



Leistungsfähigkeit des Stadtbahntunnels der "Kombilösung Karlsruhe"

Auftraggeber:

Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND)
Landesverband Baden-Württemberg e.V.
Regionalverband Mittlerer Oberrhein

München, 29. Januar 2010



Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangssituation und Aufgabenstellung	3
2.	Vorgehensweise und Methode der Untersuchung	5
3.	Betriebsprogramm im geplanten Stadtbahntunnel	7
4.	Ermittlung der theoretisch möglichen Kapazität	9
4.1	Theoretisch mögliche Kapazität ohne Berücksichtigung von Fahrstraßenkreuzungen	9
4.1.1	Minimale Zugfolgezeit in anderen Städten	9
4.1.2	Theoretische Herleitung der minimalen Zugfolgezeit	10
4.2	Zwangspunkte der Fahrplangestaltung: Fahrstraßenkreuzungen und Betrieb auf dem Südast	13
4.2.1	Auswirkung der Fahrstraßenkreuzungen im Gleisdreieck Marktplatz	13
4.2.2	Fahrplanzwänge im Stadtbahntunnel durch den Betrieb auf dem Südast	15
4.3	Ergebnis hinsichtlich der theoretisch möglichen Kapazität	16
4.4	In der Praxis erreichbare Kapazität	16
4.5	Absehbare Engpässe im unmittelbaren Zulauf auf den Stadtbahntunnel	17
4.5.1	Weitere Störeinflüsse auf den Betrieb	17
4.5.2	Fehlen von Rückfallebenen zum Ausgleich von Betriebsstörungen	19
5.	Fazit	20
	Quellenangaben	21

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Minimale Zugfolgezeit bei voll signalisiertem Betrieb
Abb. 2:	Minimale Zugfolgezeit bei Einfahrt in eine Haltstelle mit "Fahren auf Sicht"
Abb. 3:	Fahrstraßenkreuzungen am Marktplatz
Abb. 4:	Zeitablauf bei der Befahrung der Fahrstraßenkreuzung Marktplatz-Süd
Abb. 5:	Detaildarstellung des Bildfahrplans Tunnel Kaiserstraße im Bereich der Fahrstraßenkreuzungen am Marktplatz
Abb. 6:	Bildfahrplan Tunnel Kaiserstraße (Mühlburger Tor - Durlacher Tor)
Abb. 7:	Bildfahrplan Ettlinger Straße (Marktplatz - Augartenstraße)



1. Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Karlsruhe hat, verglichen mit Städten ähnlicher Größe, nicht nur ein hervorragendes Angebot im Straßenbahnverkehr, sondern verfügt zusätzlich über ein Netz von Zweisystem-Stadtbahnlinien, die weit in das Umland hinaus reichen. Fast alle Straßenbahnen befahren zumindest in Teilen die große Ost-West-Achse Kaiserallee/Kaiserstraße, auf der sich der Straßenbahn- und Stadtbahnverkehr stark konzentriert. Zur weiteren Verbesserung dieses Angebots in der Karlsruher Innenstadt ist das Projekt "Kombilösung" geplant, das eine Kombination aus neuem Stadtbahntunnel unter der Kaiserstraße, neuer oberirdischer Straßenbahnstrecke in der Kriegsstraße und neuem Straßentunnel unter der Kriegsstraße darstellt. Ein wesentliches Vorteil des neuen Stadtbahntunnels wird von den Befürwortern des Projekts in der Beseitigung der Straßenbahngleise in der Kaiserstraße gesehen, die dann zu einer reinen Fußgängerzone ohne Straßenbahnverkehr umgestaltet werden soll.

Hierbei ist eine mehrstufige Vorgehensweise geplant: In einer ersten Baustufe soll zusätzlich zur oberirdischen Straßenbahnstrecke in der Kaiserstraße eine unterirdische Trassenführung unter dieser Straße gebaut werden, wobei als Realisierungshorizont das Jahr 2015/2016 angestrebt wird. In einer zweiten Stufe, also zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt, soll der Straßentunnel unter der Kriegsstraße verwirklicht werden, um dann in einer dritten Stufe auf der vom Kfz-Verkehr frei gewordenen Straßenfläche der Kriegsstraße eine neue oberirdische Straßenbahntrasse zu bauen, parallel zum Stadtbahntunnel unter der Kaiserstraße. Erst zu diesem Zeitpunkt soll dann die oberirdische Straßenbahnstrecke durch die Kaiserstraße entfallen.

