

Herausgegeben vom
Konrad-Zuse-Zentrum für Informationstechnik Berlin
Takustraße 7
D-14195 Berlin-Dahlem

Telefon: 030-84185-0
Telefax: 030-84185-125

e-mail: bibliothek@zib.de
URL: <http://www.zib.de>

ZIB-Report (Print) ISSN 1438-0064
ZIB-Report (Internet) ISSN 2192-7782

Kombilösung: Optimierung des Liniennetzes in Karlsruhe

Ralf Borndörfer* Ascan Egerer[†] Marika Karbstein* Ralf Messerschmidt[†]
Marc Perez[‡] Steven Pfisterer[§] Petra Strauß[§]

13. Juli 2018

AUSGANGSLAGE

Die Stadt Karlsruhe führt derzeit unter dem Label *Kombilösung* umfangreiche Baumaßnahmen zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur im Bereich der Innenstadt durch. Die Investitionen haben zwei Schwerpunkte. Zum einen wird entlang der Kaiserstraße –der Haupteinkaufsstraße und Fußgängerzone in Karlsruhe– ein Stadtbahntunnel mit einem südlichen Abzweig am Marktplatz verlegt. Zum anderen wird der motorisierte Individualverkehr in der südlich parallel gelegenen Kriegsstraße in einen unterirdischen Stadtbahntunnel verlagert, während gleichzeitig entlang der Kriegsstraße Stadtbahngleise verlegt werden. Auf diese Weise soll das Straßenbahnnetz schneller und leistungsfähiger werden. Die Kaiserstraße wird als reine Fußgängerzone attraktiver, während die Kriegsstraße mehr Platz für Fußgänger und Radfahrer bietet.

Diese Veränderungen der Infrastruktur erfordern eine Anpassung des Nahverkehrsnetzes, insbesondere auch der Linienverläufe. Bereits 2002 wurde im Rahmen der Standardisierten Bewertung des Projektes ein neues Ziel-Liniennetz bestimmt, das nach der Fertigstellung aller Umbaumaßnahmen in Betrieb gehen sollte. Die Ausgangsplanung der *Kombilösung* ist in Abbildung 1 rechts dargestellt. Zum Vergleich ist links das Liniennetz mit Stand vom November 2015 dargestellt, welches eine baustellenbedingte Zwischenlösung darstellt. Da seit 2002 die Bevölkerung in Karlsruhe um ca. 20 000 Personen zugenommen hat und einige Stadtentwicklungsprojekte umgesetzt wurden, erschien eine erneute Überprüfung der Netzplanung sinnvoll. Diese bot auch die Möglichkeit, das Liniennetz unter aktuellen Rahmenbedingungen zu überdenken und mögliche Qualitäts- und Effizienzgewinne zu eruieren. Zur Ermittlung dieser Potenziale kamen mathematische Optimierungsverfahren zum Einsatz.

Die Untersuchungen wurden von einem Konsortium aus vier Partnern durchgeführt. Die Federführung lag beim Zuse-Institut Berlin (ZIB) in Kooperation mit der Mathematische Optimierung und Datenanalyse AG (MODAL), die für die mathematische Optimierung verantwortlich war. Die Aufbereitung der Datengrundlagen zu Verkehrsangebot und Verkehrsnachfrage sowie die verkehrliche und kostenseitige Evaluierung wurden von der PTV Transport Consult GmbH (PTV) übernommen. Die Verkehrsbetriebe Karlsruhe (VBK) als Auftraggeber der Studie definierten die Anforderungen und Ziele. Die TTK Transport Technologie Consult GmbH (TTK), ein gemeinsames Tochterunternehmen der PTV und der Albtal-Verkehrs-Gesellschaft (AVG), erarbeitete verkehrliche Rahmenbedingungen und evaluierte die technische Machbarkeit der berechneten Lösungen.

DATENGRUNDLAGEN / VERKEHRSMODELL

Als wesentliche Datengrundlage wurde ein aktuelles Visum-Netzmodell des Untersuchungsraumes erstellt, in dem das ÖPNV-Verkehrsangebot und die Verkehrsnachfrage abgebildet wurden. Da das gesamte Nachfragepotenzial für die Liniennetzoptimierung nicht nur aus den heutigen Fahrgästen besteht, sondern in der Gesamtverkehrsnachfrage zu sehen ist, wurde sowohl eine Nachfragematrix für den ÖPNV als auch für den MIV aus vorhandenen Grundlagen, darunter auch Daten des Stadtplanungsamtes der Stadt Karlsruhe, erarbeitet und anhand von Zählwerten aktualisiert.

