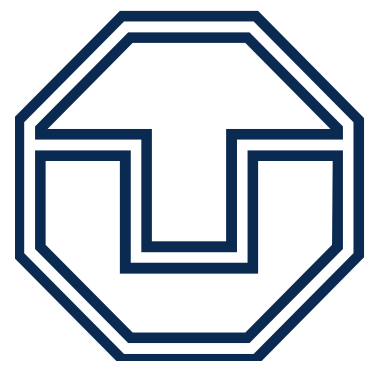




DIPLOMARBEIT

Graphentheoretische und raumstrukturelle Untersuchungen bei Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsnetzen

BEARBEITER



Name: Thomas Dittich
Studium: Verkehrsingenieurwesen
Bearbeitungszeitraum: November 2011 – April 2012

BETREUER

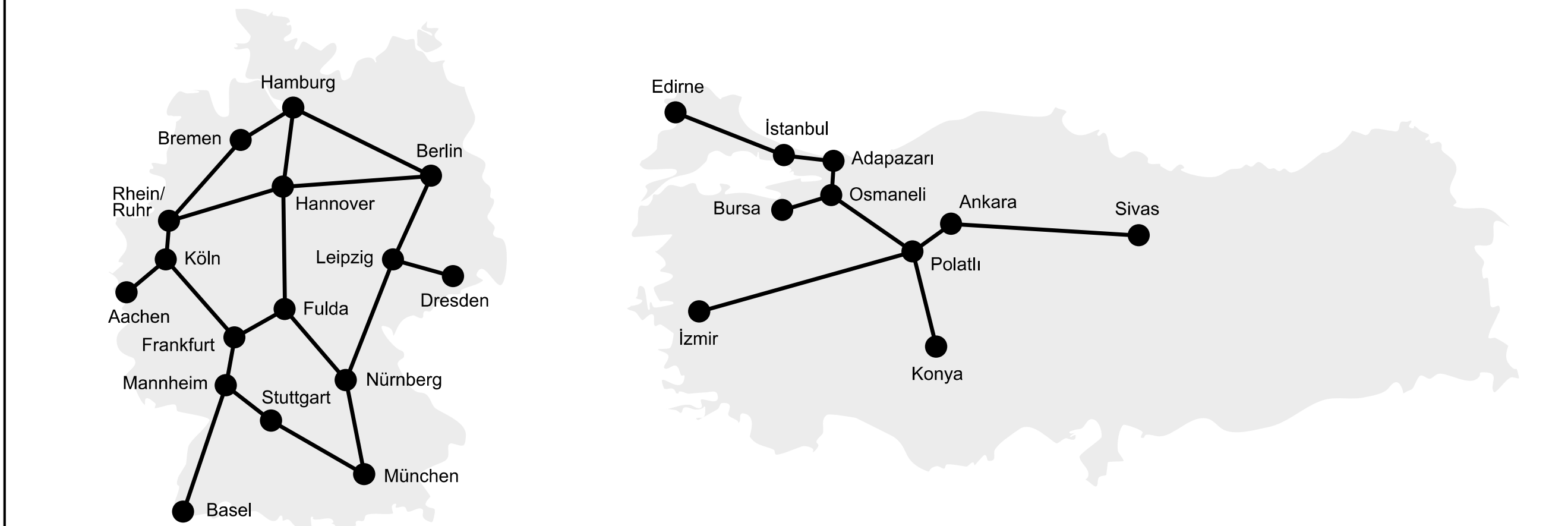
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Fengler
Dipl.-Ing. Sven Hietzschold

AUFGABE

Betrachtet man verschiedene Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsnetze, kann man ganz offensichtlich teils ähnliche, teils aber auch unterschiedliche Strukturen feststellen. Dies gilt ebenso für die Verteilung der Bevölkerung in einem Land, die die Struktur der Hochgeschwindigkeits-Eisenbahnnetze maßgeblich bestimmt. Beides, die Struktur der Netze und die Bevölkerungsverteilung, soll durch mathematische Verfahren quantifizierbar gemacht werden. Methoden zur Charakterisierung von Netzstrukturen werden durch die Graphentheorie bereitgestellt. Für die Bevölkerungsverteilung kommen diverse mathematische und geographische Ansätze in Betracht. Mit diesen Hilfsmitteln sollen die Eigenschaften verschiedener Länder hinsichtlich beider Problemfelder beschrieben werden. Weiterhin ist zu prüfen, ob sich die Abhängigkeit von Bevölkerungsverteilung und Netzstruktur auch in mathematischen Korrelationen niederschlägt. Die Güte von Zusammenhängen ist gegebenenfalls auch unter Beachtung spezifischer Probleme bei der Kennwertermittlung zu diskutieren. Abschließend ist die Struktur des grenzüberschreitenden Hochgeschwindigkeitsnetzes in Europa mit geeigneten Methoden zu untersuchen. Hierbei stellt sich insbesondere die Frage, ob, wo und warum man noch Defizite im internationalen Eisenbahnverkehr erkennen kann, und wie sich dies in Bezug auf die Entwicklung des Streckennetzes in Kennwerten zeigt.

