

Trassen unter dem Hammer

Marktwirtschaft auf der Schiene?

Wie soll das überhaupt gehen?

Mathematiker haben sich darangemacht,
das Streckennetz der Deutschen Bahn
zu optimieren. *Von Klemens Polatschek*



Der Termin klang nach grauem Politikeralltag. Vergangene Woche stellte Verkehrsminister Wolfgang Tiefensee in Berlin das zweite und endgültige Gutachten über den geplanten Börsengang der Deutschen Bahn AG vor. Die Bundesregierung will daraus bis zum Sommer einen Plan ableiten, in welcher Form die Bahn privatisiert werden soll. Es geht um die Frage, ob sie die Hoheit über das Schienennetz behalten soll, ob es als öffentliche Infrastruktur vor dem Börsengang

von ihm abgetrennt wird oder ob es eine Zwischenform zwischen diesen beiden Lösungen geben könnte.

Hinter den trockenen Verlautbarungen verbirgt sich allerdings ein vertracktes Problem - und kein neues. Es ist rund zwanzig Jahre her, da schrillten in vielen Ländern Europas die Alarmglocken. Die staatlichen Eisenbahnunternehmen verschlangen immer mehr Geld, anstatt welches an ihren Fahrgästen zu verdienen. Gigantische Schulden drohten. Die

Europäische Kommission verabschiedete von 1991 an mehrere Richtlinien, die das verhindern sollten. Unter anderem sollten die nationalen Schienennetze für private Eisenbahnbetreiber geöffnet werden. Deutschland besaß damals gleich zwei dieser siechen Staatsunternehmen, nämlich die Bundesbahn (West) und die Reichsbahn (Ost). 1994 verschmolzen die beiden im Sinn der EU zur Deutschen Bahn AG. Diese sollte aus dem Bahnbetrieb endlich ein Geschäft machen. Eine ihrer möglichst selbständigen Tochterfirmen, die DB Netz AG, sollte die 35 000 Kilometer des deutschen Schienennetzes wettbewerbsorientiert vermarkten.

Nun ist ein nationales Schienennetz zunächst das Gegenteil von Wettbewerb, nämlich ein natürliches Monopol - niemand könnte ein vergleichbares Gleissystem noch einmal bauen. Wie schafft man da Konkurrenz?

"Für mich ist es erstaunlich, daß das zuständige Ministerium in der Vergangenheit nicht einen einzigen Forschungsauftrag vergeben hat, der sich mit dieser Frage auseinandersetzt", sagte damals Hans-Jürgen Ewers, Präsident der TU Berlin und Doyen der deutschen Infrastruktur-Ökonomen, in einer Anhörung des Verkehrsausschusses im Bundestag. Neben ihm saß der Bahnexperte Gottfried Ilgmann, und die beiden arbeiteten just an einem Vorschlag dieser Art. Ilgmann wollte aber nicht "einfach mal ein bißchen" forschen, sondern alles nach Strich und Faden durchleuchten. Sein Ziel war eine Optimierung der Schienenwege insgesamt.

Dieser Gedanke enthält genug gesunden Größenwahn, um für echte Forschung zu taugen. Schließlich lautet die Lehrmeinung, ein System wie der deutsche Schienenverkehr sei entschieden zu komplex, um in seiner Gesamtheit beschrieben, geschweige denn berechnet zu werden. Ilgmann stellte sich aber noch mehr vor, nämlich einen Markt, auf dem Bahnbetreiber die Erlaubnis zu einzelnen Verkehrsverbindungen ersteigern können. Wer am meisten bietet, darf aufs Gleis. Am Flughafen nennt man solch ein Recht "Slot", bei der Eisenbahn heißt es "Trasse" - das Recht, einen bestimmten Zug zu einer bestimmten Zeit auf einer festgelegten Route

von A nach B zu fahren. Das Projekt bekam den Namen "Trassenbörse" und finanzielle Unterstützung vom Bundesforschungsministerium.