*Zuse-Institut Berlin (ZIB), Takustr. 7, 14195 Berlin

[†]VBK – Verkehrsbetriebe Karlsruhe GmbH Tullastraße 71, 76131 Karlsruhe

[‡]TransportTechnologie-Consult Karlsruhe GmbH (TTK), Gerwigstr. 53, 76131 Karlsruhe

[§]PTV Transport Consult GmbH, Stumpfstr. 1, 76131 Karlsruhe

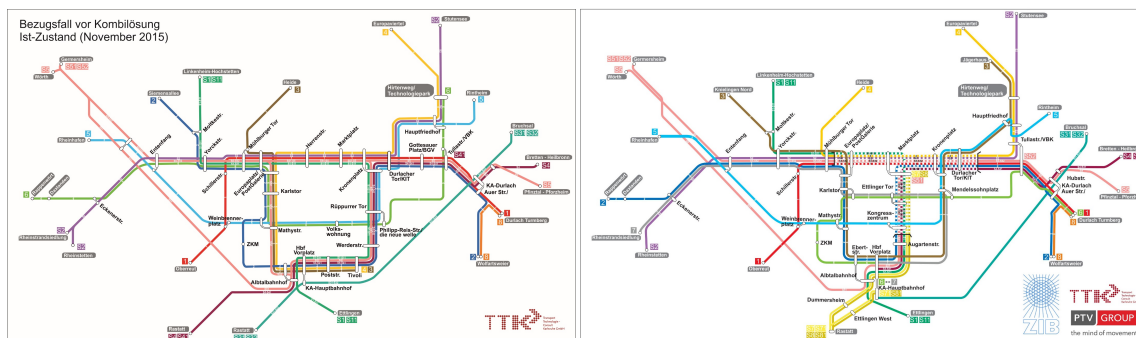


Abbildung 1: Links: Liniennetz (Straßenbahn und Stadtreregionalbahn) Stand November 2015. Rechts: Liniennetz Kombilösung (Straßenbahn und Stadtreregionalbahn), ursprünglicher Plan für 2021.

Die Modellierung des ÖPNV erfolgte leicht schematisiert; abgebildet wurden Linien und Taktfahrpläne für einen repräsentativen Werktag im Zeitraum 6:00 Uhr – 20:00 Uhr. Aufbauend auf dem Modell des Istzustandes wurde der Referenzfall modelliert. Der Referenzfall beinhaltet das ursprünglich für die Standardisierte Bewertung entwickelte Liniennetz der Kombilösung. Die Nachfragedaten wurden unter Berücksichtigung der bis 2025 erwarteten Strukturdatenentwicklung und unter Berücksichtigung des prognostizierten Nachfrageeffekts aus der Kombilösung auf das Prognosejahr 2025 fortgeschrieben. Damit die Daten an das Optimierungsprogramm übergeben und daraus auch wieder übernommen werden konnten, war das Netzmodell aufzubereiten. Zum Beispiel wurde die Anzahl der Verkehrszellen durch Kordonzellenbildung auf 538 reduziert, um die Rechenzeiten in Grenzen zu halten. Die Definition der Netzobjekte wie beispielsweise die Verkehrssysteme waren mit dem Optimierungsprogramm abzustimmen. Für die Verkehrsmodellierung galt generell, dass die Netzobjekte sehr sorgfältig attribuiert werden mussten (z.B. die Attributierung von Strecken, Knoten, Abbiegebeziehungen und Haltepunkten), da diese als Eingangsgrößen für die Optimierungsrechnung elementar sind. Eine der ersten Planungsaufgaben bestand darin, die möglichen Endhaltestellen von Linien zu definieren und diese im Netz entsprechend zu attributieren. Sämtliche Limitierungen, die für die Linienbildung relevant sind (z.B. welche Haltepunkte nur von Einfachtraktionen bedient werden können), wurden so in das Verkehrsmodell eingearbeitet.

