise knotendisjunkte Zyklen), und eine Menge  $M$  von radialen Verbindungen, die alle einen Knoten  $i_0$  (das Zentrum) gemeinsam haben. Je zwei radiale Verbindungen haben außer diesem Zentrum keinen Knoten gemeinsam. Außerdem ist jeder Ring zu jeder radialen Verbindung kantendisjunkt.

Solche Ring-Radius-Strukturen kommen in vielen (auch mittelgroßen) Städten vor. Selbstverständlich müssen nicht in jedem konkreten Fall alle Verbindungen auch tatsächlich vorhanden sein. So ist die Ring-Radius-Struktur zum Beispiel geeignet, die Einführung einer Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum (durch Wegfall der vier radialen Verbindungen innerhalb des Innenrings) zu untersuchen. Die Verminderung des Fahrzeugsverkehrs in der Innenstadt ist notwendig, um ihre Funktion als kulturelles Zentrum vor Abbau zu schützen.

Das vollständige Modell der Ring-Radius-Struktur ist in Abbildung 1 skizziert. Eine Besonderheit stellen die vier radialen Straßenzüge dar, die den inneren Ring mit dem Außenring verbinden, aber nicht durch das Zentrum verlaufen.

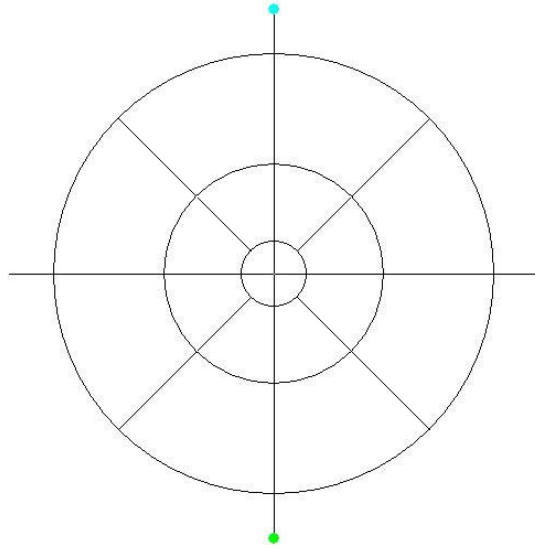


Abbildung 1: Vollständige Ring-Radius-Struktur.

Das in Abbildung 1 dargestellte Straßennetz war der Ausgangspunkt für weitere Modifikationen. Im ersten Schritt der Verkehrsberuhigung wurde die Durchfahrt durch den zentralen Punkt gesperrt. Dann wurde auch der Verkehr im inneren Ring verboten. Es wurden auch Straßennetze mit und ohne Verkehrsberuhigung im Zentralpunkt ohne Außenring, nur mit Innenring und mit allen drei Ringen, aber ohne die oben beschriebenen Radialstraßen, analysiert.

## 2.2 Straßenbahnnetz in Krakau

Krakau ist eine historische Stadt, in der die Straßenbahn das älteste öffentliche Verkehrsmittel ist. Auch heute noch spielt sie die wichtigste Rolle im ÖPNV – so finden beispielsweise ca. 41 % der Reisen, deren Ziel das Stadtzentrum ist, mit der Straßenbahn statt. Die Straßenbahn ist generell das am häufigsten verwendete öffentliche Verkehrsmittel in der Stadt, besonders bei Fahrten auf größere Entfernung.

Das Liniennetz in Krakau hat im Wesentlichen radiale Gestalt und verfügt nur entlang des Stadtzentrums über einen geschlossenen Ring. Auch das Liniennetz im neuen Stadtteil „Nowa Huta“ (der im östlichen Teil der Stadt liegt und dessen Bau erst in den 50-iger Jahren des 20. Jahrhunderts begonnen wurde) hat eine radiale Gestalt. Kritisch ist, dass beide Netze zur Zeit nur einen gemeinsamen Knotenpunkt haben. Wenn in diesem Punkt eine Störung auftritt, ist das Straßenbahnnetz der Stadt geteilt und funktioniert dann nur wie zwei getrennte Netze. Ein solches Netz ist zwangsläufig unterentwickelt und funktioniert in der Praxis oft sehr schlecht.

Zusätzlich ist, wie in den meisten Großstädten, das Stadtzentrum sehr oft durch den motorisierten Individualverkehr (MIV) überlastet, was ebenfalls einen großen Einfluss auf die Geschwindigkeit und Zuverlässigkeit der Straßenbahnverbindungen hat.

Vorranglösungen für Straßenbahnen sind meist durch eine Separierung der Fahrbahn gesichert (die Länge des Straßenbahnnetzes in Krakau beträgt 80 km, davon sind 57 km separierte Straßenbahnspuren). Leider ist die Straßenbahnspur insbesondere im Stadtzentrum oft in sehr schmale Straßen „eingebaut“. Die häufigste Lösung in diesem Fall besteht darin, den Vorrang durch Fahrstreifenmarkierung zu sichern. Leider wird diese Fahrstreifenmarkierung durch undisziplinierte Autofahrer oft nicht beachtet, was zur Blockierung der Straßenbahn führt.

Auf der anderen Seite hat die Fahrstreifenmarkierung den Vorteil, dass sie es den Autofahrern ermöglicht, Fahrrädern oder auch defekten Fahrzeugen auszuweichen. Eine andere Methode, um den Vorrang der Straßenbahn zu sichern, ist die Abtrennung der Fahrspur durch Bordsteine. Eine solche separate Fahrspur für die Straßenbahn, abgetrennt durch Bordsteine, kann auch von Krankenwagen, Feuerwehr- oder Polizeifahrzeugen benutzt werden.

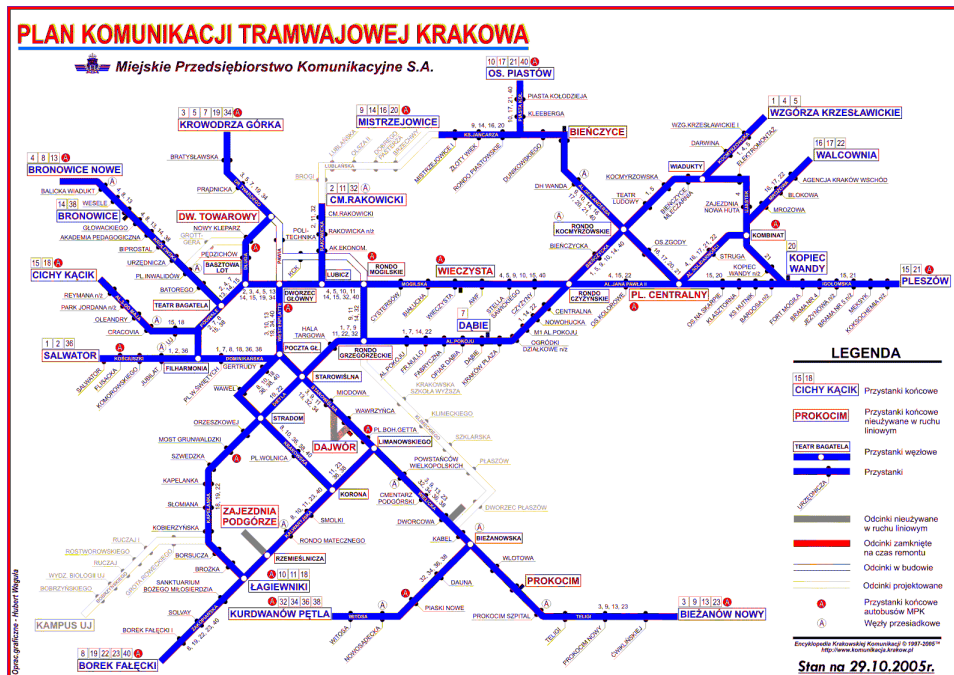


Abbildung 2: Existierendes Straßenbahnnetz in Krakau und geplanter Ausbau [7].