In der Karlsruher Öffentlichkeit wird jedoch die Frage gestellt: Reicht die Kapazität der unterirdischen Straßenbahnstrecke unter der Kaiserstraße überhaupt aus, um langfristig auf die oberirdischen Gleise in der Kaiserstraße verzichten zu können, nachdem die zusätzliche Straßenbahnstrecke durch die Kriegsstraße fertiggestellt ist? Wenn nein, so ist zu befürchten, daß zwar zahlreiche Straßenbahn- und Stadtbahn-Züge den Tunnel unter der Kaiserstraße benutzen, aber zusätzlich eine große Zahl an Straßenbahn-Fahrzeugen weiterhin oberirdisch durch die Kaiserstraße rollt. Der in der Öffentlichkeit oft als wichtigstes Ziel formulierte Zielzustand, die Fußgängerzone straßenbahnfrei zu bekommen, würde dann verfehlt.

Da in einem Straßenbahntunnel andere technische Voraussetzungen vorliegen als an der Oberfläche, ist der heutige Betrieb der oberirdischen Straßenbahnstrecke nicht 1:1 auf eine entsprechende Tunnelstrecke übertragbar. Deshalb läßt sich der heutige oberirdische Verkehr nicht direkt auf den Verkehr im Tunnel übertragen. Im Tunnel muß der Straßenbahnverkehr mit Si-



gnalen und Blockstellen geregelt werden (sog. signalisierter Betrieb) - vergleichbar mit dem Betrieb einer Eisenbahnstrecke, während an der Oberfläche auf Sicht gefahren wird.

Erschwerend kommt beim Stadtbahntunnel hinzu, daß im Tunnel am Karlsruher Marktplatz für die Straßenbahn ein Gleisdreieck vorgesehen ist, das in der aktuell geplanten Form dazu führt, daß gleich an drei Stellen die Straßenbahn-Züge beim Linksabbiegen ein Gleis der Gegenrichtung kreuzen müssen. Diese "Fahrstraßenkreuzungen", die in der Abb. 3 schematisch dargestellt sind, können gegenseitige Behinderungen der Züge verursachen, besonders im Verspätungsfall, und sie erfordern ein kompliziertes Fahrplan- und Betriebskonzept.

Deshalb ist es notwendig, die Leistungsfähigkeit des in der Kaiserstraße geplanten Stadtbahntunnels zu ermitteln, wobei mögliche Engpässe hinsichtlich Streckenkapazität bzw. Störeinflüsse in der Betriebsabwicklung aufzudecken sind - insbesondere im unterirdischen Gleisdreieck am Marktplatz mit den genannten Fahrstraßenkreuzungen.

Die zentrale Aufgabenstellung ist, einen Nachweis der Umsetzbarkeit des Linienschemas zu führen, das der Standardisierten Bewertung zugrundeliegt. Hierbei muß unterschieden werden, ob der Fahrplan in der Theorie (ohne Berücksichtigung von diversen Störquellen) "fahrbar" und somit umsetzbar ist und ob er, falls er theoretisch fahrbar ist, in der Praxis haltbar sein wird.



2. Vorgehensweise und Methode der Untersuchung

Im einzelnen werden hierfür die folgenden **Arbeitsschritte** durchgeführt:

- Analyse des geplanten Betriebsprogrammes, das der Standardisierten Bewertung der Kombilösung zugrunde liegt
- Überprüfung der betrieblichen Machbarkeit des geplanten Betriebsprogrammes durch Ermittlung der minimalen Zugfolgezeiten bei verspätungsfreiem Betrieb
- Identifikation von möglichen Ursachen für Abweichungen vom Fahrplan (Verspätungen)
- Auswirkungen von Verspätungen auf die Kapazität
- Ermittlung von Kapazitätsreserven für weitere Linien bzw. Angebotsverdichtungen einzelner Linien auf 5-Minuten-Takt.