OPTIMIERUNGSVERFAHREN

Zur Berechnung von Liniennetzen kam ein Verfahren der gemischt-ganzzahligen Optimierung zum Einsatz, das am Zuse-Institut Berlin entwickelt wurde. Dabei werden zunächst alle unter den gegebenen technischen und verkehrlichen Rahmenbedingungen möglichen Straßenbahnlinien generiert. Zu Beginn des Projektes waren dies ca. 27 000, mit zunehmender Detailtiefe der Untersuchung nahm die Anzahl aber immer weiter ab bis am Ende noch etwa 6 000 Linien übrig blieben. Diese Linien werden mathematisch optimal miteinander kombiniert und getaktet, so dass ein vorgegebenes Nachfragenvolumen bestmöglich befördert werden kann. Dabei werden technische Nebenbedingungen wie Abbiegeverbote, Linienskapazitäten, Reise- und Umsteigezeiten und Direktverbindungen berücksichtigt. Um eine gewisse Attraktivität auch auf schwächer ausgelasteten Strecken zu garantieren, werden Mindesttaktungen definiert, z.B. Mindestbedienhäufigkeiten für End- oder andere Haltestellen. Der aktuelle State-of-the-Art in der Linienplanung manifestiert sich in der gleichzeitigen Berechnung des Liniennetzes und der Reiserouten der Passagiere, so dass das Modell die Reaktion der Passagiere antizipiert. Technisch schwierig ist insbesondere die Behandlung der Umsteigevorgänge. Das hier verwendete Optimierungsmodell beinhaltet eine neuartige Methode, die eine effiziente exakte Behandlung von Direktverbindungen erlaubt und das Umsteigen ansonsten generell bestraft, siehe Borndörfer und Karbstein [2]. Dieser Ansatz wurde bereits 2010 erfolgreich zur Optimierung des Liniennetzes *Stadt+* in Potsdam eingesetzt [1]. Das Optimierungsziel ist immer ein bestmöglicher Kompromiss zwischen operativen und variablen Betriebskosten und Netzqualität, die als Gesamtbeförderungszeit der Passagiere gemessen wird. Diese Zielkriterien stehen im Konflikt und werden gegeneinander gewichtet. Durch stärkere oder schwächere Gewichtung eines Zielkriteriums und durch Variation der Vorgaben an die Planungsbedingungen können verschiedene Lösungen berechnet werden, die von eher kostengünstigen Liniennetzen bis zu qualitativ hochwertigen Angeboten reichen, die für alle Passagiere kurze und direkte Verbindungen bieten

und dafür etwas teurer sind. Aus einer Menge von solchen Pareto-optimalen Lösungen kann das Management dann den geeignetsten Kompromiss auswählen.

RAHMENBEDINGUNGEN DER PLANUNG

Die Untersuchungen in Karlsruhe konzentrierten sich auf die Neuplanung der Straßenbahnlinien. Dazu werden die Linien aller anderen Verkehrssysteme (Bus, Regional- und Regionalstadtbahn) auf ihren gegebenen Routen und Takten fixiert, d.h., diese Linien werden nicht verändert, aber sehr wohl beim Routing der Passagiere berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt für die Spitzenstunde, für die 14% der Gesamtnachfrage eines Tages unter Beachtung der Linienkapazitäten geroutet wird. Dabei sollte die Maximalkapazität jeder Linie höchstens zu 65% ausgeschöpft werden.

Für die Berechnung der Kapazitäten und der Betriebskosten werden standardmäßig 8-achsige Fahrzeuge zugrunde gelegt. Für eine Doppeltraktion wird ein aus einem 6- und einem 8-Achser zusammengesetztes Fahrzeug betrachtet. Die Maximalkapazitäten dieser Fahrzeuge entsprechen der Gesamtanzahl an Sitz- und Stehplätzen. Die Kosten setzen sich zusammen aus den mittleren Fahrzeugfixkosten und Betriebskosten pro Einsatzkilometer. Zur Berechnung der gesamten Fixkosten wird für jede Linie die Anzahl der Fahrzeuge ermittelt. Diese ergibt sich aus der Linienfahrzeit inklusive einer 12%igen Wendezeit und dem Takt der Linie. Die Betriebskosten werden in der Optimierung mit einem festen Faktor auf das Betriebsjahr hochgerechnet. Nach der Optimierung erfolgt dann eine detaillierte Einsatzplanung von 6-Achser bzw. 8-Achser Fahrzeugen auf die Linien (Einzel- bzw. Doppeltraktionen) und eine genauere Berechnung der Betriebskosten unter Verwendung von VISUM. Dazu werden die Betriebskosten jeder Linie auf das gesamte Betriebsjahr hochgerechnet.