In den Zentren der polnischen Großstädte wird in den letzten Jahren die Funktionsfähigkeit der öffentlichen Verkehrssysteme konsequent erhöht. In den nächsten Jahren ist auch ein grundlegender Ausbau des Krakauer Straßenbahnnetzes und die Beseitigung der oben beschriebenen Problematik des Vorliegens zweier nahezu separater Netze geplant. Die entsprechenden zusätzlichen Strecken sind in Abbildung 2 als im Bau befindlich bzw. als projektiert gekennzeichnet.

### 3 ZUVERLÄSSIGKEIT DES VERKEHRSNETZES

Generell definiert man die Zuverlässigkeit eines Netzes als einen Grad der Stabilität der Systemqualität, die das System unter normalen Umständen bietet [1]. Zur genaueren Analyse ist die Definition relevanter Zuverlässigkeitskenngrößen erforderlich.

#### 3.1 Zuverlässigkeit ohne Berücksichtigung der Reisezeit

Das Verkehrsnetz wird als bewerteter Graph  $G=G(V,A)$  aufgefasst, wobei  $V$  die Knoten- und  $A$  die Kantenmenge bezeichnet. Jeder Kante  $k$  aus  $A$  wird eine Durchlasswahrscheinlichkeit  $p_k$  (also eine Wahrscheinlichkeit, mit der die entsprechende Kante „funktioniert“) zugeordnet.

Nun wird die paarweise Zusammenhangswahrscheinlichkeit  $P(u,v)$  zweier fixierter Knoten  $u$  und  $v$  untersucht.  $P(u,v)$  ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass mindestens ein funktions-

tüchtiger Weg zwischen  $u$  und  $v$  existiert. Ein Weg heißt dabei funktionstüchtig, wenn er nur aus verfügbaren (funktionstüchtigen) Kanten besteht. Es werden die Annahmen getroffen, dass

- alle Knoten absolut zuverlässig sind,
- alle Kanten sich entweder im Zustand "funktionstüchtig" oder "nicht funktionstüchtig" befinden, wobei die Zustände der Kanten voneinander stochastisch unabhängige binäre Zufallsgrößen sind.

Insbesondere die Unabhängigkeitsforderung stellt in vielen praktischen Situationen eine kritische Annahme dar. Die Berücksichtigung von Abhängigkeitsstrukturen wäre sicher wünschenswert, führt aber einerseits zu einem erheblich erhöhten numerischen Aufwand und ist andererseits auch wegen der problematischen statistischen Datenerhebung der entsprechenden Korrelationsstrukturen kaum praktikabel.

Eine Wahlmöglichkeit liegt in der Festlegung der Knoten  $u$  und  $v$ . Für theoretische Untersuchungen, beispielsweise an der Ring-Radius-Struktur, können verschiedene (oder auch alle möglichen) Varianten untersucht werden. Andererseits bestehen noch Freiheiten in der Festlegung der Wahrscheinlichkeit der Funktionstüchtigkeit der einzelnen Kanten. Hier ist es für theoretische Überlegungen sicher sinnvoll, alle Straßen einer Kategorie (zum Beispiel alle Außenringstraßen) mit der gleichen Bewertung zu versehen. Zur Unterscheidung der Zuverlässigkeiten zwischen verschiedenen Straßentypen kann etwa die Anzahl der verfügbaren Fahrspuren herangezogen werden.

Für praktische Aufgabenstellungen (wie etwa das Krakauer Straßenbahnnetz) sind gewisse Quell-Zielkombinationen auf Grund der tatsächlichen Situation prädestiniert und von besonderem Interesse. Die Zuverlässigkeiten der einzelnen Kanten sollten aus geeigneten statistischen Untersuchungen bezogen werden.

Zur Berechnung von  $P(u,v)$  werden in der Literatur verschiedene Möglichkeiten beschrieben, vgl. etwa [8]. Ist man insbesondere an einer exakten Berechnung von  $P(u,v)$  und nicht nur an einer Abschätzung interessiert, sind die entsprechenden Verfahren numerisch wie oben beschrieben im allgemeinen sehr aufwendig. Für die hier interessierenden Netzstrukturen ist insbesondere zu beachten, dass auf Grund der Komplexität eine äquivalente Darstellung der Struktur als Kombination von Reihen- und Parallelschaltungen schwer realisierbar und die Auswertung auf Grund der Abhängigkeit der einzelnen Schaltungselemente zudem aufwendig ist.

Sind  $w_1$  und  $w_2$  zwei Wege in  $G$  von  $u$  nach  $v$ , so ergibt sich die Durchlasswahrscheinlichkeit  $P(w_j)$  für jeden dieser Wege gemäß

$$P(w_j) = \prod_{k \in w_j} p_k .$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass  $w_1$  oder  $w_2$  durchlässig sind, ergibt sich zu

$$P(w_1 \cup w_2) = P(w_1) + P(w_2) - P(w_1 \cap w_2) .$$

Da nun aber  $w_1$  und  $w_2$  Kanten gemeinsam haben können, sind die zugehörigen Ereignisse im allgemeinen nicht stochastisch unabhängig, was die Berechnung von  $P(w_1 \cap w_2)$  erschwert. Daher ist es zweckmäßig, solche Kombinationen von „gewählten“ und „nicht gewählten“ Kanten zu finden, die paarweise unvereinbar sind. Die hier realisierte Möglichkeit

ist die Untersuchung der Durchlässigkeit *aller* Kombinationen der Möglichkeiten „gewählt“ und „nicht gewählt“ sämtlicher Kanten (vollständige Enumeration).

Dazu wird ein Branch-and-Bound-Verfahren verwendet, das darauf beruht, dass möglichst viele sich einander ausschließende Einzelereignisse, die jeweils zur Durchlässigkeit oder Nichtdurchlässigkeit zwischen  $u$  und  $v$  führen, zusammengefasst werden. Für eine prinzipielle Darstellung des Verfahrens sei auf [6] verwiesen.

Generell sollte bei der Zuverlässigkeitsberechnung eine Reihe von Transformationen des Graphen beachtet werden, die bei der Verwendung von exakten Algorithmen stets üblich sind [8]. So werden beispielsweise irrelevante Kanten („Sackgassen“) entfernt, das sind solche Kanten, die einen Endpunkt haben, der (nach Streichen der entsprechenden Kante) nicht mit dem Zielpunkt verbunden ist. Eine solche „Sackgassenentfernung“ wird einerseits der gesamten Analyse vorgeschaltet (siehe Abbildung 3), andererseits bei der Enumeration auch in jedem einzelnen Schritt durchgeführt.