Graphentheoretische Kennwerte

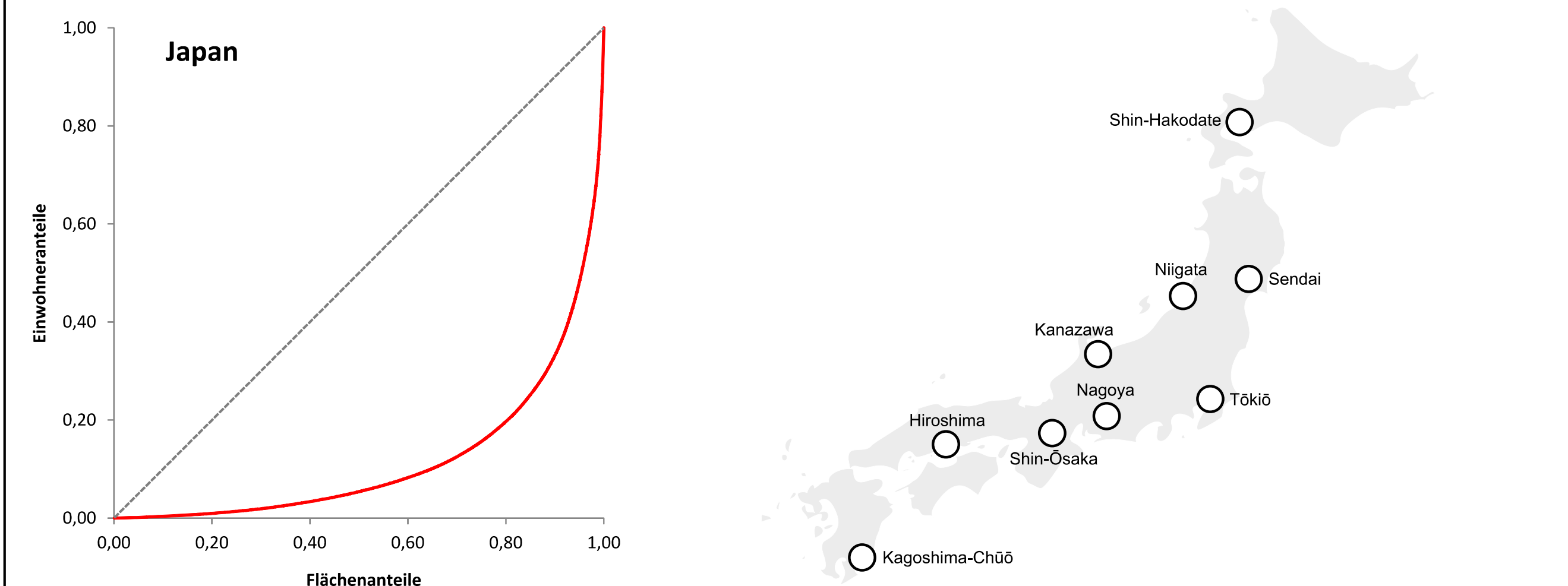
Zahlreiche graphentheoretische Kennwerte bieten die Möglichkeit zur Charakterisierung und zum Vergleich der Struktur verschiedener Netzstrukturen. Am Beispiel der (zukünftigen) Hochgeschwindigkeitsnetze von zwei Ländern (Deutschland und Türkei) und zwei Kennwerten wird dies verdeutlicht:



Der **Alpha-Index** gibt das Verhältnis aus vorhandenen Zyklen und bei gegebener Knotenanzahl maximal möglichen minimalen Zyklen (im planaren Graphen) an. Der Graph für Deutschland beinhaltet immerhin fünf Zyklen; somit sind knapp 19 % der 27 möglichen Zyklen vorhanden. Das türkische Netz ist komplett baumförmig und enthält gar keine Zyklen. Somit ist der Alpha-Index gleich 0. Man kann sagen, dass die Verbundenheit im deutschen Netz besser ist, es gibt mehr Direktverbindungen zwischen den einzelnen Knoten. Der **Theta-Index** ist der Quotient aus der Länge des Netzes und der Anzahl der vorhandenen Knoten, also die durchschnittliche Kantenlänge, die auf einen Knoten entfällt. Für Deutschland liegt der Wert bei 193 km, für die Türkei bei 175 km. Trotz im Allgemeinen größerer Abstände der für den Hochgeschwindigkeitsverkehr relevanten Netzknoten in der Türkei im Vergleich zu Deutschland ist der Theta-Index hier also geringer, da in Deutschland wegen des maschenförmigen Charakters meist mehr Strecken auf einen Knoten treffen als in der Türkei.

Kennwerte zur Bevölkerungsverteilung

Die Struktur von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsnetzen hänge neben anderen Faktoren zu einem großen Teil von der Verteilung der Bevölkerung in einem Land bzw. der Anordnung von Bevölkerungsschwerpunkten ab. Analog zum Vorgehen bei der Untersuchung der Netzstruktur werden auch zur Beschreibung der Bevölkerungsverteilung Kennwerte benutzt. Neben einfachen Kennwerten wie Einwohnerzahl, Landesfläche, Einwohnerdichte und ähnliches ist vor allem die räumliche Verteilung von Einwohnerzahl und Einwohnerdichte von Interesse. Eine mögliche Herangehensweise ist die Verwendung einer **Lorenz-Kurve** zur Darstellung von (Un-)Gleichverteilungen, hier am Beispiel von Japan:



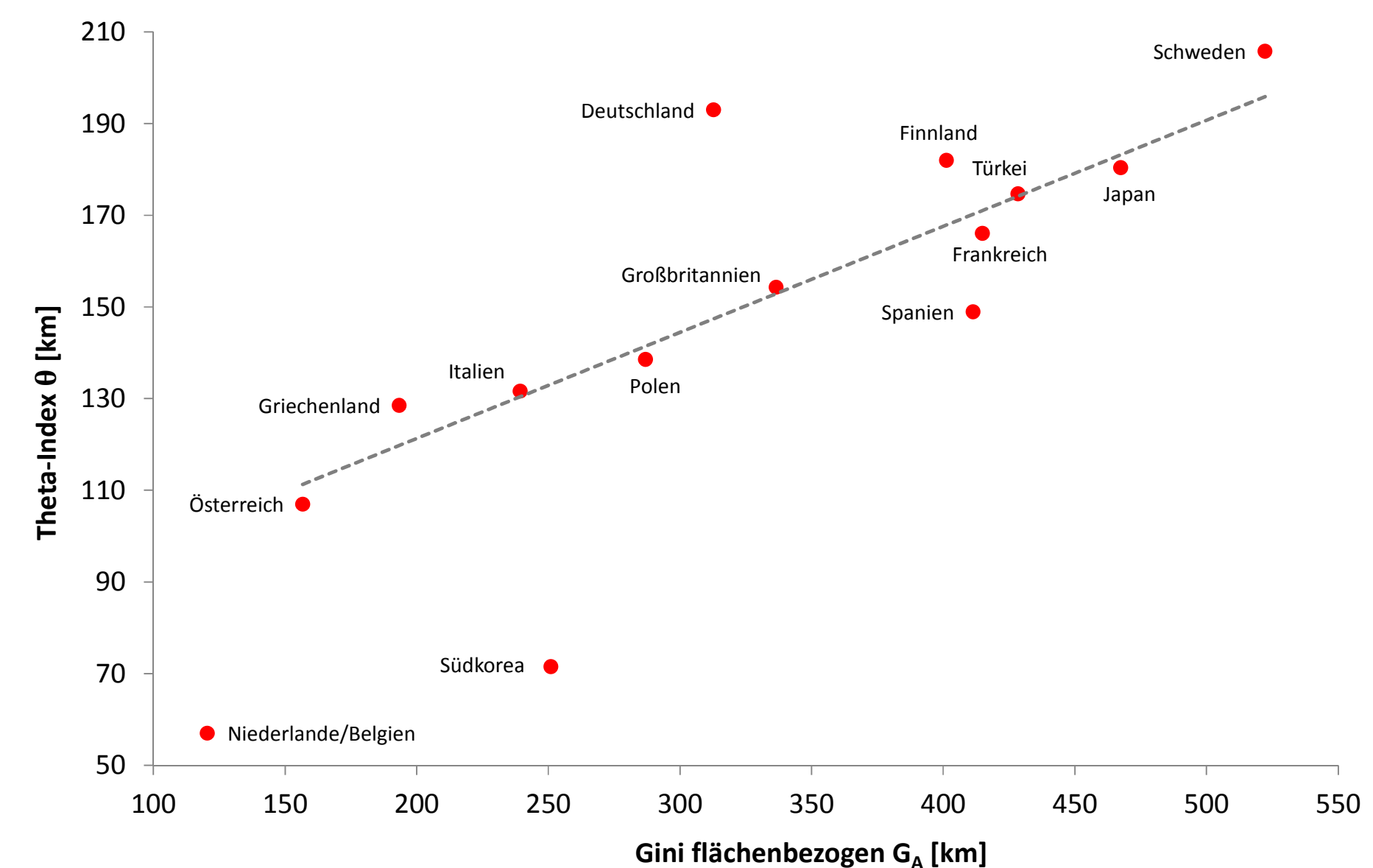
Die Lorenz-Kurve (rot) ist deutlich gewölbt, was für eine starke Ungleichverteilung spricht. Man kann beispielsweise ablesen, dass auf 80 % der Landesfläche nur etwa 20 % der Einwohner leben. Demzufolge konzentrieren sich die restlichen 80 % der Einwohner auf nur 20 % der Fläche, wo die Einwohnerdichte dann besonders hoch ist. Weitere Berechnungen zeigen folgerichtig auch, dass in Japan über zwei Drittel aller Einwohner in Städten mit mindestens 100.000 Einwohnern leben (in Deutschland gilt dies nur für weniger als ein Drittel). Durch Verhältnisbetrachtungen mit den Flächen, die im Diagramm durch die Lorenz-Kurve begrenzt werden, kann man den Kurvenverlauf durch skalare Größen beschreiben. So nimmt der **Gini-Koeffizient** etwa Werte zwischen 0 (Gleichverteilung) und 1 (völlige Konzentration auf einen Punkt) an. Für Japan liegt er bei 0,76.