Die Straßenbahn in Karlsruhe fährt grundsätzlich im 10-Minuten-Takt. Dies war auch eine Bedingung bei der Optimierung. Dadurch brauchen keine weiteren Mindestbedienhäufigkeiten betrachtet werden. Als Möglichkeit wurde diskutiert, Straßenbahnlinien im 20 Minuten-Takt zu erlauben, wenn sie sich auf jeder Strecke mindestens zu einem 10-Minuten-Takt verdichten. Allerdings stellt die betriebliche Umsetzung eines solchen Liniennetzes eine größere Herausforderung dar und die Akzeptanz der Passagiere ist unklar.

Im Laufe der Berechnungen schälte sich eine Vielzahl von weiteren Bedingungen heraus, die berücksichtigt werden sollten. Dazu gehörten technische Notwendigkeiten wie Maximalkapazitäten auf Streckenabschnitten, insbesondere in den neu-gebauten Tunneln, betrieblich Wünschenswertes wie die Vermeidung der Kombination von auslastungsstarken mit auslastungsschwachen Liniennetzen, sowie Bedingungen zur Erhöhung der Fahrgastzufriedenheit wie z.B. die Forderung nach einer Direktverbindung zwischen Hauptbahnhof und Europaplatz auf der Karlstraße.

ERGEBNISSE

Im Folgenden werden einige Ergebnisse aus dem Projekt vorgestellt. Zunächst wird das Spektrum an möglichen Fahrzeit- und Kostengewinnen aufgezeigt, wenn alle Straßenbahnlinien im 10-Minuten-Takt verkehren. Es folgt ein Ausblick, wie ein Liniennetz aussehen könnte, wenn auch Linien im 20-Minuten-Takt erlaubt sind, die sich überall zu einem 10-Minuten-Takt überlagern. Abschließend wird die aus einem optimierten Liniennetz abgeleitete Lösung *Qualität* vorgestellt und mit der ursprünglich geplanten Kombilösung verglichen.

Kosten vs. Fahrzeit

Um einen Überblick über die Wechselwirkung zwischen Fahrzeiten und Kosten zu bekommen, wurde die Gewichtung zwischen diesen beiden Kriterien in den Berechnungen variiert. Dabei wurden immer die wichtigsten betrieblichen Anforderungen berücksichtigt aber einige Grenzfälle zugelassen, um insbesondere das Potenzial für Kosteneinsparungen aufzuzeigen. Auf diese Weise entstehen sogenannte Pareto-optimale Lösungen, die jeweils für die betrachtete Gewichtung der Zielkriterien optimal sind. Pareto-optimale Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass jede andere Lösung, die in Bezug auf ein Kriterium (Fahrzeit oder Kosten) besser ist, in dem jeweils anderen Kriterium schlechter abschneidet. Abbildung 2 zeigt vier solcher Lösungen, bezeichnet als K, K+, F und F+ (K steht für Kosten, F für Fahrzeit).

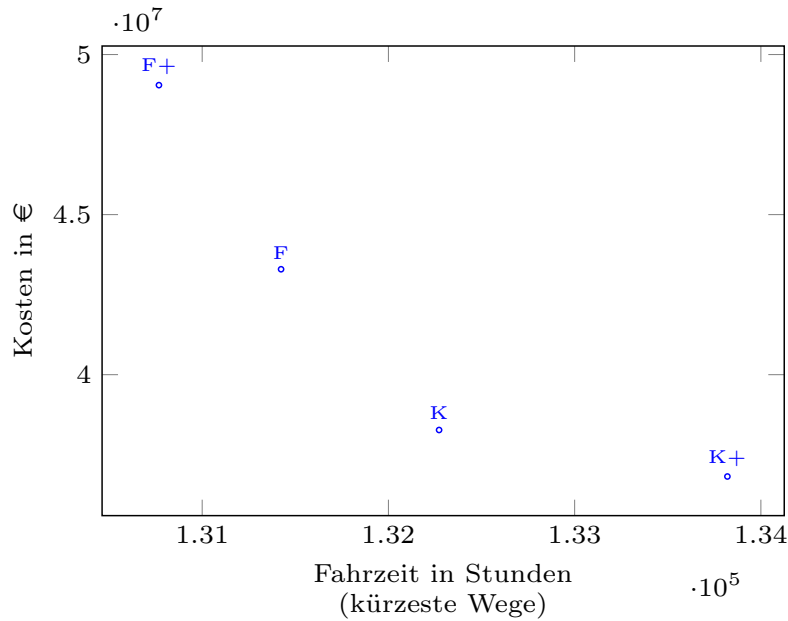


Abbildung 2: Pareto Lösungen für Straßenbahnliniennetze im 10-Minutentakt.

