

# Zum Zusammenhang zwischen strukturellen und funktionellen Parametern eines Verkehrsnetzes

M. Dudek, TU Kraków / A. Rudnicki, TU Kraków  
L. Hempel, Bauhaus-Universität Weimar

## Zusammenfassung

Im Vortrag wird der Frage nachgegangen, inwieweit zwischen den strukturellen Parametern Dispersion eines Verkehrsnetzes bzw. der Kennziffer der Untereentwicklung eines Verkehrsnetzes und den mittleren Fahrzeiten bzgl. unterschiedlicher Verkehrsbedarfsmatrizen ein Zusammenhang besteht. An Hand von 10 verschiedenen Ring-Radius-Strukturen für den MIV (Motorisierter Individual-Verkehr) und 3 verschiedenen Ring-Radius-Strukturen für den Busverkehr wird bei 5 unterschiedlichen O-D-Bedarfsmatrizen der Nachweis eines solchen Zusammenhanges geführt. Die Ergebnisse erlauben es, auf Grund struktureller Analysen Aussagen über funktionelle Bewertungen des Verkehrsnetzes zu treffen. Da strukturelle Bewertungen mit wesentlich geringerem Aufwand an Input-Daten und an Rechenzeit als funktionelle Bewertungen bestimmbar sind, bringt dies deutliche Einsparungen in der Planungsphase von Verkehrsnetzen mit sich.

## Definition der 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  $\mathbf{R}$  von Ringen  $R_1, R_2, \dots, R_s$ , das sind paarweise knotendisjunkte Zyklen, und eine Menge  $\mathbf{M}$  von radialen Verbindungen, die alle einen Knoten  $i_0$ , das Zentrum, gemeinsam haben und je zwei haben außer diesem Zentrum keinen Knoten gemeinsam. Außerdem ist jeder Ring zu jeder radialen Verbindung kantendisjunkt.

Solche Ring-Radius-Strukturen kommen in vielen Städten, auch in mittelgroßen, vor. Sie sind z.B. geeignet, um die Einführung der Verkehrsberuhigung in Stadtzentrum zu untersuchen. Die Verminderung des Fahrzeugsverkehrs in der Innenstadt ist notwendig, um ihre Funktion als kulturelles Zentrum vor Abbau zu schützen.

Die Parameter des Ring-Radius-Straßennetzes (Länge der radialen Verbindungen, Durchmesser der Ringe) wurden nach Analyse der realen Straßennetze von sieben polnischen mittelgroßen Städten berechnet. Das vollständige Modell, das die Basis für die weitere Analyse ist, besteht aus:

- zwei Ringen mit den Durchmessern von 1 und 7 km,
- vier radialen Straßenzügen, die das Stadtzentrum mit den Einfahrten in die Stadt verbinden (jeder mit der Länge von 4,5 km),
- vier komplementären radialen Straßenzügen, die das Stadtzentrum mit dem Stadtrand verbinden (jeder mit der Länge von 3 km),
- ein paar Straßen, die einen „gebrochenen Ring“ mit dem Durchmesser von 4 km bilden, der zwischen den beiden anderen Ringen liegt. Sie bilden einen Zyklus, der mit den beiden anderen Ringen knotendisjunkt ist, aber mit den radialen Verbindungen gemeinsame Kanten hat. Dieser Ring ist in dem Sinne gebrochen, daß an mindestens einer Kreuzung mit einem radialen Straßenzug nicht die Möglichkeit der direkten Durchfahrt besteht, sondern auf diesen radialen Straßenzug eingebogen werden muß und dieser erst zu einem spätem Zeitpunkt wieder verlassen werden kann.