THESEN

- (1) Es gibt unterschiedliche Definitionen für Hochgeschwindigkeitsverkehr (HGV), im Allgemeinen werden aber zumindest 200 km/h erreicht, oft sogar 250 km/h oder auch mehr als 300 km/h.
- (2) Vor allem in den Ländern Europas und Asiens gibt es eine Vielzahl verschiedener HGV-Systeme, wobei aber oft auf bewährte Technik und Komponenten namhafter Hersteller gesetzt wird, etwa bei Neigetechniken von Talgo oder Pendolino, oder der Zugkonfiguration des TGV. Daneben gibt es in zahlreichen weiteren Ländern auch Planungen oder Ideen für eigene HGV-Systeme.
- (3) Verkehrsnetze allgemein und somit auch HGV-Netze lassen sich zweckmäßig als Graphen darstellen, wozu allerdings einige Vereinbarungen zu deren konkreten Gestaltung getroffen werden müssen.
- (4) Aus den Graphen kann man verschiedene skalare Kenngrößen ablesen oder berechnen, die Aussagen zur topologischen Struktur, Verbindungsqualität oder Ausdehnung des Graphen zulassen.
- (5) Während die Struktur des klassischen Eisenbahnnetzes eher historisch gewachsen ist, orientieren sich die Strecken der HGV-Netze maßgeblich an der aktuellen Raumstruktur. Davon sei in erster Linie die Verteilung der Bevölkerung relevant. Es gibt aber noch weitere Einflussfaktoren, wie zum Beispiel das Güterverkehrsaufkommen oder politische Zielsetzungen.
- (6) Die Bevölkerung in einem Land kann unterschiedlich verteilt sein und dabei gewissen Grundmustern folgen. Diese Verteilung kann man ebenfalls durch skalare Kennwerte charakterisieren.
- (7) Gemäß der Abhängigkeit der Netzstruktur von der Raumstruktur kann man auch mathematische Korrelationen zwischen den entsprechenden Kennwerten annehmen.
- (8) Auf europäischer Ebene ist zunehmend die Tendenz zu beobachten, dass die vormalig nur nationalen HGV-Netze zu einem länderübergreifenden Verbund zusammenwachsen. Allerdings verläuft diese Entwicklung nicht überall gleich schnell, und es gibt nach wie vor noch einige Hürden für den ungehinderten grenzüberschreitenden Eisenbahnverkehr.