Ewers starb 2002 noch vor dem Start des Forschungsprojektes. Sein Fachgebiet Wirtschafts- und Infrastrukturpolitik an der TU Berlin betreut die ökonomischen Aspekte bis heute. Das Fachgebiet Schienenfahrwege und Bahnbetrieb, ebenfalls an der TU, kümmert sich darum, daß alle notwendigen Bedingungen des praktischen Eisenbahnbetriebs erfüllt werden. Das Berliner Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik widmet sich der mathematischen Optimierung. Zusammen wollen die Trassenforscher das bundesweite Schienennetz in ein Modell packen, das es möglich macht, die Fahrrechte sinnvoll unter den einzelnen Wettbewerbern zu vergeben. Ihren ersten zusammenfassenden Forschungsartikel haben die Wissenschaftler zur Jahreswende beim Fachblatt *Competition and Regulation in Network Industries* eingereicht.

Wer ein Gefühl dafür bekommen will, wie revolutionär das Vorhaben ist, muß sich nur anschauen, wie Bahnunternehmen traditionell planen. "Bis heute werden die Fahrpläne fürs Netz von Hand optimiert", schreiben die Trassenbörsler in ihrem Forschungsbericht, "ererbte Fahrpläne werden an ausgewählten Stellen nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum verbessert." Auch die DB Netz AG führt nur die Trassenwünsche ihres Mutterkonzerns Deutsche Bahn und seiner dreihundert vergleichsweise mikrobischen Wettbewerber zu einem Jahresfahrplan zusammen. Die Wünsche sind vielfach nur eine Verlängerung dessen, was sich an praktikablen Verbindungen eingeschliffen hat. "Die Bahnleute prüfen zwar verschiedene Fahrplan-Varianten und wählen dann die beste aus. Aber das ist natürlich gar keine Optimierung im mathematischen Sinn", erklärt Martin Grötschel, Kopf der Mathematiker in der Trassenbörse und weltweit anerkannter Experte für solche Probleme.

Niemand kann daher sagen, wie gut der historische Fahrplan das Netz und vor allem

dessen Engstellen nutzt. Die 700 Mitarbeiter, die bei der DB Netz AG, regional verteilt, die Trassen vergeben, zeichnen zwar ein stets präzises Bild des Schienenverkehrs, aber sie besitzen eben kein Modell davon. Dabei ist das Netz aufs engste verknüpft. Keiner kann sagen, ob beispielsweise ein weiteres Gleis am überlasteten Knotenpunkt Köln für vergleichsweise wenig Geld eine hohe Anzahl neuer nützlicher Verbindungen erlauben würde. Und wie hoch die Kosten des Ausbaus sein dürften, damit er sich lohnt. Oder welche von Hunderten von Langsamfahrstellen als erste repariert werden sollten, weil sie im Vergleich die Netznutzung am meisten einschränken. Oder welchen Nutzen für die Durchlässigkeit des gesamten Netzes es bringt, eine Schnellfahrstrecke durch den Thüringer Wald zu bauen. Auch weil es niemand weiß, streiten Politik und Stammtische fallweise heftig um diese Themen, verbittert, aber mit verbundenen Augen.

"Die Vorteile einer Trassenbörse hängen gar nicht von einer Trennung des Schienennetzes vom Bahnbetrieb ab - schon die heutige Bahn könnte sie einsetzen, etwa als internes Optimierungsmittel der Trassenvergabe an die Transportsparten Fernverkehr, Regionalverkehr und Güterverkehr", sagt Jürgen Siegmann, der Bahntechnik-Verantwortliche im Projekt. Dem Schienennetz fehlt ja nicht nur das Modell, sondern überhaupt jede begründete Ökonomie. Die DB Netz AG berät sich zwar inzwischen mit einem "Netzbeirat" der Verkehrsunternehmen und erhebt Trassenpreise für jede Schienennutzung nach einem EU-amtlich und kartellrechtlich geprüften System. Aber mit den realen Kosten für Bau und Pflege einzelner Schienenwege haben diese Zahlen nur entfernt zu tun. Ein ICE-Zug zahlt etwas mehr als ein Regionalzug, in den Bau seiner Schnellfahrstrecken jedoch wurde ein Vielfaches investiert. Was ist hier der gerechte Preis?