Das beschriebene Straßennetz (S3S) war ein Ausgangspunkt für weitere Umgestaltungen. Im ersten Schritt der Verkehrsberuhigung wurde die Durchfahrt durch den zentralen Punkt (S3U) gesperrt. Dann wurde auch der Verkehr im inneren Ring verboten (S2S), aber der gebrochene Ring wurde modernisiert und dabei zu einem vollständigen Ring umgestaltet (S2M). Es wurden auch die Straßennetze mit und ohne Verkehrsberuhigung im Zentralpunkt ohne Außenring (S4S, S4U), nur mit Innerering (S1S, S1U) und mit allen drei Ringen, aber ohne komplementäre Radial-Straßen analysiert (S5S, S5U).

Alle Varianten der Straßennetze sind im Bild 1 dargestellt.

## Datenbasis

Die zu analysierende Stadt wurde in 33 Verkehrsbezirke eingeteilt. Der erste Verkehrsbezirk befandete sich innerhalb des inneren Ringes und alle anderen sind in vier Ringen angeordnet, jeder in 8 Teile geteilt. Jeder Verkehrsbezirk wurde durch vier Variablen charakterisiert: Anzahl der Einwohnern, Anzahl der Arbeitsplätze, sowohl in alle

Sektoren als auch nur in den Behörden, und Anzahl der Schüler in höheren Schulen. Die Simulationsberechnungen wurden für 5 verschiedenen Varianten der Bebauung durchgeführt:

Variante P1 – die Intensitäten der einzelnen Arten der Bebauung für Verkehrsbezirke mit derselben Entfernung zur Stadtmitte unterscheiden sich unwesentlich;

Variante P2 – unterscheidet sich von Variante P1 durch größere Konzentration der Arbeitsplätze der Behörden im Stadtzentrum;

Variante P3 – wird im Vergleich mit P1 durch sehr große Besiedlungsdichte in den Wohnvierteln und größerer Konzentration der Arbeitsplätze der Behörden im Stadtzentrum charakterisiert;

Variante P4 – hat eine regelmäßige Verteilung der Wohnviertel über die ganze Stadt und eine größere Konzentration der Arbeitsplätze (sowohl in alle Sektoren als auch in den Behörden) im Stadtzentrum;

Variante P5 – hat eine regelmäßige Verteilung der Wohnviertel über die ganze Stadt, gewisse Konzentration der Arbeitsplätze der Behörden im Stadtzentrum und eine starke Konzentration der anderen Arbeitsplätze außerhalb des Stadtzentrums.

Alle Varianten der Bebauung haben dieselbe Anzahl von Einwohnern und Arbeitsplätzen (sowohl in alle Sektoren als auch in den Behörden) in der Stadt.

Für jede Variante wurde das Verkehrsaufkommen auf Grund eines Regressionsmodells für polnische mittelgroße Städten berechnet. Zuerst wurden die benutzten Verkehrsmittel geschätzt: zu Fuß, mit Auto (MIV) oder mit Buß (ÖPNV) (Bild 2). Danach wurde die Verkehrsverteilung (OD-Matrix) unter Anwendung eines proportionalen Modells, berechnet. Im Weiteren blieb dann der Fußgängerverkehr unberücksichtigt, weil alle Anlagen für Fußgänger praktisch unbeschränkte Kapazität haben sollen und der Fußgängerverkehr keinen negativen Einfluß auf die Umwelt hat. Im nächsten Schritt wurde die Verkehrsmittelwahl zwischen Auto und Buß, dem oft einzigen öffentlichen Verkehrsmittel in mittelgroßen Städten, durchgeführt. Das Modell der Verkehrsmittelwahl [3] hängt sowohl von der Reisezeit mit dem Auto bzw. mit dem Bus als auch vom Motorisierungsgrad ab. Der öffentliche Verkehr wurde in den weiteren Berechnungen durch entsprechende Vergrößerung des Autoverkehrs berücksichtigt. Die Verkehrsverteilungen wurden für drei Werte der Motorisierungsgrade geschätzt:

- 250 PKW/1000 Einwohner – jetziges Niveau der Motorisierung in mittelgroßen Städten in Polen,
- 350 PKW/1000 Einwohner – jetziges Niveau der Motorisierung in großen Städten in Polen und in kurzer Zeit auch in mittelgroßen Städten zu erreichen,
- 500 PKW/1000 Einwohner – als maximalen Wert für polnische Bedingungen, der ungefähr der Anzahl ausgestellter Führerscheine entspricht.