Bezüglich der verwendeten **Untersuchungsmethoden** ist folgendes zu sagen:

Zur Ermittlung der minimalen Zugfolgezeiten im geplanten Stadtbahntunnel

- werden zum einen Recherchen über die minimale Zugfolgezeiten bei vergleichbaren Stadtbahn-Betrieben im Öffentlichen Personennahverkehr (ÖPNV) anderer Städte durchgeführt
- findet zum zweiten eine Berechnung der minimalen Zugfolgezeiten der Stadtbahnzüge in Karlsruhe anhand der technischen Daten dieser Fahrzeuge, des Signalsystems und der Zeitdauer des Fahrgastwechsels an den Haltestellen statt.

Als Methode zur Überprüfung des gesamten Betriebsprogramms im Zusammenspiel aller Stadtbahnlinien im geplanten Tunnel werden **computergestützte Betriebssimulationen** eingesetzt, aus denen schließlich **Bildfahrpläne** (graphische Fahrpläne) generiert werden. Hierbei werden mit Hilfe eines Computerprogramms für den Zeitraum von 20 Minuten in der Hauptverkehrszeit (HVZ) werktags alle fahrplanmäßigen Fahrten von Stadtbahnzügen der zu untersuchenden Bahnstrecke incl. aller Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und aller fahrplanmäßigen Haltezeiten an Zwischenhaltestellen simuliert, indem ständig die Fahrtstrecke neu errechnet wird, welche das betreffende Fahrzeug innerhalb der letzten Zehntelsekunde zurücklegt hat.



Soweit bestimmte Zugfahrten aufgrund des Fahrplans zur selben Zeit erfolgen, laufen die Fahrsimulationen gleichzeitig ab.

Die Betriebssimulationen bzw. das Erzeugen von Bildfahrplänen erfolgt in einem iterativen Verfahren mit zahlreichen Durchläufen. Hierbei werden Randbedingungen, beispielsweise die Abfahrtszeiten einzelner Züge oder die Dauer von Zwischenhalten, immer wieder leicht modifiziert, bis ein Optimum erreicht wird.

Jede simulierte Fahrt wird graphisch als Weg-Zeit-Diagramm dargestellt, dessen Linienverlauf umso flacher ist, je höher die simulierte Fahrgeschwindigkeit ist, und umso steiler, je geringer die Geschwindigkeit ist. Senkrecht verlaufende Linien bedeuten eine Geschwindigkeit von 0 km/h und somit Stillstand des Zuges, also den Zwischenhalt an einer Haltestelle. Die Weg-Zeit-Diagramme aller simulierten Zugfahrten zusammen werden in einer gemeinsamen Graphik ausgewiesen, welche als "Bildfahrplan" bezeichnet wird (siehe Abb. 5 bis 7).

Die computergestützten Fahrsimulationen benötigen zum einen streckenseitige Inputdaten, insbesondere die Kilometrierung, alle Geschwindigkeitsbeschränkungen, die jeweilige Längsneigung und die genaue Position der Haltebereiche, und zum anderen fahrzeugseitige Inputdaten, also die relevanten technischen Daten der Züge, beispielsweise ihre Leistung und ihre Masse.

Alle Fahrzeiten, die per Computerprogramm in der vorliegenden Untersuchung errechnet werden, enthalten einen Fahrzeit-Zuschlag von 20%, der zu den technisch möglichen Fahrzeiten addiert wird. Umgekehrt kann man hier auch von einer Fahrzeitreserve von 20% sprechen. Der Zuschlag von 20% bedeutet letztlich, daß die konkrete Simulation mit einer Höchstgeschwindigkeit der Züge von 50 km/h stattfindet, obwohl die zulässige Geschwindigkeit im Tunnel 60 km/h beträgt. In den Haltezeiten ist dieser Zuschlag logischerweise nicht enthalten. Ebenso hat dieser Zuschlag keinen Einfluß auf die mögliche Zugfolgezeit. Ein derartiger Fahrzeit-Zuschlag ist bei allen öffentlichen Verkehrsmitteln üblich, die nach einem festen Fahrplan verkehren, also nicht nur bei Zügen und Linienbussen, sondern auch bei Linienflugzeugen. Mit diesem Zuschlag wird eine zeitliche Reserve geschaffen, die es im Fall von geringen Verzögerungen und Störungen im Betriebsablauf (beispielsweise durch Bauarbeiten bedingt) immer noch ermöglicht, die in den Fahrplantabellen ausgedruckten Ankunfts- und Abfahrtszeiten einzuhalten. Für die Reisenden wird das Verkehrsmittel, das sie benutzen wollen, auf diese Weise verlässlicher.