Besuch bei Kay Mitusch, dem Nachfolger von Hans-Jürgen Ewers. Auch er trägt wie viele seiner akademischen Mitstreiter eine Armbanduhr im Bahndesign, als wär's ein

Erkennungszeichen der Trassenbörsler. "Hinter unserem Ansatz steht die These, daß die Anbieter von Zügen den Wert der Trassen letztlich am besten einschätzen", erklärt er. "Diese Unternehmen gehen ja auch ins Risiko und investieren in Fahrzeuge und Personal, um Fahrgäste zu gewinnen."

Deswegen sollen sie gegeneinander steigern. Doch ein simples Auktionsdesign reicht dafür in keinem Fall. Die DB Netz AG ist nach dem Gesetz schon heute dazu verpflichtet, den Meistbietenden vorzuziehen, wenn sie über zwei ansonsten unvereinbare Trassenwünsche zu entscheiden hat. Sie meidet dies in der Praxis so gut als möglich, und die Trassenbörsler pflichten ihr bei: "Isoliertes Steigern für Engstellen paßt sicher nicht für die Trassenvergabe in Schienennetzen." Denn niemand wird am Ende froh, wenn ein spendierfreudiger Lokalizug-Anbieter einen Flaschenhals ergattert und damit anschließend fünf europaweit verkehrende Güterzüge blockiert.

Eine Trassenbörse muß also schon größere Teile der Netzkapazität zum selben Zeitpunkt auf den Markt bringen. Natürlich nicht alle auf einmal. "Am Anfang würde die Börse vielleicht nur den Güterverkehr auf den Haupttrouten von den deutschen Häfen ins Binnenland vergeben", erläutert Kay Mitusch. Wenn sich die Börse bewährt, würde sie anschließend in festem Rhythmus, etwa jedes Jahr, immer wieder Teile des Netzes anbieten und die Trassenrechte dann für längere Zeit, zum Beispiel für vier Jahre, vergeben.

Das Optimierungsregime der Börse muß es dann ermöglichen, daß ein nachgefragter schneller Zug vielleicht mal zwischendurch etwas langsamer fahren muß, um anderen Platz zu lassen. Nur so kann die Maximierung des Versteigerungserlöses dann auch ein Nutzungsoptimum bringen.

Die Objekte dieser Art der Versteigerung sind nicht nur "verbundene Güter", sie sind überhaupt ziemlich fusselige Ideen, die erst von den Auktionsteilnehmern in die Welt gesetzt werden. Ein gewünschter Zug soll zum Beispiel irgendwann um 18 Uhr fahren. Sein Anbieter würde aber auch zehn Minuten später hinnehmen. Eventuell läßt er sogar bei der Streckenführung mit sich reden - nach

dem Motto: "Klar, ein Halt in Frankfurt bringt eh wenig, lassen wir eben weg, aber dann wollen wir auch einen Tausender weniger zahlen."

Erstaunlicherweise haben die Berliner Wissenschaftler bereits ein Theoriegebäude geschaffen, um dieses Gefusssel zu fassen. Sie haben sogar schon eine Mini-Trassenbörse gebaut. "Natürlich wäre es hoffnungslos, ein Verfahren zur Optimierung der Schienennutzung in mikroskopischer Sicht zu konstruieren", erklären sie in ihrem Artikel. Mikroskopisch hieße, jede Weiche, jeden Gleisabschnitt und jeden Waggon abzubilden. Nein, der Ansatz muß klüger sein.

<Fortsetzung auf der nächsten Seite>

Die Kunst einer funktionierenden Trassenbörse besteht einerseits darin, eine mathematische Formulierung zu finden, welche die Beziehungen zwischen vorhandenem Schienennetz und möglichen Wünschen abbildet und sie gemeinsam berechenbar macht. Andererseits muß die gesamte Formulierung genau genug sein, um aus den Ergebnissen - also den Trassenvergaben nach der Auktion - einen praxistauglichen Fahrplan abzuleiten.