Die Abbildung zeigt, dass die Kostenerhöhung im Vergleich zur Fahrzeitreduzierung für die Lösungen K und K+ deutlich geringer ist als für die Lösungen K und F. Alle vier Liniennetze sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Lösung K+, in Abbildung 3 oben links, hat die geringsten Kosten, enthält aber einige grenzwertige Festlegungen. Zum Beispiel endet ein starker Linienast aus Richtung Forchheim Messe kurz vor dem Hauptbahnhof an der Haltestelle Tivoli. Diese Endhaltestelle ist nur schwer vermittelbar und zwar für 8-Achser ausgelegt, allerdings können die Fahrgäste dort nur an den ersten beiden Türen aussteigen. Außerdem sind nicht alle Außenäste ohne Umstieg an die Innenstadt angebunden, siehe z.B. Wolfartsweier. Die Lösung K+ ist damit betriebliche schwierig und sie würde möglicherweise zu Nachfragerückgängen führen, da das Angebot rund um den Hauptbahnhof und im Südosten der Stadt ausgedünnt ist.

Auf der anderen Seite stößt auch die Lösung F+, in Abbildung 3 Mitte rechts, an betriebliche Obergrenzen. Wie auch in der Kombilösung müßten im Tunnel in der Kaiserstraße vier Straßenbahnlinien im 10 Minutentakt verkehren. Zusammen mit den unveränderten Regionalstadtbahnlinien ist damit die maximal zulässige Menge an Fahrten erreicht. Diese enge Taktung ist aber nur fahrbar, wenn es zu keinerlei Störungen kommt. Für einen verlässlichen Betriebsablauf wäre daher eine Linie weniger im Tunnel wünschenswert. Hinzu kommt, dass mit der Lösung F+ der Budgetrahmen deutlich überschritten ist.

Insgesamt erscheint damit sowohl aus betrieblicher als auch aus wirtschaftlicher Sicht eine Lösung mit Kosten und Fahrzeiten im Bereich rund um die Lösungen F und K als sinnvoll.

Überlagerter 10-Minuten-Takt

Der 10-Minutentakt bei der Straßenbahn in Karlsruhe ist ein Service für die Fahrgäste, auf den nicht verzichtet werden soll. Dennoch wurde als Vergleich eine Lösung *Takt* berechnet, bei der Linien im 20-Minutentakt fahren dürfen, wenn sie sich auf allen Ästen mindestens zu einem 10-Minutentakt überlagern. Ein sich so ergebendes Netz ist in Abbildung 3 unten links dargestellt. Alle Linien, die im 20-Minutentakt verkehren sollen, sind gestrichelt dargestellt. Bei der Optimierung wurde die Anzahl der Linien mitbewertet, damit das Liniennetz nicht durch zu viele Straßenbahnlinien unübersichtlich wird.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die wichtigen Kennzahlen der berechneten Liniennetze wie Kosten, Fahrzeiten und Umstiege. Die Gesamtfahrzeiten sind dabei die Summe der Fahrzeiten auf