3. Betriebsprogramm im geplanten Stadtbahntunnel

Aus dem Erläuterungsbericht der KASIG zum Antrag auf Planfeststellung des Stadtbahntunnels Kaiserstraße lassen sich die Linien-Nummern der für diesen Tunnel vorgesehenen Stadtbahnlinien entnehmen.¹ Diese Linien sollen alle im 10-Minuten-Takt betrieben werden - mit Ausnahme der Linie S4 und der S1-Express-Züge, die im 20-Minuten-Takt verkehren sollen. Somit ergibt sich im zukünftigen Stadtbahntunnel das in Tab. 1 dargestellte Betriebsprogramm:

Tab. 1: Betriebsprogramm im geplanten Stadtbahntunnel - Fahrtrichtung West-Ost bzw. West-Süd bzw. Süd-Ost

Linien-Nr.	Fahrplanktakt	Zugzahl pro Stunde
Fahrtrichtung West -> Ost:		
S2	alle 10'	6
S5	alle 10'	6
1	alle 10'	6
4	alle 10'	6
Zwischensumme		24
Fahrtrichtung West -> Süd:		
S1	alle 10'	6
S1-Express	alle 20' (nur HVZ)	3
Zwischensumme		9
Gesamtsumme West -> Ost / Süd		33
=> alle 109,1 Sekunden ein Zug pro Richtung		
=> 5,5 Züge pro Richtung im 10-Minuten-Intervall		
Fahrtrichtung Süd -> Ost:		
S4	alle 20'	3
2	alle 10'	6
Zwischensumme		9
Gesamtsumme West / Süd -> Ost		33
=> alle 109,1 Sekunden ein Zug pro Richtung		
=> 5,5 Züge pro Richtung im 10-Minuten-Intervall		



Die Tab. 1 zeigt auf, daß in beiden Tunnelabschnitten westlich und östlich des Marktplatzes in der HVZ jeweils 33 Züge pro Stunde und Richtung verkehren sollen, was eine durchschnittliche Zugfolge im Abstand von 109,1 Sekunden ergibt.

Hinzu kommen noch auf dem Südast maximal weitere 3 Züge pro Stunde und Richtung (S8 und S41) die nur bis Marktplatz verkehren. Zusammen mit den zwei mal 9 Zügen pro Stunde und Richtung, die den Ostast und den Westast befahren, ergeben sich somit für den Südast nur 21 Züge pro Stunde und Richtung. Das heißt, der Südast muß nur 2/3 der Züge aufnehmen, die für die Strecke unter der Kaiserstraße vorgesehen sind. Somit liegt der West-Ost-Tunnel unter der Kaiserstraße im Mittelpunkt des Interesses.

Es stellt sich nun die Frage, ob die unter der Kaiserstraße geplante durchschnittliche Zugfolgezeit von 109 Sekunden tatsächlich erreichbar ist. Hierzu ist zunächst der Blick auf die theoretisch mögliche Kapazität der Stadtbahnstrecke im Tunnel unter der Kaiserstraße ohne Berücksichtigung des Abzweigs am Marktplatz zu werfen. Anschließend ist der praktische Betrieb zu betrachten.



4. Ermittlung der theoretisch möglichen Kapazität

4.1 Theoretisch mögliche Kapazität ohne Berücksichtigung von Fahrstraßenkreuzungen

Die "Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen" (BOStrab) legt in §49 die Fahrordnung für Straßenbahnzüge fest. Hierbei gilt für das Befahren von Tunnels, daß Züge straßenabhängiger Bahnen in Tunnels nicht auf Sicht fahren dürfen, außer wenn es sich um kurze Tunnels handelt und wenn der Betriebsbremsweg einsehbar ist.² Da es sich beim geplanten Tunnel unter der Kaiserstraße nicht um einen kurzen Tunnel handelt - die Tunnellänge soll immerhin 3,6 km betragen - und der Bremsweg beim Befahren des Gleisdreiecks aufgrund der Tunnelführung und der engen Kurven keinesfalls einsehbar ist, werden die Stadtbahnzüge signalgesteuert fahren, wobei im weiteren Verlauf auch noch Ausnahmen zu diskutieren sind. Im Erläuterungsbericht zum Planfeststellungsverfahren wird festgehalten: "Innerhalb des Tunnels wird der Betriebsablauf durch Zugsicherungstechnik geregelt (...)"³.