So entstanden 150 OD-Matrizen, die nicht nur von den Varianten der Bebauung und vom Motorisierungsgrad, sondern auch von der Gestalt des Straßennetzes abhängen.

Die Verkehrsumlegung wurde mit dem Programm-Paket MSPT (polnische Version des amerikanischen Programms UTPS – Urban Transportation Planning) durchgeführt. Als Output-Daten bekommt man für jede Strecke ihre Verkehrsbelastung und ihre Fahrzeit, die die begrenzte Kapazität berücksichtigt.

### **Definition der strukturellen und funktionellen Parameter**

Wir betrachten im Folgenden die strukturellen Parameter:

Dispersion eines Verkehrsnetzes, das ist die mittlere Anzahl von Bögen auf einem kürzesten Weg zwischen zwei Knoten des Netzes.

Weil diese Kennziffer für Netze mit unterschiedlicher Knotenanzahl verwendet wird, sollte man die durchschnittliche Dispersion des Graphen (Quotient aus der Dispersion des Graphen durch die Anzahl seiner Knoten) berechnen.

Bild 1. Straßennetze für die weitere Analyse

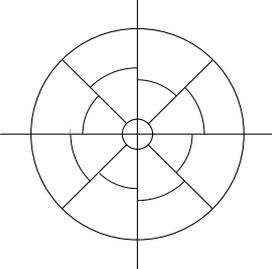
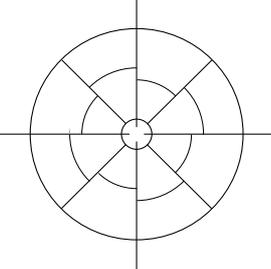
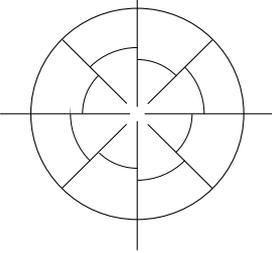
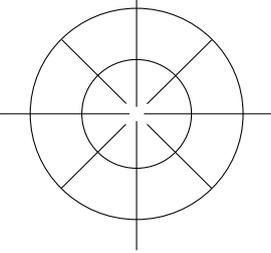
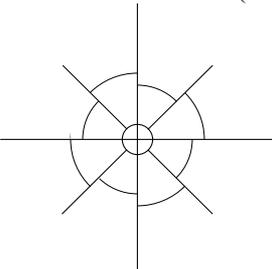
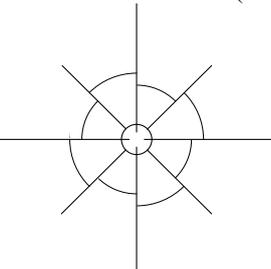
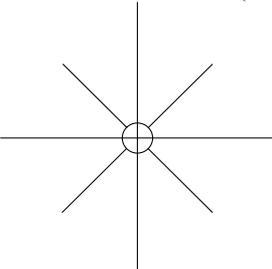