Zusammenhänge zwischen Kennwerten

Aufgrund der naheliegenden Annahme, dass die Struktur von Eisenbahn-Hochgeschwindigkeitsnetzen maßgeblich von der Bevölkerungsverteilung beeinflusst wird, stellt sich die Frage, ob man auch mathematisch zeigen kann, ob eine bestimmte Ausprägung der Bevölkerungsverteilung zu einer bestimmten Ausprägung der Netzstruktur führt oder geführt hat. Tatsächlich gibt es solche Zusammenhänge, wie zum Beispiel zwischen einem modifizierten Gini-Koeffizienten und dem Theta-Index:



Der Korrelationskoeffizient beträgt hier 0,83. Vereinfachend kann man sagen: Je stärker die Ungleichverteilung der Einwohnerdichte ist, desto vermaschter ist das Netz bzw. desto größer sind die Entfernungen zwischen Knoten.

Betrachtung für Europa

Angesichts der fortschreitenden europäischen Integration werden auch attraktive grenzüberschreitende Verkehrsverbindungen immer wichtiger. Aus ökonomischen und ökologischen Gründen soll laut Siim Kallas, Europäischer Kommissar für Verkehr, der größte Teil des Personenfernverkehrs in Entfernungsbereichen zwischen 400 km und 1.000 km künftig durch den Hochgeschwindigkeitsverkehr der Eisenbahn abgewickelt werden. Zur Umsetzung dieses Ziels gibt es verschiedene Planungen; am bedeutendsten sind sicherlich die **Transeuropäischen Netze (TEN)**. Sie bilden einen Rahmen für 30 bedeutende europäische Achsen verschiedener Verkehrsmittel und befinden sich im Jahr 2012 in Überarbeitung.

Die aktuelle Situation des Eisenbahnfernverkehrs in Europa ist allerdings von Gegensätzlichkeiten geprägt. So gibt es zwar attraktive Zugverbindungen zwischen Deutschland und Frankreich, nach London oder in Kürze zwischen Frankreich und Spanien. Auch ist die belgische Hauptstadt Brüssel bereits ein Drehkreuz fünf verschiedener Hochgeschwindigkeitszüge (Eurostar, Thalys, Fyra, TGV und ICE). Andererseits brachte die Einführung nationaler Hochgeschwindigkeitssysteme auch oft eine Kappung internationaler Verbindungen. Zahlreiche Punkte (unterschiedliche Stromsysteme, Spurweiten, Zugbeeinflussungssysteme, Lichttraumprofile; langwierige Zulassungsverfahren; unternehmerische Eigeninteressen) behindern den internationalen Verkehr. Gerade im Verkehr mit Osteuropa spielt auch der schlechte Zustand der Infrastruktur und die damit verbundene mangelnde Wettbewerbsfähigkeit der Schiene eine Rolle. So eröffnen die Kennwerte zum Netzgraphen für Europa zwar akzeptable Ergebnisse, was aber vor allem auf den aktuell/künftig gut ausgebauten mitteleuropäischen Kernbereich zurückzuführen ist.

Zusammenfassung

- o Die vorgestellten Kennwerte zur Beschreibung von Netzstrukturen und Bevölkerungsverteilungen sind zweckmäßige Mittel, um die Eigenheiten verschiedener Länder zahlenmäßig erfassbar und vergleichbar zu machen. Allerdings ist es notwendig, immer mehrere Kennwerte zu betrachten und angemessen zu interpretieren, da nicht jeweils ein Kennwert alle erdenklichen Aspekte berücksichtigen kann – eine einzelne skalare Zahl ist hierzu gar nicht in der Lage.
- o Einige denkbare kausale Zusammenhänge zwischen Bevölkerungsverteilung und Netzstruktur kann man tatsächlich auch durch mathematische Korrelationen ausdrücken. Problematisch für weitere Aussagen ist jedoch der geringe Untersuchungsumfang von nur 14 Ländern – es gibt weltweit nicht erheblich mehr Länder, in denen Hochgeschwindigkeitsverkehr stattfindet, der gewisse Grundanforderungen erfüllt (etwa ein gewisser Entwicklungsstand der Netze).
- o Bei der Betrachtung des gesamteuropäischen Netzes kann man einerseits feststellen, dass zukunftsweisende Maßnahmen und Projekte teils bereits umgesetzt worden sind, aber auch hier muss man Einschränkungen vornehmen und anmerken, dass es in vielerlei Hinsicht noch großen Handlungsbedarf gibt.