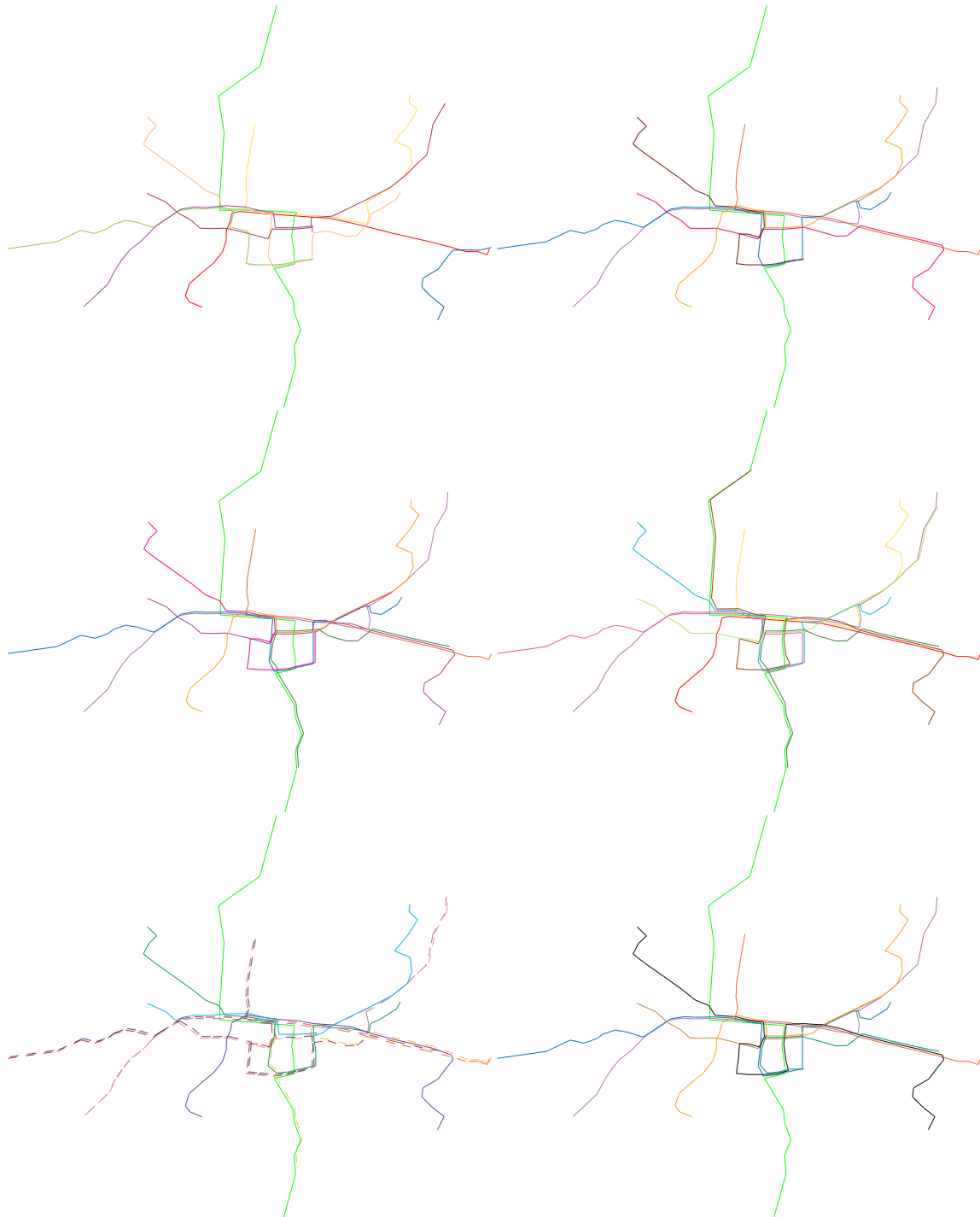


Abbildung 3: Von links oben nach rechts unten: Schematisch dargestellte Liniennetze (Straßenbahnlinien) K+, K, F, F+, Takt und Qualität. Alle durchgezogenen Linien verkehren im 10-Minutentakt, die gestrichelten Linien im 20-Minutentakt.

kürzesten Wegen mit (a) einer Umsteigestrafe von 8 Minuten pro Umstieg, (b) einer taktabhängigen Umsteigezeit und (c) einer taktabhängigen Umsteige- und Startwartezeit. Die Startwartezeit wurde dabei geringer gewichtet als die Umsteigewartezeit. *Kombi* bezeichnet die Kombilösung. Das Liniennetz *Takt* mit einem gemischten 10- und 20-Minutentakt enthält 10 Straßenbahnlinien und bietet damit etwas mehr Direktverbindungen bzw. weniger Gesamtumstiege als alle anderen Netze. Dadurch kann die Fahrzeit auf den kürzesten Wegen reduziert werden bei gleichzeitiger Kostenreduktion. Die Fahrzeiten sind auch besser, wenn die Umsteigezeiten von den Takten der Linien