Die Formulierung gelingt mit Hilfe der sogenannten Graphentheorie (siehe "Knoten und Kanten"). Das Ergebnis läßt sich dann mit Methoden der linearen Optimierung erreichen, die dafür fertige Lösungsverfahren, sprich Computerprogramme, anbietet. Sie spucken im Prinzip eine beweisbar optimale Lösung aus. "Die errechnete Trassenverteilung muß ja ein echtes Optimum sein - sonst kommen die Verkehrsunternehmen hinterher an und weisen dem Auktionator nach, daß man aus ihren Anfragen auch etwas Besseres hätte machen können", sagt Grötschel.

Die Frage lautet nur: Wie lange dauert es, bis die optimale Lösung gefunden ist? Die Sache wäre hoffnungslos, hätte die lineare Optimierung in den vergangenen zwanzig Jahren nicht so atemberaubende Fortschritte gemacht. Robert Bixby von der Rice University in Texas hat sich vor vier Jahren in einem langen Aufsatz einmal die Mühe gemacht, den damaligen mit dem heutigen Stand der Technik zu vergleichen. Das ist

nicht einfach, weil die heute üblichen Optimierungsfragen damals so viel Rechenzeit gekostet hätten, daß sie niemandem auch nur in den Sinn gekommen wären. "Ohne Computer würde es lineare Optimierung in der heutigen Form gar nicht geben" schreibt Bixby. "Heutige PCs übertreffen in ihrer Rechenleistung bei weitem die besten Supercomputer von vor zehn Jahren." Je nach Rechenmethode sind die Optimierer schon aus diesem Grund tausendfach schneller am Ziel.

Doch der Fortschritt besteht nicht nur aus schierer Computerpower. Verbesserte Algorithmen, also neu erdachte Rechenwege, haben einen ebenso großen Anteil daran, daß Lösungen heute sogar millionenmal schneller vorliegen können als einst. Weitere Verbesserungen sind mit Händen zu greifen, weshalb Martin Grötschel für seinen Teil der Trassenbörse eine Prognose wagt: "Mit Abschluß der laufenden Projektphase werden wir, wenn wir die nötigen Streckendaten erhalten, sicherlich vierzig bis fünfzig Prozent des deutschen Schienennetzes erfolgreich berechnen können."

In der abgelaufenen Phase haben die Trassenbörsler nun ein kleines Testnetz angelegt, das die Strecken im Raum Hannover, Braunschweig, Kassel und Fulda beschreibt. Dort schickt die Deutsche Bahn heute an jedem Werktag innerhalb von sechs Stunden 310 Züge über die Schienen. Die Forscher ließen sich testhalber zu einem Bündel von 946 Auktionsangeboten für diesen Abschnitt inspirieren und maßen dann das Verhalten ihrer Optimierungssoftware.

Verblüffend war dabei, wie sehr sich die gewünschte Abfahrtszeit auf die Flexibilität auswirkt. Beharren alle Zugsanbieter exakt auf ihrer gewünschten Uhrzeit, dann rechnet der Computer nur sechs Sekunden lang für eine optimale Lösung und bringt in den zur Verfügung stehenden sechs Stunden 420 Züge unter. Zeigen sich die Anbieter jedoch entspannter und dulden eine jeweils bis zu vier Minuten spätere Abfahrt, dann brütet der Computer schon einen ganzen Tag lang über seiner Aufgabe. Ergebnis: Prompt kriegt er 617 Züge in sechs Stunden unter. Und die erzielten Auktionseinnahmen steigen um 28

Prozent. Bei nur einer einzigen Minute zusätzlicher Toleranz (jeder Zug darf bis zu fünf Minuten später im Fahrplan stehen) stopft der Computer nach drei Tagen Rechenzeit sogar 737 Züge in denselben Zeitraum. Allerdings steigen die Auktionseinnahmen dann kaum mehr weiter.