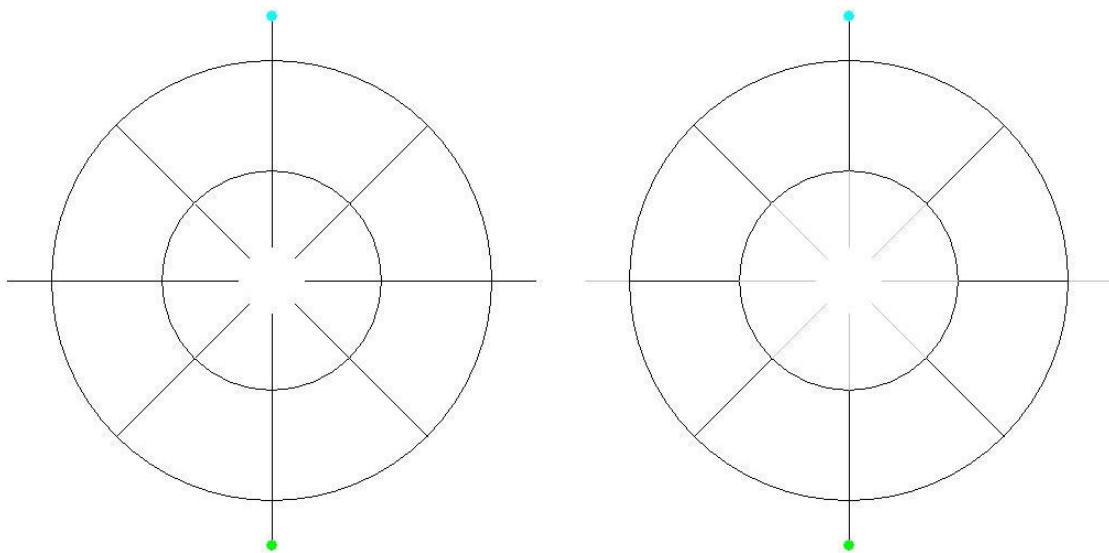


Abbildung 3: Unvollständige Ring-Radius-Struktur vor und nach der Entfernung von „Sackgassen“ (im rechten Teil grau gekennzeichnet).

Eine entsprechende Behandlung erfahren auch die obligatorischen Kanten, die sich in Abbildung 3 beispielsweise unmittelbar nach dem Start- bzw. vor dem Zielpunkt befinden und deren Durchlasswahrscheinlichkeit offenbar multiplikativ in die gesuchte Gesamtwahrscheinlichkeit  $P(u,v)$  eingeht. Schließlich werden noch „Reihenschaltungen“ von Kanten gesucht (in Abbildung 3 sind solche nicht vorhanden) und durch eine neue Kante ersetzt, deren Durchlasswahrscheinlichkeit dem Produkt der ursprünglichen Kantenverfügbarkeiten entspricht. Auch diese Prozedur wird sowohl vor Beginn des Algorithmus, als auch in jedem einzelnen Schritt der Enumeration durchgeführt, um das Verfahren numerisch möglichst effektiv zu gestalten.

### 3.2 Zuverlässigkeit mit Berücksichtigung der Reisezeit

Zusätzlich zu den Annahmen in Abschnitt 3.2 wird jeder Kante eine Durchfahrtszeit  $t_k$  zugeordnet. Wieder wird für zwei fixierte Knoten  $u$  und  $v$  eine paarweise Zusammenhangswahr-

scheinlichkeit  $P(u,v,t)$  bestimmt.  $P(u,v,t)$  ist nunmehr die Wahrscheinlichkeit dafür, dass zwischen  $u$  und  $v$  mindestens ein funktionstüchtiger Weg  $w$  existiert, der die Bedingung

$$\sum_{k \in w} t_k \leq t$$

erfüllt. Diese Zusatzbedingung macht den Zuverlässigkeitsbegriff offenbar realitätsnaher. Die Tatsache, dass irgendein durchlässiger Weg existiert, ist nicht von so großem Interesse wie die Tatsache, dass ein in verträglicher Zeit passierbarer Weg existiert. Ein Nachteil dieses Zuverlässigkeitsbegriffes besteht darin, dass implizit vorausgesetzt wird, dass in jeder konkret vorliegenden Situation volle Information darüber vorliegt, welche Kanten gerade verfügbar sind und welche nicht, der Nutzer des Systems also einen den Zeitrestriktionen genügenden Weg erkennen und befahren kann. Aus der Sicht der konkreten Anwendung auf ein Straßennetz ist diese Forderung nach Informationsverfügbarkeit sicherlich relativ unkritisch. Es muss allerdings technisch möglich sein, entsprechende Alternativrouten zu befahren.

Der hier gewählte Algorithmus zur Bestimmung von  $P(u,v,t)$  entspricht im wesentlichen dem in Abschnitt 3.1 betrachteten Vorgehen der Untersuchung der Durchlässigkeit aller Kombinationen der Möglichkeiten „gewählt“ und „nicht gewählt“ sämtlicher Kanten (vollständige Enumeration). Dabei wird eine fixierte Kombination von Kanten als „günstig“ gewertet, wenn sie neben der Tatsache, dass im entsprechenden Netz ein Weg von  $u$  nach  $v$  existiert, die Bedingung erfüllt, dass der kürzeste Weg von  $u$  nach  $v$  die Zeitrestriktion einhält. Dazu ist in jedem Enumerationsschritt ein Algorithmus zur Bestimmung des kürzesten Weges anzuwenden.

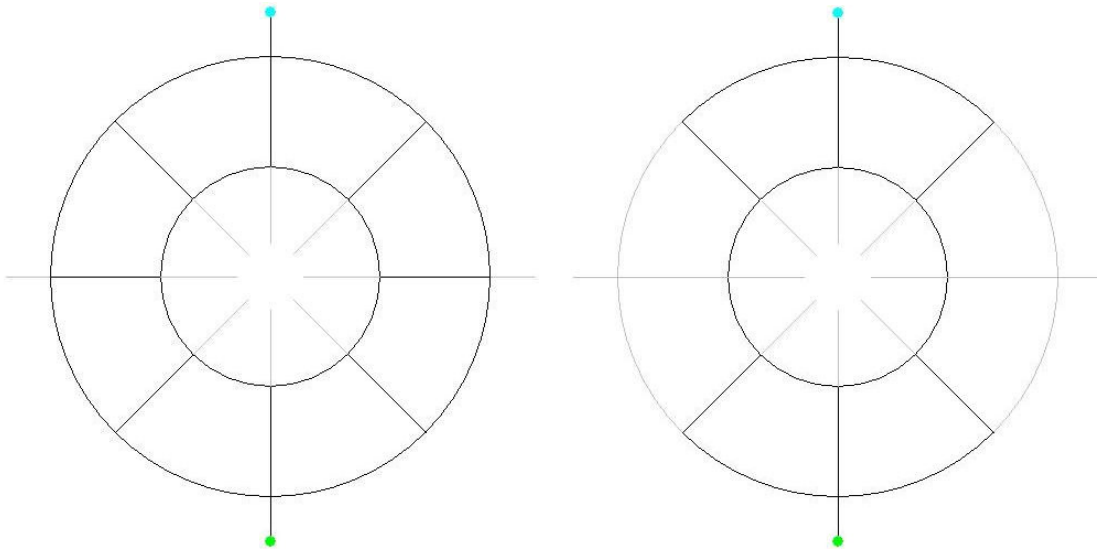


Abbildung 4: Beispiel für die Reduzierung eines Graphen im Hinblick auf die Zeitrestriktion; links das Netz aus Abbildung 3, die rechts zusätzlich grau eingefärbten Kanten liegen nicht auf Wegen, die der Zeitrestriktion genügen.

Selbstverständlich kommen auch hier vor Start des Algorithmus und während jedes Enumerationsschrittes oben beschriebene Vereinfachungsalgorithmen (streichen von „Sackgasen“, Berücksichtigung obligatorischer Kanten, Zusammenfassung von „Reihenschaltungen“) zum Einsatz. Zusätzlich werden vor dem Start des Algorithmus sämtliche Kanten entfernt, die mindestens einen Endknoten haben, von dem aus der kürzeste Weg zum Quell- oder Zielknoten größer als die vorgegebenen Zeitrestriktion ist. Solche Kanten liegen offenbar niemals auf



einem im obigen Sinne „günstigen“ Weg  $w$ , ihre Durchlasswahrscheinlichkeit hat keinen Einfluss auf die gesuchte Wahrscheinlichkeit  $P(u,v,t)$  und kann damit Null gesetzt werden (Abbildung 4).