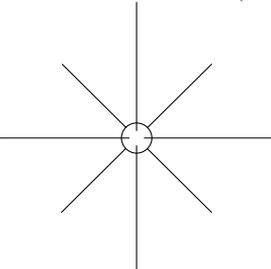
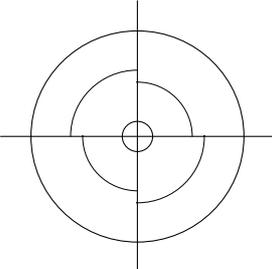
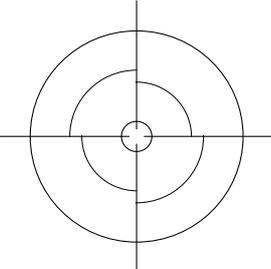
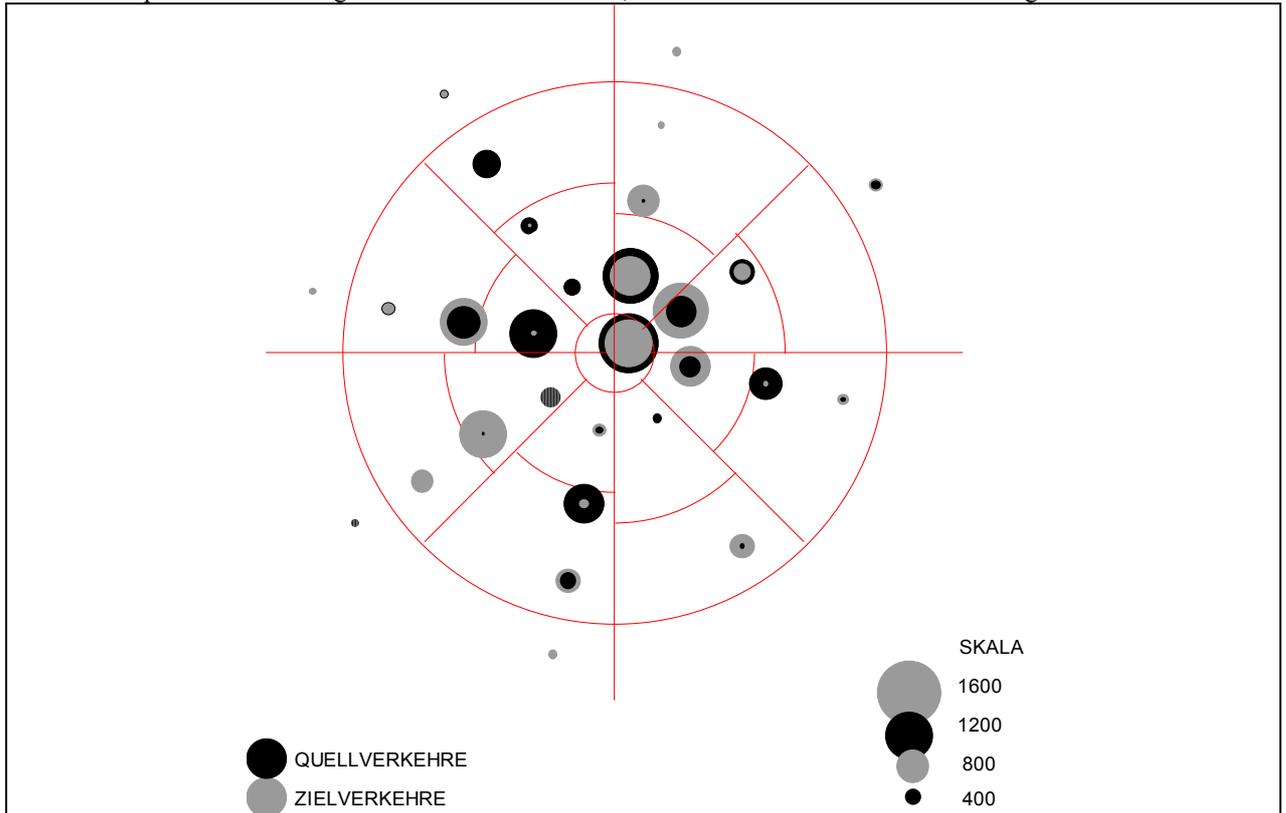
<p>Volles Straßennetz (mit freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum) (<b>S3S</b>)</p> 	<p>Volles Straßennetz ohne freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S3U</b>)</p> 
<p>Straßennetz ohne freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum und ohne inneren Stadtring (<b>S2S</b>)</p> 	<p>Straßennetz ohne freie Durchfahrt durch das Stadtzentrum und ohne inneren Stadtring, aber mit vollständigem Zwischenring (<b>S2M</b>)</p> 
<p>Straßennetz ohne Außenring mit freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S4S</b>)</p> 	<p>Straßennetz ohne Außenring ohne freie Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S4U</b>)</p> 
<p>Straßennetz mit innerem Ring und mit freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S1S</b>)</p> 	<p>Straßennetz mit innerem Ring ohne freie Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S1U</b>)</p> 
<p>Straßennetz ohne komplementäre Radialstraßen mit freier Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S5S</b>)</p> 	<p>Straßennetz ohne komplementäre Radialstraßen ohne freie Durchfahrt durch das Stadtzentrum (<b>S5U</b>)</p> 