#Strab	Wageneinsatzkosten [Mio€]	Betriebskosten (Jahr, [Mio€])	(a)Ges.fahrzeit: mit 8 Minuten pro Umstieg [T h]	(b)Ges.fahrzeit: mit taktabh. Umsteigezeit [T h]	(c)Ges.fahrzeit: mit taktabh. Umsteige- u. Startwartezeit [T h]	Gesamt- umstiege (Tag)
Kombi	9 9.99	38.09	131.78	135.51	146.05	124259
K+	8 7.83	28.99	133.82	137.71	148.42	135302
K	7 7.83	30.44	132.27	136.03	146.66	128482
F	9 8.91	34.76	131.43	135.19	145.79	126229
F+	9 9.87	39.18	130.77	134.51	145.05	122730
Takt	10 8.31	32	129.99	134.86	147.21	119261
Qualität	8 8.79	34.14	131.71	135.46	146.01	126138

Tabelle 1: Vergleich verschiedener Liniennetze bzgl. Kosten, Fahrzeiten und Anzahl an Umstiegen.

abhängen, zu denen umgestiegen wird (d.h., die Umsteigezeit entspricht der halben Taktzeit). Einzig die Berücksichtigung der Startwartezeiten erhöht die Gesamtreisezeit deutlich stärker als bei Liniennetzen mit reinem 10-Minutentakt. Dabei ist allerdings nicht berücksichtigt, dass Passagiere in diesem Fall wahrscheinlich auf den zweitkürzesten Weg zurückgreifen würden, der dann vielleicht schneller ist als z.B. auf die Direktverbindung zu warten. Würde ein Netz mit gemischtem 20- und 10-Minutentakt für die Straßenbahn tatsächlich in Frage kommen, müsste man deshalb noch genauere Fahrzeitanalysen durchführen. Analog müsste auch eine genauere betriebliche Analyse erfolgen. Der Grund ist, dass die Überlagerung zweier Linien im 20-Minutentakt nicht immer einen exakten 10-Minutentakt ergeben muss, da verschiedene Linienäste miteinander im Konflikt stehen können. Außerdem muss beachtet werden, dass ein reiner 10-Minutentakt sich besser merken lässt als ein gemischter und überlagernder 10- und 20-Minutentakt. Allerdings könnte der letzte Punkt durch die steigende Verwendung von Routeninformationssysteme über z.B. mobile Telefone kompensiert werden.

Lösung Qualität und Vergleich mit der Kombilösung

Wie bereits erwähnt hat die Kombilösung, genauso wie die Lösung F+, das Problem, dass die Maximalanzahl an Linien im Tunnel Kaiserstraße ausgeschöpft ist und keinen Spielraum mehr bietet. Dennoch kann die Kombilösung zur Orientierung in Bezug auf gewünschte Fahrzeiten herangezogen werden. Ein Vergleich ergibt, dass die Fahrzeiten der Lösung K in allen Bewertungen etwas über den Fahrzeiten der Kombilösung liegen. Die Fahrzeiten der Lösung F sind dagegen sogar ein wenig geringer als die Fahrzeiten der Kombilösung. Die Kosten liegen sowohl bei K als auch bei F deutlich unter den Kosten der Kombilösung.

Da ein möglichst attraktives Liniennetz gesucht wird, wurde beschlossen, die Lösung F, siehe Abbildung 3 Mitte links, genauer zu untersuchen. Diese Lösung hat zwei Eigenschaften, die etwas kritisch gesehen wurden. Zum einen bedient –neben den in geringerem Takt verkehrenden Regionalstadtbahnlinien– nur die Straßenbahnlinie S1/S11 die Direktverbindung Hauptbahnhof Marktplatz über Ettlinger Straße, zum anderen führt die Linie zwischen Durlach Bahnhof und Battstraße (in Abbildung 3 olivgrün) nicht direkt am Hauptbahnhof vorbei. Zudem ist auf dem parallelen Stück zur S1/S11 (grüne Linie) eine Verstärkerfahrt für die S1/S11 geplant. Es gab daher einen Änderungsvorschlag von Seiten der Verkehrsplaner der VBK, der diese Kritikpunkte ausräumt. Das so entstandene Liniennetz *Qualität* ist in Abbildung 3 unten rechts dargestellt.