## 4 NUMERISCHE ERGEBNISSE

### 4.1 Ring-Radius-Struktur

Zur Analyse der Zuverlässigkeit für das theoretische bedeutsame Beispiel der Ring-Radius-Struktur wurden die folgenden Parameter gewählt (vgl. auch [6], wo verschiedene Alternativen der Parameterwahl diskutiert werden).

- Die besten Durchlasswahrscheinlichkeiten haben Kanten, die außerhalb von Gebieten mit intensiver Bebauung liegen (wenig Straßenkreuzungen und kleinere Verkehrsbelastung) – hier wurde eine Zuverlässigkeit von 0,98 für jede Kante festgelegt. Die Reisezeit, die für die Durchquerung einer entsprechenden Strecke im Fall deren Funktionsfähigkeit benötigt wird, basiert hier auf einer verfügbaren Geschwindigkeit von 60 km/h. In Abbildung 5 wurden die entsprechenden Strecken rot markiert. Es handelt sich um die Strecken des äußeren Ringes sowie die äußeren Teile der Radialstraßen.
- Die kleinsten Durchlasswahrscheinlichkeiten haben die Kanten, die im Stadtzentrum liegen (große Verkehrsbelastung). Die Zuverlässigkeit jede Strecke wird mit 0,90 modelliert. Die Reisezeit im Fall des Funktionierens der Strecke wird mit Hilfe einer Geschwindigkeit von 20 km/h errechnet (blaue Markierung in Abbildung 5, es handelt sich um den Innenring sowie die Radialstraßen im Bereich des Stadtzentrums).
- Für die anderen Strecken (schwarze Markierungen in Abbildung 5) wurden Werte zwischen den obigen Parametern angenommen, nämlich eine Zuverlässigkeit von 0,95 und eine verfügbare Geschwindigkeit von 40 km/h.

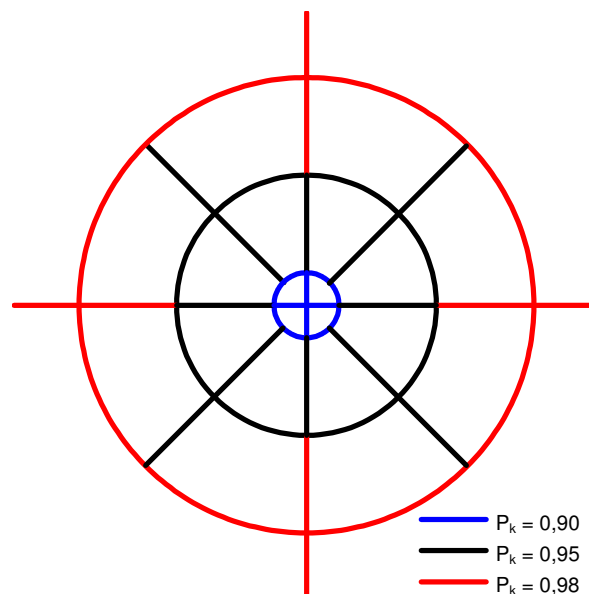


Abbildung 5: Für die weiteren Analysen angenommene Parameter der Ring-Radius-Struktur.

Für das so charakterisierte Straßennetz wurde exemplarisch der Einfluss einer Verkehrsberuhigung in Stadtzentrum analysiert. Eine solche Verkehrsberuhigung besteht in der Elimination des zentralen Punktes und damit einer Streichung sämtlicher Radialstraßen im Bereich innerhalb des inneren Ringes. Entsprechende numerische Ergebnisse werden in Tabelle 1 dargestellt. Es werden zwei konkrete Quell-Zielpunkt-Kombinationen betrachtet, nämlich zwischen der „nördlichen“ und „südlichen“ Einmündung sowie zwischen der „nördlichen“ und „westlichen“ Einmündung. Bei der Berechnung der Zuverlässigkeit wurde jeweils die in Klammern gezeigte Zeitvorgabe zu Grunde gelegt, die Situationen „mit“ und „ohne“ Verkehrsberuhigung sind jeweils vergleichbar, da die gleiche zulässige Zeit zur Zuverlässigkeitsberechnung verwendet wurde. Die Ergebnisse aus Tabelle 1 sind nur exemplarischer Gestalt, zahlreiche Analysen mit anderen Parametern wurden ebenfalls durchgeführt.

Beschreibung des Netzes	Kennziffer	zwischen „nördlicher“ und „südlicher“ Einmündung		zwischen „nördlicher“ und „westlicher“ Einmündung	
		ohne Verkehrsberuhigung	mit Verkehrsberuhigung	ohne Verkehrsberuhigung	mit Verkehrsberuhigung
Straßennetz mit allen drei Stadtringen	Min. Fahrzeit	12' 30	13' 00	7' 30	7' 30
	Zuverlässigkeit	0,9587 (14')	0,9546 (14')	0,9553 (10')	0,9553 (10')
Straßennetz nur mit innerem Stadtring	Min. Fahrzeit	12' 30	14' 26	11' 58	11' 58
	Zuverlässigkeit	0,8251 (16')	0,7340 (16')	0,6743 (12')	0,6743 (12')
Straßennetz ohne Außenring	Min. Fahrzeit	12' 30	14' 24	9' 42	9' 42
	Zuverlässigkeit	0,9214 (16')	0,9199 (16')	0,8324 (10')	0,8324 (10')
Straßennetz ohne inneren Stadtring	Min. Fahrzeit	12' 30	13' 00	7' 30	7' 30
	Zuverlässigkeit	0,9587 (14')	0,9546 (14')	0,9553 (10')	0,9553 (10')

Tabelle 1: Einfluss einer Verkehrsberuhigung im Zentrum auf die Zuverlässigkeit im Durchgangsverkehr für verschiedene Varianten des Ring-Radius-Netzes.

Auf Grund der durchgeführten Analysen kann man beispielsweise folgende Schlussfolgerungen formulieren, für eine ausführlichere Darstellung sei etwa auf [9] verwiesen.

- Eine Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum (Sperrung aller Strecken, die mit dem zentralen Punkt verbunden sind) hat bei besser ausgebauten Straßennetzen fast keinen negativen Einfluss auf die Zuverlässigkeit.
- Eine Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum hat bei Straßennetzen, die nur über einen Innenring verfügen und somit praktisch Radialnetze sind, einen größeren Einfluss auf die Zuverlässigkeit.

- Bei Verbindungen zwischen der „nördlichen“ und „westlichen“ Einmündung ändern sich bei einer Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum beide Parameter nicht. Das liegt daran, dass die Zeitrestriktion das Befahren von Strecken in der Innenstadt auch in der nicht verkehrsberuhigten Situation im Hinblick auf die Zuverlässigkeitsberechnung im wesentlichen ausschließt.
- Wenn des Straßennetz über einen Außenring verfügt, ändern sich bei einer Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum beide Parameter der Verbindungen zwischen „nördlicher“ und „südlicher“ Einmündung, jedoch nur unmerklich.
- Wenn das Straßennetz keinen Außenring hat, verlängert sich bei einer Verkehrsberuhigung im Stadtzentrum die Fahrzeit zwischen „nördlicher“ und „südlicher“ Einmündung um ca. 2 Minuten (15 %). Die Zuverlässigkeit dieser Verbindung ändert sich nur unmerklich (außer wenn nur ein inneren Ring vorhanden ist).

## 4.2 Straßenbahnnetz in Krakau

Abbildung 6 zeigt die Implementierung des Krakauer Straßenbahnnetzes (vgl. auch Abbildung 2). Mit grüne Farbe wurden die geplanten bzw. im Bau befindlichen Strecken markiert.