Bild 2: Beispiel der Verteilung der Verkehrsaufkommen, die für die Variante P3 der Bebauung berechnet wurden



Unterentwicklung eines Netzes [2], das ist die Größe

$$K_m = \frac{1}{n^2} \cdot \sum_{i,j=1}^n [zhko(i, j) - zhk(i, j)],$$

wobei  $n$  die Anzahl der Knoten des Netzes und  $zhk(i, j)$  zu einem geordneten Knotenpaar  $(i, j)$  die Minimale Anzahl von Kanten angibt, die aus dem Graphen entfernt werden müssen, damit sein Zusammenhang so verloren geht, daß  $i$  und  $j$  getrennt sind. Bezeichnet  $val(i)$  die Anzahl von Kanten, mit denen der Knoten  $i$  inzident ist, so gilt offenbar

$$zhk(i, j) \leq \min ( val(i) , val(j) ) = zhko(i, j) .$$

Mittleren Reisezeit, die alle Zeitverluste während der Reise „vom Tür zur Tür“ berücksichtigt. Im motorisierten Individualverkehr besteht sie außer der Fahrzeit auch aus der Zugangs- und Abgangszeit vom Parkplatz und aus der Parkplatzsuchzeit.

Es existieren noch anderen funktionelle Parametern wie z.B.: Beförderungsleistung (Kfz-km, Kfz-Min.) sowohl für den MIV (motorisierten Individualverkehr), als auch für den ÖPNV (öffentlichen Personennahverkehr), die durchschnittliche Beförderungsgeschwindigkeit und die Kennziffer der Überlastung des Netzes.

### **Berechnung der strukturellen und funktionellen Parametern**

Die Berechnung des  $zhk(i, j)$  erfolgt durch die Lösung eines Maximalstromproblems mit der Quelle  $i$  und der Senke  $j$ , wobei jede Kante durch ein Paar entgegengesetzt gerichteter Bögen ersetzt und jedem Bogen die Kapazität 1 zugeordnet wird.

In Tabelle 1 werden die berechnete Werte der betrachteten strukturellen Parametern für die zu analysierenden 10 Straßennetze zusammengestellt.

Tabelle 1. Werte der topologischen Kennziffern für die ausgewählten theoretischen Straßennetze

Symbol des Straßennetzes nach Bild 1	Durchschnittliche Dispersion des Graphen	Kennziffer der Unterentwicklung des Netzes
S1S	4,109	0,499
S1U	4,262	0,514
S2U	3,672	0,376
S2M	3,291	0,362
S3S	3,158	0,100
S3U	3,234	0,194
S4S	4,071	0,328
S4U	4,109	0,342
S5S	3,196	0,152
S5U	3,272	0,181

Wir haben 150 Simulationsberechnungen (10 Straßennetze  $\times$  5 Varianten der Bebauung  $\times$  3 Motorisierungsgrade) durchgeführt. Auf Grund ihre Ergebnisse wurden die Modellen der Zusammenhänge zwischen strukturellen und funktionellen Parametern bearbeitet.