Auch hier läßt sich also kräftig optimieren. Noch in diesem Frühjahr möchten die Ökonomen eine erste Version der sogenannten Auktionssprache festschreiben - welche Möglichkeiten Verkehrsunternehmen also erhalten, ihre Gebote für die Versteigerung auszudrücken. Eine Sprache ist das nur im übertragenen Sinn: Mituschs Mitarbeiter Andreas Tanner will eine PC-Software schreiben, in der die Anbieter auf einer Karte des Schienennetzes ihre Wünsche anklicken können. "Damit gehe ich dann zu den Eisenbahnunternehmen und lasse sie testen, ob das Programm ihren alltäglichen Anforderungen gerecht würde", sagt er.

Da stellt sich natürlich die Frage, ob nicht auch die Auktionsteilnehmer ihre Bietstrategien optimieren können. Marktschädliches Verhalten soll ja von vornherein möglichst ausgeschlossen sein. "Wir erwarten, daß die Auktion sich gegen jede Analyse für optimales Bietverhalten sperrt", mutmaßen die Trassenbörsler; aber erforschen müssen sie diese Frage trotzdem noch.

Ein weiterer Schritt Richtung Realität findet ebenfalls früher statt als gedacht. Das Forschungsministerium fördert die Trassenbörse weiter, hat aber das Institut für Verkehrswesen der Universität Hannover als zusätzlichen Partner hinzugezogen. Dort hat

man Erfahrung mit gleisgenauer Planung und kann prüfen, ob sich ein Optimierungsergebnis der Trassenbörse klaglos in einen detaillierten Fahrplan überführen läßt.

Insgesamt bleibt die Trassenbörse ein weltweit einzigartiges Vorhaben. Deutschland ist schon deshalb prädestiniert dafür, weil der Fall des Eisernen Vorhangs nicht nur die Bahnreform an zwei Hauptern erzwungen hat, sondern das Land auch auf Dauer zur europäischen Kreuzung im Schienenverkehr macht. Ob TGV, ICE oder Güterbahn - wenn sie in Europa von Ost nach West oder von Nord nach Süd über Grenzen hinweg fahren sollen, dann müssen sie fast alle hier durch. Das deutsche Schienennetz wird gemeinsam mit dem schweizerischen und dem österreichischen zum Herz der europäischen Bahn und braucht in Ilgmanns Sicht eine entsprechende Organisation. "Selbst wenn wir niemals Trassen versteigern - allein die Möglichkeit, Szenarien für die Nutzung und Erweiterung dieses Netzes durchzuspielen, wird schon neue Dimensionen der Erkenntnis eröffnen", schwärmt Trassenbörsen-Vordenker Gottfried Ilgmann.

Diese Erkenntnis könnte nicht zuletzt viel Geld wert sein. Bei strukturellen Optimierungen im Nahverkehr haben mathematische Modelle im Einzelfall schon zwanzig oder mehr Prozent der Kosten eingespart, ohne daß die Angebotsqualität darunter litt. Falls die Nutzungsoptimierung des deutschen Bahnnetzes ähnliche Potentiale birgt, dann ist beim Umsatz der deutschen Verkehrsbranche schnell die eine oder andere Milliarde zusammengespart. ●