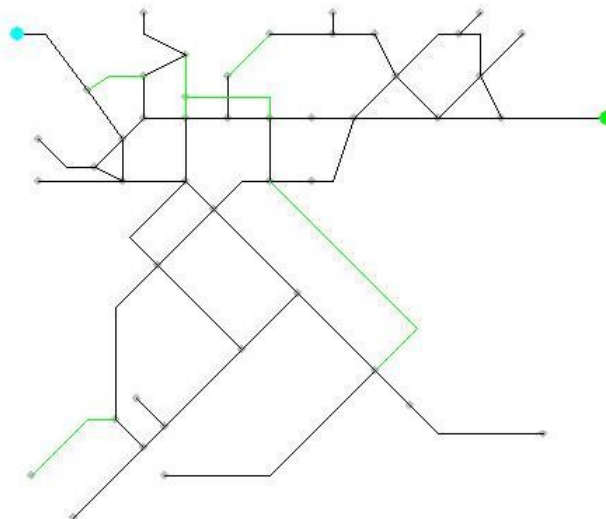


Abbildung 6: Graph des Straßenbahnnetzes in Krakau.

Auf Grund von durchgeführten ganztägigen Messungen wurden für jede Strecke Kennzahlen für Fahrzeit und Zuverlässigkeit bestimmt. Die Analysen zur Zuverlässigkeit betreffen die Spitzenstunden, wenn die größten Störungen der Straßenbahn durch andere Fahrzeuge erfolgen. In Krakau treten erfahrungsgemäß die größten Verkehrsprobleme zwischen 15.00 und 17.00 Uhr auf, da in dieser Zeitperiode die Rückkehr von der Arbeit nach Hause stattfindet.

Die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit einer Kante ist in der Praxis schwierig. Da die folgenden Analysen hauptsächlich vergleichenden Charakter haben sollen und in das Modell ohnehin kritische Annahmen wie die Unabhängigkeit der einzelnen Kantenverfügbarkeiten eingehen, wurde folgende Vereinbarung zur Bestimmung der Kantenverfügbarkeiten getroffen. Man schätzt auf Grund statistischer Daten jeweils die Wahrscheinlichkeit, dass die Fahrzeit während der Spitzenstunden kürzer ist als die Summe aus mittlerer Fahrzeit und dreifacher Standardabweichung der Fahrzeit ohne Einfluss des Autoverkehrs. Letztere Größen wurden auf Grund von Beobachtungen am frühen Morgen (bis 7 Uhr) und späten Abend

(nach 20 Uhr) ermittelt. Die so berechnete Wahrscheinlichkeit wird als Durchlasswahrscheinlichkeit der jeweiligen Kante verwendet. Dieses Vorgehen erfordert zwar eine umfangreiche statistische Datenerhebung, hat sich in der Praxis aber bewährt.

Abbildung 7 zeigt die Charakteristiken der einzelnen Strecken des existierenden Straßenbahnnetzes in Krakau. Angegeben sind Durchlasswahrscheinlichkeit (auf linke Spalte) und Fahrzeit (rechte Spalte).

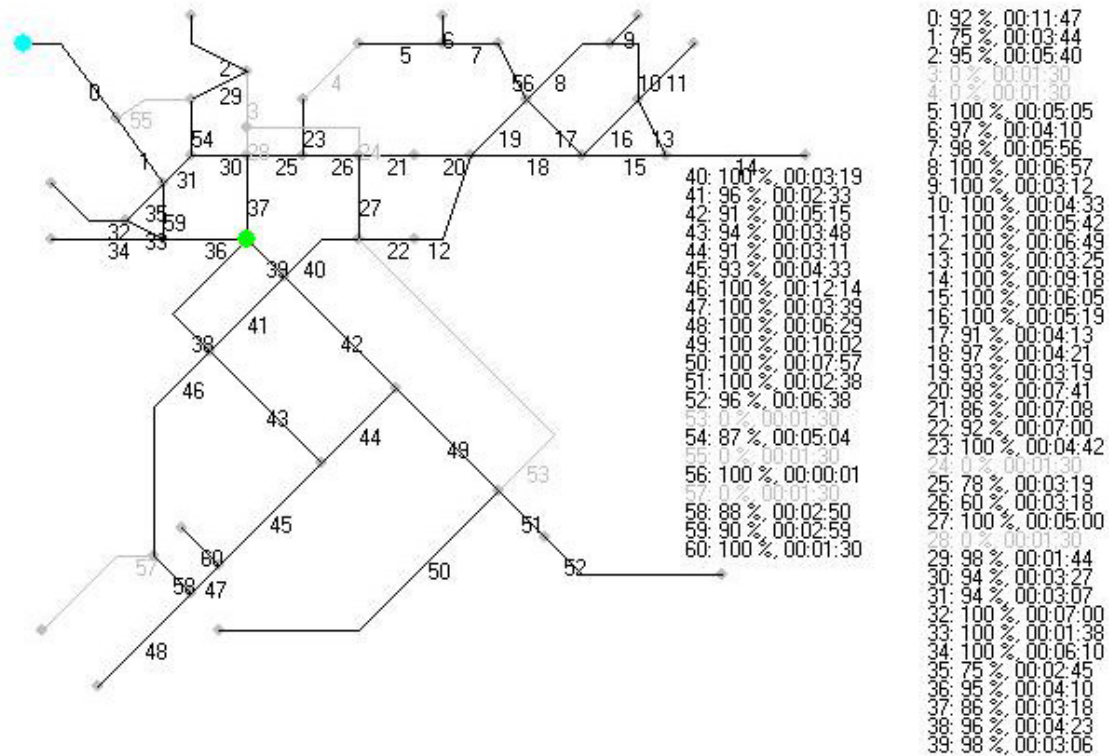


Abbildung 7: Modell des existierenden Straßenbahnnetzes in Krakau und Parameter der einzelnen Strecken.

Oben besprochene Messungen konnten leider nicht auf allen Strecken durchgeführt werden. Das betrifft insbesondere Strecken, die außerhalb des Stadtzentrums liegen und solche Strecken, auf denen die Straßenbahn vom Einfluß des Autoverkehrs geschützt sind. Für solche Strecken wird (näherungsweise) eine Zuverlässigkeit von 100 % unterstellt.

Um die Fahrzeit für diese Strecken zu schätzen, wurde auf Grund statistischer Untersuchungen folgendes Modell der Abhängigkeit der Fahrzeit ( $t$ ) von der Länge der Strecke ( $L$ ) und der Anzahl der Haltestellen ( $H$ ) erarbeitet:

$$t = 0,878 + 0,00158 \cdot L + 0,515 \cdot H$$

Dieses Modell wurde auch bei der Prognose der Fahrzeit für Strecken, die umgebaut werden oder geplant sind, verwendet. Abbildung 8 stellt diese modellierte Abhängigkeit im Vergleich zu gemessenen Fahrzeiten dar.