Die Mittleren Reisezeit darf man als quadratische Funktion des Kennziffers der Unterentwicklung  $K_m$  mit Hilfe der folgenden Gleichungen beschreiben:

- für Motorisierungsgrad 250 Kfz./1000 Personen

$$T_{sr} = 7.76 \times K_m^2 - 1.49 \times K_m + 8.11 \quad [\text{min}] \quad SE=0.29 \quad R^2 = 0.71$$

- für Motorisierungsgrad 350 Kfz./1000 Personen

$$T_{sr} = 24.5 \times K_m^2 - 8.05 \times K_m + 10.7 \quad [\text{min}] \quad SE=0.48 \quad R^2 = 0.83$$

- für Motorisierungsgrad 500 Kfz./1000 Personen

$$T_{sr} = 52.0 \times K_m^2 - 18.8 \times K_m + 14.4 \quad [\text{min}] \quad SE=0.68 \quad R^2 = 0.90$$

Im Bild 3 sind das Diagramm der bearbeiteten Funktionen (Linien) und die Ergebnisse der

Simulationsberechnungen veranschaulicht.

## Berücksichtigung des Effekts der Verkehrssteuerung

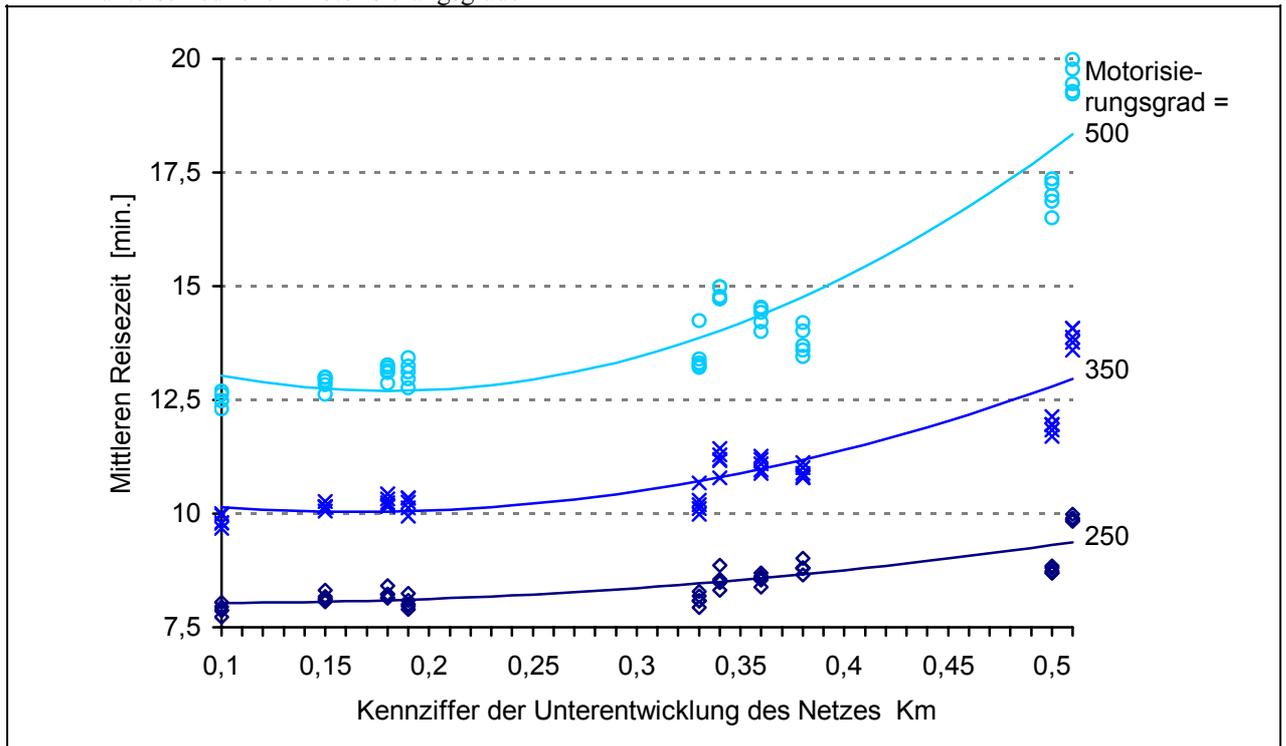
Die Systeme zur Steuerung des Straßenverkehrs sind ein wirkungsvolles Mittel der Verbesserung der Bedingungen des Verkehrs. Die Entwicklung der Steuerungssysteme zielt auf volle Anpassung durch Dezentralisation der Steuerfunktionen (d.h. durch bedeutenden Zuwachs der „Intelligenz“ der örtlichen Steuergeräte) und durch ihre Ergänzung um ein Steuerzentrum, von dem aus alle örtlichen Steuergeräte gemeinsam geleitet werden, ab. Auf der laufenden Datensammlung vom Detektoren ist es möglich „on line“ Signalprogramme zu optimieren und eine verkehrsabhängige Steuerung zu realisieren.