Vergleicht man Kosten und Fahrzeiten von F und Qualität, so sind die Werte recht ähnlich. Bei den Kosten ist das Liniennetz *Qualität* etwas besser, bei den Fahrzeiten ist das Liniennetz F etwas besser. Beide Netze bieten damit sehr gute Kennzahlen.

Bei den Berechnungen der Liniennetze wurden die Kosten wie dargestellt approximativ bestimmt. Eine detaillierte Kostenberechnung wurde im Nachgang mit Visum durchgeführt. Dabei wurden die Auslastungen der einzelnen Linien zu Spitzenzeiten analysiert und eine überschlägige Einsatzplanung von 6- und 8-achsigen Fahrzeugen sowie von erforderlichen Doppeltraktionen vorgenommen.

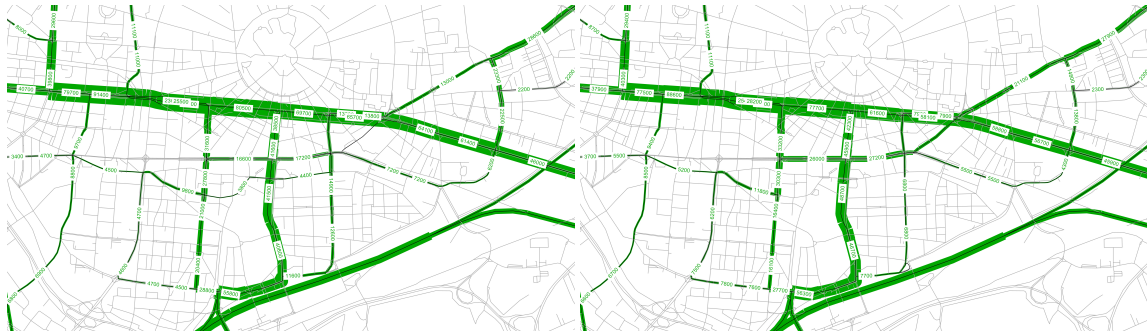


Abbildung 4: Auslastung des Straßenbahnnetzes für Kombi (links) und Qualität (rechts). Im Vergleich zur Kombilösung kann das Qualitätsnetz einen Teil der stark ausgelasteten Kaiserstraße auf die Kriegsstraße verlagern.

Unter Berücksichtigung von Mindestwendezeiten wurden Fahrzeugbedarf, Leistungsdaten und Kosten differenziert bestimmt.

Insgesamt bietet die Lösung Qualität danach ein Kostenreduktionspotenzial von ca. 5% gegenüber dem ursprünglichen Netz der Kombilösung und das insgesamt beste Nutzen-Kosten-Verhältnis. Abbildung 3 zeigt die Umlegung der Nachfrage für die Fälle Kombi und Qualität. Im Vergleich zur Kombilösung kann das Qualitätsnetz einen Teil der Nachfrage von der stark ausgelasteten Kaiserstraße auf die Kriegsstraße verlagern.

Für die Verkehrsbetriebe Karlsruhe und die Stadt Karlsruhe war es wichtig, die geänderten Rahmenbedingungen der letzten 15 Jahre bei der Überprüfung des Ziel-Liniennetzes zu berücksichtigen. Die Nutzung modernster Planungsmethoden ermöglichte die Entwicklung und Bewertung diverser unterschiedlicher Linienvarianten. Die verkehrliche Sinnhaftigkeit und die betriebliche Durchführbarkeit und Fahrplanstabilität wurde durch die stetige Begleitung der Fachplaner sowie durch betriebliche Simulationen, auch unter Einwirkung von Störeinflüssen, bestätigt.

Das herausgearbeitete Liniennetz wird nun mit allen Veränderungen den politischen Fraktionen, diversen Fachkreisen und anschließend der Öffentlichkeit vorgestellt. Es bietet die beste Grundlage für eine bestmögliche Fahrgastnachfrage unter wirtschaftlichen Bedingungen und sichert somit nachhaltig das bewährte Angebot des ÖPNV in Karlsruhe.

REFERENZEN

- [1] Ralf Borndörfer, Isabel Friedow, and Marika Karbstein. Optimierung des Liniennetzes 2010 in Potsdam. *Der Nahverkehr*, 30(4):34–39, 2012.
- [2] Ralf Borndörfer and Marika Karbstein. Metric inequalities for routings on direct connections with application in line planning. *Discrete Optimization*, 18:56 – 73, 2015.