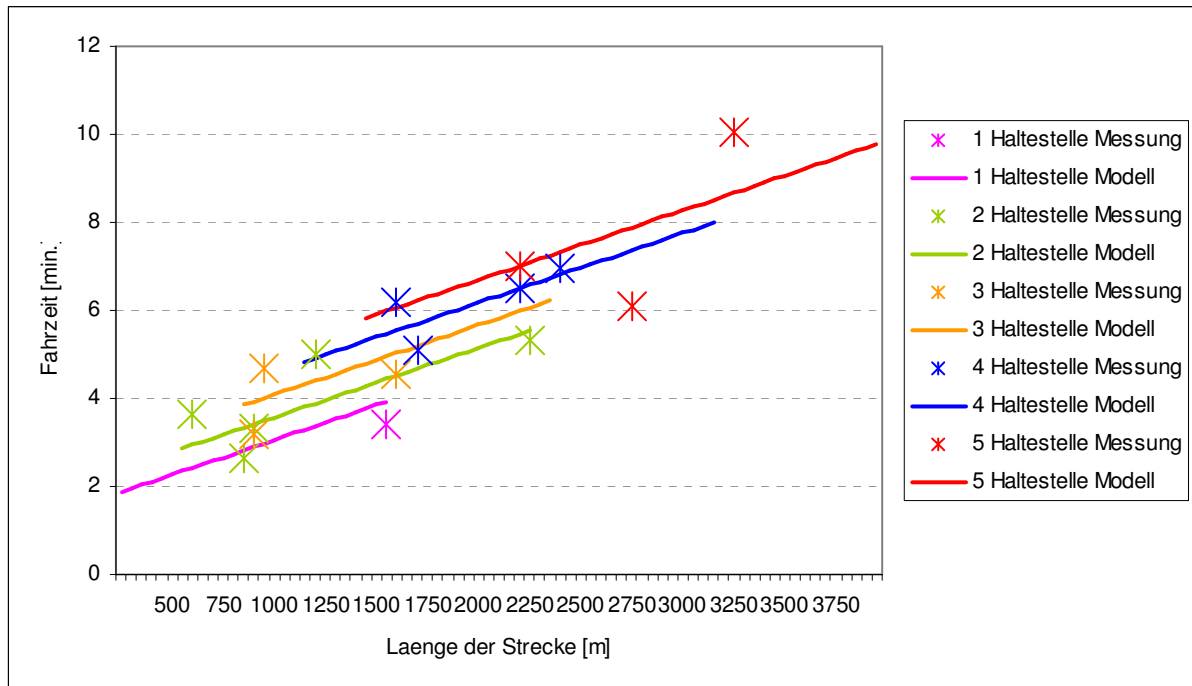


Abbildung 8: Abhängigkeit der Fahrzeit auf Straßenbahnstrecken mit volle Separierung vom Autoverkehr von der Länge der Strecke und Anzahl der Haltestellen.

Zur Analyse wurden nun 7 Straßenbahnlinien gewählt, die in Tabelle 2 charakterisiert werden. Geht man davon aus, dass die Straßenbahnen an ihre Strecken gebunden sind und bei Blockierung einer Strecke ein Ausweichen auf andere Strecken nicht möglich ist, dann ergibt sich die Zuverlässigkeit der Linie offenbar als Produkt der Zuverlässigkeiten der an der Linienführung beteiligten Kanten. Die Fahrzeit ergibt sich dementsprechend als Summe der Einzelfahrzeiten. Tabelle 2 zeigt für die 7 ausgewählten Linien entsprechende Fahrzeiten und Zuverlässigkeiten. Es wird also ein Subnetz betrachtet, in dem jeweils nur die zur entsprechenden Linie gehörenden Kanten potentiell verfügbar sind.

Nummer der Linie	Knotenpunkte	Nummer der Strecken	Fahrzeit	Zuverlässigkeit
2	Salwator – Teatr Bagatela – Dworzec Główny – Rakowice	34 – 59 – 31 – 30 – 25 – 23	23' 44"	0,6203
5	Krowodrza Górka – Dworzec Główny – Rondo Mogilskie – Rondo Czyżyńskie – Rondo Kocmyr-zowskie – Wzgórza Krzesławickie	2 – 29 – 54 – 30 – 25 – 26 – 21 – 20 – 19 – 8 – 9	50' 49"	0,2793
7	Krowodrza Górka – Teatr Bagatela – Poczta Główna – Starowiślna – Rondo Grzegorzeckie – Dąbie	2 – 29 – 54 – 31 – 59 – 36 – 39 – 40 – 22	36' 09"	0,5869
10	Piastów – Rondo Czyżyńskie – Rondo Mogilskie – Dworzec Główny – Poczta Główna – Stradom – Korona – Łagiewniki	6 – 7 – 56 – 19 – 20 – 21 – 26 – 25 – 37 – 38 – 43 – 45 – 47	54' 33"	0,2517

15	Cichy Kącik – Teatr Bagatela - Dworzec Główny – Rondo Mogilskie – Rondo Czyżyńskie – Plac Centralny – Kopiec Wandy - Pleszów	32 – 35 – 31 – 30 – 25 -26 – 21 -20 – 18 – 15 – 14	57' 29"	0,2535
32	Kurdwanów – Limanowskiego – Starowiślna – Rondo Grzegórzeckie – Rondo Mogilskie - Libicz - Rakowice	50 – 49 – 42 – 40 – 37 – 26 – 36	39' 33"	0,5460
34	Kurdwanów – Limanowskiego – Starowiślna – Poczta Główna – Dworzec Główny – Krowodrza Górka	50 – 49 – 42 – 39 – 37 – 30 – 54 – 29 – 2	45' 33"	0,5839

Tabelle 2: Charakteristik der analysierten Straßenbahnlinien.

Der in den obigen Abschnitten diskutierte Zuverlässigkeitsbegriff gewinnt natürlich an Sinn, wenn es im Falle einer Blockierung einer Strecke möglich ist, die Bahn entsprechend umzuleiten. Die Zuverlässigkeit wird sich dadurch im Allgemeinen erhöhen. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Werte angegeben. Es ist zu beachten, dass als Zeitvorgabe die gleichen Werte wie im Fall eines „normalen“ Linienbetriebs gewählt wurden, was dem intuitiven Zuverlässigkeitsbegriff entspricht. Durch die Möglichkeit, auf andere Strecken auszuweichen, kann die Gesamtstrecke aber unter Umständen in einer kürzeren Zeit zurückgelegt werden. Für die Berechnung der Kennzahlen in Tabelle 3 wurde davon ausgegangen, dass alle Strecken als Ausweichstrecken in Frage kommen. Die angegebene Zuverlässigkeit ist jetzt die Wahrscheinlichkeit dafür, dass im Graph ein Weg existiert, der innerhalb der Zeitrestriktion zu bewältigen ist. Um die Situation realistischer abzubilden, ist es problemlos möglich, technisch nicht realisierbare Strecken durch Streichung aus dem Netz nicht zu berücksichtigen. Des Weiteren sei nochmals darauf hingewiesen, dass die Annahme der Unabhängigkeit der Kantenverfügbarkeiten durchaus kritisch zu werten ist. Durch Blockierung gewisser Strecken kommt es in der Praxis zu einer erhöhten Gefahr des Versagens von Ausweichrouten. Diese Aspekte sollten der Gegenstand weiterführender Überlegungen sein.

Nummer der Linie	2	5	7	10	15	32	34
Zeitrestriktion	23' 44"	50' 49"	36' 09"	54' 33"	57' 29"	39' 33"	45' 33"
Zuverlässigkeit	0,7508	0,2793	0,7182	0,9169	0,9091	0,7852	0,5839

Tabelle 3: Zuverlässigkeit bei Zulassung von Ausweichrouten.

In Krakau ist ein umfassender Ausbau des Straßenbahnnetzes geplant. Es ist nicht nur vorgesehen, neue Strecken zu bauen, sondern auch jetzt überlastete Strecken zu modernisieren. Die in einem „ersten Schritt“ vorgesehenen Investitionen und ihre Parameter sind in Abbildung 9 zu sehen.