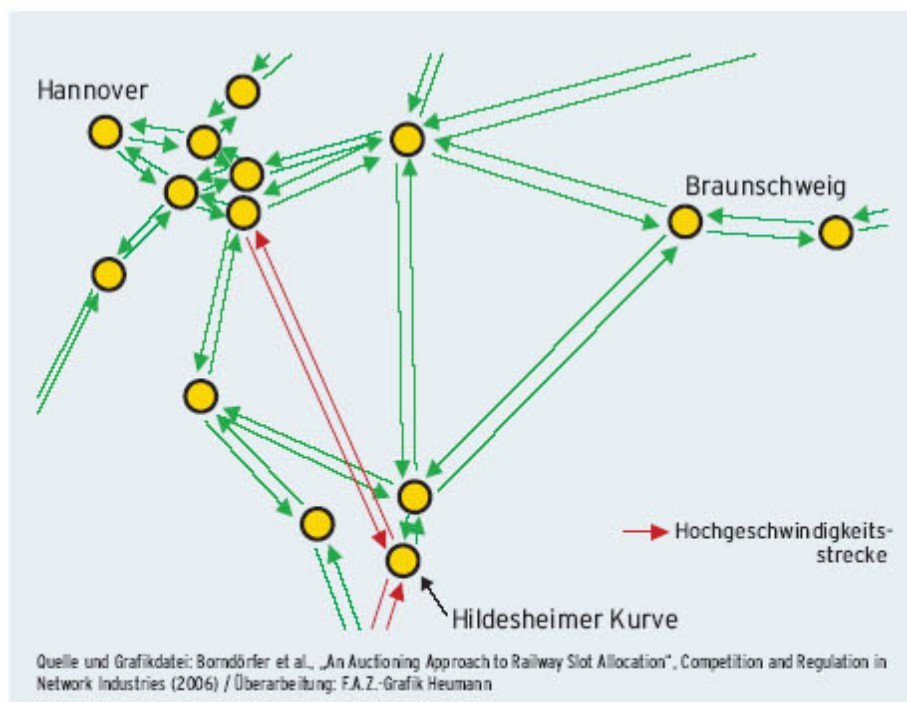
Knoten und Kanten: Die Mathematik der Trassenbörse

Ein Schienennetz ist eine Inkarnation von etwas, was Mathematiker einen „Graphen“ nennen: ein Gebilde aus Knödeln und verbindenden Linien, die fachsprachlich Knoten und Kanten heißen. Die Knoten des Trassenbörse-Graphen stellen „Pseudo-Stationen“ dar. Das sind alle Orte, wo Züge aufeinander zurasen und um ein und dasselbe Durchfahrtsrecht rangeln - also nicht nur Bahnhöfe und ihre Ein- und Ausfahrtgleise, sondern auch alle wichtigen Weichen und Kreuzungen sowie Ausweichpunkte auf eingeleisigen Strecken. So läßt sich jede Strecke in Dutzende oder Hunderte von versteigerungsfähigen Teilen stückeln.

Die Kanten des Graphen schreiben dann fest, welche Art von Zug welchen Abschnitt zwischen welchen Knoten in welcher Zeit durchfahren kann. Dabei kommt man vorerst mit ein paar grundlegenden Zugtypen gut aus. Unterschiedlichstes Verhalten in Antriebsart (Strom oder Diesel) oder Beschleunigungs- und Bremsdynamik sind damit vom ICE bis zur S-Bahn ausreichend genau beschrieben.

Die Gebote treten nun als weitere Dimension hinzu. Dabei wird ein angemeldeter Trassenwunsch in der Graphenwelt zu einer komplexen „UND“-Verknüpfung von zu belegenden Streckensegmenten. Da alternative Streckenführungen und Zeitspannen zugelassen sind, kommen auch „ODER“-Verknüpfungen dazu. All dies ist mit Gebotswerten belegt, jeder einzelne Aspekt läßt die Zahl der Möglichkeiten weiter explodieren.

Die Trassenwünsche so zu berücksichtigen ist dennoch praktisch. Es bedarf dann nur noch einiger Regeln, die, mathematisch gesprochen, als Randbedingungen den Lösungsraum eingrenzen (etwa: Züge fahren jede ihrer Teilstrecken genau einmal) - und schon erhält man eine wohldefinierte Aufgabe für eine bewährte mathematische Disziplin, nämlich die lineare Optimierung. Es entsteht ein „ganzzahliges Programm“, eine schwierige Variante dieser Art von Problemen. *kp.*



Am Anfang ist der Graph: *Ausschnitt aus dem Testnetz der Trassenbörsler.*