Diese Effekte werden mit Hilfe folgender Kennziffer gemessen:

- Zeitverluste der Fahrzeuge im Netz,
- Reisezeit entlang der Verbindungen,
- Benzinverbrauch,
- Umweltbelastung (Abgasemission, Lärm),
- Länge der Warteschlangen der Fahrzeuge.

Die mittlere Reisezeit im Netz ist die anschaulichste Kennziffer. Man schätzt im allgemeinen, daß dieser Typ von Signalsteuerung für nicht besonders überlastete Straßennetze – im Vergleich mit unkoordinierter Signalsteuerung - die Reisezeiten der Fahrzeuge um 10-15% reduziert.

Bild 3. Zusammenhang zwischen der mittleren Reisezeit und der Kennziffer der Unterentwicklung bei unterschiedlichen Motorisierungsgraden



Die Bestimmung der Zeitverluste ist für umfangreiche Netze, wie etwa das Straßennetz einer Stadt, sehr kompliziert. Dazu verwendet man sowohl analytische Modelle als auch Simulationsmethoden. Analytische Modelle basieren auf vielen vereinfachenden Annahmen, z. B. daß Zeitverluste auf einzelnen Strecken zwischen Kreuzungen vom „offset“ und vom Signalprogramm am Ende der Verbindung abhängen. Die Größe des „offset“ hängt von der Reisezeit zwischen den Straßenkreuzungen ab, also einem wesentlichem Parameter, der aus der Geometrie des Netzes hervorgeht. Einzelne Modelle, die sich auf obige Annahmen stützen, unterscheiden sich durch die Methoden der Berechnungen der Zeitverluste. Zu den bekanntesten Methoden in dieser Gruppe, die die Koordinierung im Netz berücksichtigen, gehören: die britische Kombinationsmethode (Hiller, Whiting, Allsop), die amerikanische Methoden SIGOP und MITROP und die kanadische Methode SIGRID

Die englische Methode TRANSYT, die in TRRL bearbeitet wurde, ist die bekannteste und am häufigsten verwendete Simulationsmethode [1].

Für die in diesem Vortrag untersuchten Straßennetze ist die Koordinierung der Lichtsignalanlagen für Radialstraßen mit relativ großem Geradeausverkehr sehr effektiv. Sie ist weniger effektiv auf Ringstraßen, weil auf den Kreuzungen bedeutende Ströme von Fahrzeugen, die dort in Richtung Zentrum abbiegen, sind. Die Optimierung der Koordinierung der Lichtsignalanlagen für die analysierten Ring-Radius-Strukturen (mit dem Ziel der Bestimmung minimaler Zeitverluste und Reisezeiten) ist ein sehr kompliziertes und arbeitsintensives Problem, das es zukünftig noch zu untersuchen gilt.

#### Literatur:

- [1] Vicent R.A., Mitchel A.I. Robertson D.I.: User guide to TRANSYT Version 8 . TRRL, LR 888, Crowthorne 1980.
- [2] Hempel L., Dudek M. - Zur Bewertung der Struktur von Verkehrsnetzen;  
Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen IKM, Weimar, 1997.
- [2] Dudek M., Kirchheim A. - Modellierung der Verkehrsmittelwahl;  
Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und Mathematik in Architektur und Bauwesen IKM, Weimar, 1997.