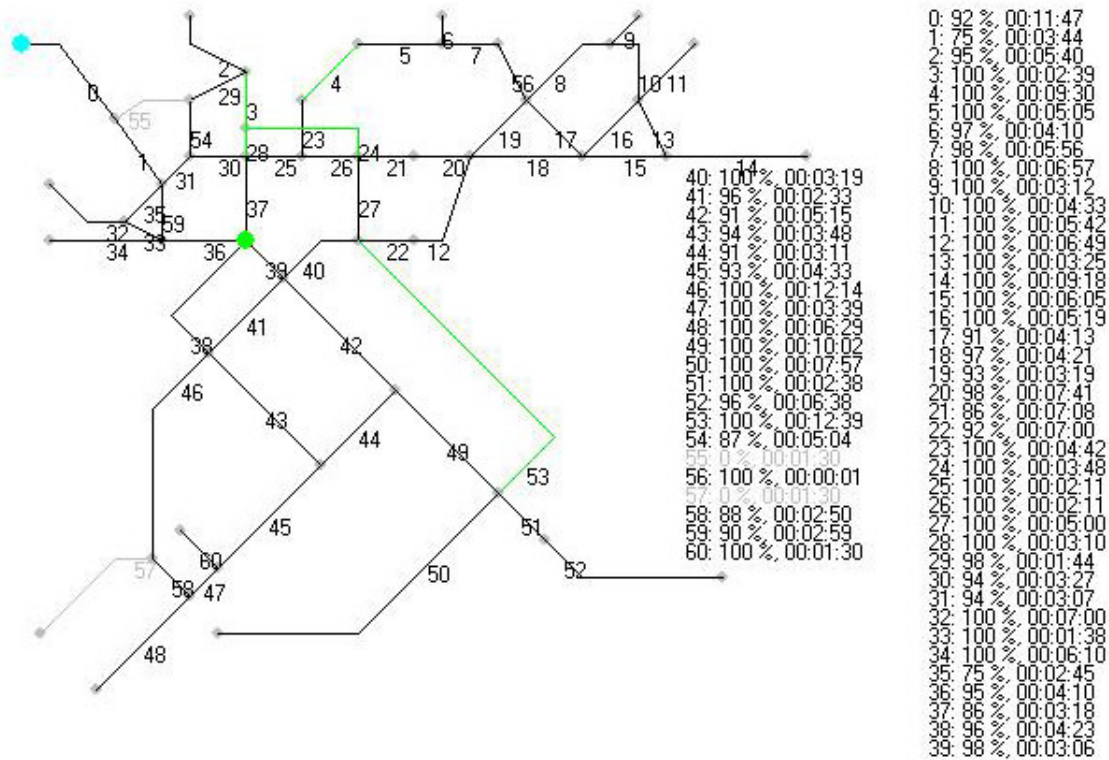


Abbildung 9: Modell des ausgebauten Straßenbahnnetz in Krakau (Investitionen im "Ersten Schritt") und Parameter der einzelnen Strecken.

Exemplarisch sollen die Auswirkungen einzelner Baumaßnahmen auf die Zuverlässigkeit untersucht werden. Im Herbst 2006 die Lubiczstraße (Strecken Nummer 25 und 26) umgebaut. Es wird eine gemeinsame Spur für Busse und Straßenbahn geschaffen, die eine vollständige Abtrennung des ÖPNV vom Autoverkehr sichert. Mit Hilfe des oben vorgestellten Modells kann man schätzen, dass diese Investition die Fahrzeit vom 6' 37" auf 4' 22" (um ca. 1/3) verkürzt und die Zuverlässigkeit von 47% auf nahezu 100% vergrößert.

Nummer der Linie	2	5	10	15	32
Fahrzeit vor Ausbau	23' 44"	50' 49"	54' 33"	57' 29"	39' 33"
Fahrzeit nach Ausbau	22' 36"	48' 34"	52' 18"	55' 14"	38' 26"
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) vor Ausbau	0,6203	0,2793	0,2517	0,2535	0,5460
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) nach Ausbau	0,7952	0,5968	0,5378	0,5418	0,9100
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) vor Ausbau	0,7508	0,2793	0,9169	0,9091	0,7852
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) nach Ausbau	0,9625	0,5968	0,9002	0,9307	0,9100

Tabelle 4: Zuverlässigkeit vor und nach Ausbau der Lubiczstraße.

Tabelle 4 zeigt, dass sich durch die geplante Baumaßnahme zwar die Fahrzeit für die betrachteten Straßenbahnlinien nicht bedeutend reduzieren wird, sich die Zuverlässigkeit aber deutlich erhöht. Das gilt für beide betrachteten Fälle der Zulässigkeit oder Nichtzulässigkeit von Ausweichrouten. Als Zeitrestriktion wurde jeweils wieder die Fahrzeit der Linie unter normalen Bedingungen verwendet. In Tabelle 4 ist der Effekt zu erkennen, dass die Zuverlässigkeit nach dem Ausbau bei Zulässigkeit von Ausweichrouten schlechter als vor dem Ausbau sein kann (Linie 10). Das liegt daran, dass die Zuverlässigkeit jeweils unter Beachtung der Zeitrestriktion des direkten Weges der Linie berechnet wird, diese Zeit sinkt nach dem Ausbau und es stehen dementsprechend möglicherweise weniger Ausweichrouten zur Verfügung, die die Zeitrestriktion einhalten. Bei Verwendung der gleichen Zeitrestriktion wie vor dem Ausbau würde die Zuverlässigkeit natürlich nicht sinken. Auf entsprechende Darstellungen soll aber aus Gründen der Übersichtlichkeit an dieser Stelle verzichtet werden.

Im Frühling 2007 wird die Pawiastraße (Strecken Nummer 28 und 3) gebaut. Das ermöglicht für Linien, die vom Knotenpunkt „Dworzec Główny“ nach „Krowodrza Górka“ fahren, eine Reduzierung der Fahrzeit vom 9' 15" auf 5' 49" und eine Verbesserung der Zuverlässigkeit auf näherungsweise 1,0000 (die Straßenbahnspur wird voll vom Autoverkehr separiert). Für die Straßenbahnlinie 5 wird die Fahrzeit auf 44' 08" reduziert und die Zuverlässigkeit auf 0,7446 erhöht. Da alle möglichen Ausweichrouten eine längere Fahrzeit aufweisen, erhöht sich die Zuverlässigkeit beim Zulassen von Ausweichrouten (und Beibehaltung der Zeitrestriktion 44' 08") nicht weiter. Für die Straßenbahnlinie 34 wird die Fahrzeit auf 41' 07" reduziert und die Zuverlässigkeit auf 0,7286 (bzw. 0,8012 bei der Möglichkeit von Ausweichrouten) erhöht.

Im Jahre 2008 ist es geplant, den Tunnel vom Rondo Mogilskie bis zur Pawiastraße fertig zu stellen (Strecke Nummer 24). Durch diesen Tunnel kann dann die Straßenbahnlinie 5 fahren und die Fahrzeit für die ganze Linie wird auf 40' 24" verkürzt. Im Vergleich zum jetzigen Stand wird die Fahrzeit für diese Straßenbahnlinie damit um 10' 25" (das entspricht 21 %) reduziert.

Im Rahmen EU-Programm „Civitas-Caravel“ plant man, eine separierte Bus- und Straßenbahnspur in den Straßen Basztowa (30) – Dunajewski (31) – Podwale (33, 35, 59) einzuführen. In einer ersten Etappe soll diese Maßnahme in der Basztowastraße (30) verwirklicht werden.

Nummer der Linie	2	15
Fahrzeit vor Ausbau	22' 36"	55' 14"
Fahrzeit nach Ausbau	21' 18"	53' 56"
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) vor Ausbau	0,7952	0,5418
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) nach Ausbau	0,8460	0,5763
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) vor Ausbau	0,9625	0,9307
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) nach Ausbau	0,9718	0,9135

Tabelle 5: Zuverlässigkeit vor und nach Bau der separierten Bus- und Straßenbahnspur in der Basztowastraße im Rahmen des „Civitas-Caravel“-Programms.



Das führt voraussichtlich für diese Strecke zu einer Reduzierung der mittleren Fahrzeit von 3' 27" auf 2' 09" und zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit von 94 % auf nahezu 100 %. Für die Straßenbahnlinien, die durch diese Straße fahren, ändert sich die Fahrzeit und die Zuverlässigkeit allerdings nicht bedeutend, vgl. Tabelle 5 (ausgegangen wird hier vom voraussichtlichen Ausbaustand im Herbst 2006, also nach dem oben beschriebenen Ausbau der Lubiczstraße).

In der zweiten Etappe soll die separierte Bus- und Straßenbahnspur an der Dunajewski-straße (31) eingeführt werden. Das führt für diese Strecke zu einer Reduzierung der Fahrzeit von 3' 07" auf 2' 18" und einer Verbesserung der Zuverlässigkeit vom 94 % auf nahezu 100 %. Für Straßenbahnlinien, die durch diese Straße fahren, ändert sich die Fahrzeit und die Zuverlässigkeit nicht bedeutend, wie aus Tabelle 6 erkennbar ist. In Tabelle 6 sind ebenfalls die Ergebnisse zur dritten Etappe des geplanten Ausbaus dargestellt, wo die separierte Bus- und Straßenbahnspur in der Podwalestraße (33, 35, 59) eingeführt wird. Dies führt für diese Strecke zu einer Reduzierung der Fahrzeit von 2' 59" auf 2' 18" und zu einer Verbesserung der Zuverlässigkeit vom 90 % auf wiederum nahezu 100 %.

Nummer der Linie	2	7	15
Fahrzeit nach Ausbau (2. Etappe)	20' 29"	35' 20"	53' 07"
Fahrzeit nach Ausbau (3. Etappe)	19' 48"	34' 39"	52' 26"
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) nach Ausbau (2. Etappe)	0,9000	0,6244	0,6131
Zuverlässigkeit (ohne Ausweichrouten) nach Ausbau (3. Etappe)	1,0000	0,6938	0,8175
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) vor Ausbau (2. Etappe)	0,9000	0,8740	0,9188
Zuverlässigkeit (mit Ausweichrouten) nach Ausbau (3. Etappe)	1,0000	0,9381	0,8175

Tabelle 6: Zuverlässigkeit vor und nach Bau der separierten Bus- und Straßenbahnspur in der zweiten und dritten Etappe im Rahmen des „Civitas-Caravel“-Programms.

Eine sehr wichtige geplante Investition beim Ausbau des Krakauer Straßenbahnnetzes ist der Bau der Strecke zwischen „Rakowice“ und „Mistrzejowice“ (Strecke Nummer 4). Dies wird nicht nur eine direkte Verbindung zwischen diesen zwei Wohnsiedlungen herstellen, sondern auch eine alternative Verbindung zwischen dem Stadtzentrum und dem ganzen östlichen Teil von Krakau sein. Zur Zeit haben die Straßenbahnnetze in diesen beiden Stadtteilen nur einen gemeinsamen Knotenpunkt („Rondo Czyżyńskie“) und bei irgendwelchen Störungen in diesem Punkt sind beide Netze getrennt. Die Inbetriebsetzung dieser Strecke ermöglicht eine Änderung der Trasse der Straßenbahnlinie 10. Diese kann dann durch die Strecken Nummer 6 – 5 – 4 – 23 – 25 – 37 – 38 – 43 – 45 – 47 fahren. Aus diesem Grund wird sich die Fahrzeit auf 45' 19" (um über 9 Minuten) verkürzen und die Zuverlässigkeit (ohne Berücksichtigung von Ausweichrouten) auf 0,7001 erhöhen.

Bis zum Jahr 2013 ist der Bau einer Straßenbahnstrecke geplant, die für die südlichen Wohnsiedlungen „Kurdwanów“, „Prokocim“ und „Bieżanów“ eine neue Verbindung mit dem

Stadtzentrum sichert (Strecke Nummer 53). Heute verursacht eine Störung in der Wielickastraße, dass diese große Wohnsiedlungen keine Straßenbahnverbindungen mit den anderen Stadtteilen haben. Bei Änderung der Trasse der Straßenbahnlinie 32 (durch die Strecken 50 – 53 – 27 – 26 – 23) wird sich die Fahrzeit auf 32' 29" (um über 7 Minuten im Vergleich zur heutigen Situation) verkürzen und eine volle Zuverlässigkeit gesichert werden. Im Fall der Linie 34, die durch Strecken Nummer 50 – 53 – 27 – 24 – 3 – 2 fahren werden kann, wird die Fahrzeit auf 37' 43" (um fast 8 Minuten im Vergleich zur heutigen Situation) verkürzt und Zuverlässigkeit auf 0,9500 erhöht.

## 5 FAZIT

Die durchgeführten Analysen lassen folgende Schlussbemerkungen zu.

Die entwickelten Zuverlässigkeitskennzahlen und das Modell zur Berechnung der voraussichtlichen mittleren Reisezeit für modernisierte Strecken erlauben Prognosen über den Qualitätsgewinn durch geplante Ausbaumaßnahmen. Die in Krakau in den nächsten Jahren geplanten Modernisierungsvorhaben der Straßenbahnstrecken durch eine Separierung der Straßenbahnschienen führen vor allem zur Verbesserung der Zuverlässigkeit im Sinne der Wahrscheinlichkeit der Zielerreichung innerhalb einer vorgegebenen Reisezeit.

Die Reduzierung der Fahrzeit wird zwar für die jeweils modernisierten einzelnen Strecken bedeutend sein, für die ganze Straßenbahnlinie ist der Reduzierungseffekt dagegen nicht so deutlich. Eine bedeutende Verkürzung der Fahrzeit erreicht man dagegen durch den Bau neuer Strecken. Hier ist darauf zu achten, dass diese Strecken eine volle Abtrennung vom Autoverkehr sichern, um eine Durchlasswahrscheinlichkeit für die Straßenbahn von nahezu 100 % sicherzustellen.



This paper is involved with **CIVITAS – CARAVEL** project:  
„Clean and better transport in cities”  
The project has received research funding from  
the **Community’s Sixth Framework Programme**.  
The paper reflects only the author’s views and the Community is  
not liable for any use that may be made of the information  
contained therein.

## LITERATUR

- [1] M. G. H. Bell, Y. Iida, *Transportation Network Analysis*. Wiley, Chichester, 1997.
- [2] H. Wakabayashi, Y. Iida, Upper and lower bounds of terminal reliability of road networks: an efficient method with Boolean algebra. *Journal of Natural Disaster Science*, **14**, 29-44, 1992.
- [3] A. Sumalee, D. Watling, Travel time reliability in a network with dependent link modes and partial driver response. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, **5**, 1686-1701, 2003.

- [4] L. G. Valiant, The complexity of enumeration and reliability problems. *SIAM J. Comput.*, **8**, 410-412, 1979.
- [5] M. Dudek, A. Rudnicki und L. Hempel, Zum Zusammenhang zwischen strukturellen und funktionellen Parametern eines Verkehrsnetzes. *Proceedings of the International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering*, Weimar, 2000, published on CD-ROM.
- [6] M. Dudek, M. Richter, Zuverlässigkeit und strukturelle Parameter von Verkehrsnetzen, K. Gürlebeck et al., eds., *Proceedings of the 16th International Conference on the Application of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering*, Weimar, 2003, published on CD-ROM.
- [7] Encyklopedia Krakowskiej Komunikacji, [www.komunikacja.krakow.pl](http://www.komunikacja.krakow.pl), Stand 29.10.2005.
- [8] M. O. Ball, C. J. Colbourn, J. S. Provan, Network Reliability. M. O. Ball et al., eds. *Network Models*. Handbooks in operations Research and Management Science, Vol. 7, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- [9] M. Dudek, Analiza niezawodności sieci ulicznej z punktu widzenia ruchu tranzytowego (Analysis of Street Network Reliability from Transit Point of View), *Drognictwo*, **12**, 383-394, 2005.