4.1.1 Minimale Zugfolgezeit in anderen Städten

Die **minimale Zugfolgezeit** liegt nach Angaben in der Fachliteratur bei signalgesteuertem Betrieb von Stadtbahn-, U- und S-Bahn-Systemen ohne Fahrstraßenkreuzungen bei 85 bis 90 sec, was eine **Kapazität** von 40 bis 42,4 Züge pro Stunde und Richtung ergeben würde. 85 Sekunden als technisch mögliche Mindest-Zugfolgezeit werden vom Hersteller Siemens bei der Pariser Metro "Meteor" genannt, wobei im Regelverkehr allerdings nur 105 Sekunden erreicht werden.⁴ In Japan gibt es U-Bahn-Linien, die im Regelverkehr zur Hauptverkehrszeit mit einer Zugfolgezeit von 90 Sekunden betrieben werden.⁵ Eine deutliche Unterschreitung der Marke von 2 Minuten ist letztlich nur unter besonderen Voraussetzungen erfolgreich, so beispielsweise in Japan durch die große Disziplin der Fahrgäste, und bei der Pariser Metro durch besondere technische Einrichtungen wie Bahnsteigtüren und automatischer Betrieb, was in Karlsruhe aufgrund der eingesetzten Fahrzeuge nicht möglich ist.

In Köln gibt es an einzelnen Stationen Zugfolgen von 100 bis 120 Sekunden, was im praktischen Betrieb häufig zu Problemen führt. Diese besonders dichten Zugfolgen sollen nach Inbetriebnahme der neuen Nord-Süd-U-Bahn der Vergangenheit angehören.



Eine der dichtesten Zugfolgen des Schienenverkehrs in Deutschland findet sich bei der S-Bahn München: Im zentralen Streckenabschnitt Donnersbergerbrücke - Ostbahnhof verkehren in der Hauptverkehrszeit die S-Bahn-Züge im Durchschnitt alle 120 Sekunden. Diese kurze Zugfolge ist in München deshalb möglich, weil an den aufkommensstarken Bahnhöfen separate Bahnsteige für Einsteiger und Aussteiger vorhanden sind. Eine "Zweite S-Bahn-Stammstrecke" ist in München seit rund 10 Jahren in der Planung und grundsätzlich unumstritten - lediglich um die Streckenführung der neuen Trasse wird intensiv gerungen. Ein Ziel der zweiten Stammstrecke ist es, die durchschnittliche Zugfolgezeit der ersten Stammstrecke auf 150 Sekunden zu erhöhen, um so einen größeren Spielraum zur Aufholung von Verspätungen zu schaffen.

4.1.2 Theoretische Herleitung der minimalen Zugfolgezeit

Eine theoretische Berechnung, die in Abb. 1 visualisiert ist, ergibt eine technisch mögliche Zugfolge von 44 sec ab Ausfahrt eines Stadtbahnzuges aus einer Haltestelle bis zum Halt des nächsten Zuges in derselben Haltestelle.

Hierbei ist jedoch noch kein Zeitbedarf für das Aus- und Einsteigen der Fahrgäste (Fahrgastwechsel) und die damit zusammenhängenden, technisch bedingten Zeiten wie beispielsweise für das Öffnen und Schließen der Türen berücksichtigt. Deswegen ist nachstehend die Ermittlung der Haltezeit am Beispiel der stark frequentierten Haltestelle Lammstraße dargestellt, aufgliedert nach Fahrgastwechselzeit und technisch bedingten Zusatzzeiten:

Hierbei hängt der reine Zeitbedarf für den Fahrgastwechsel im wesentlichen davon ab, wie viele Fahrgäste pro Tür ein- und aussteigen. Diese Zahl ist abhängig von zwei Einflußgrößen:

- (1) von der Anzahl der Sitz- und Stehplätze, die einer Tür zugeordnet sind
- (2) von der Bedeutung der Haltestelle und somit vom Verhältnis der Ein- und Aussteiger zur Gesamtkapazität des Zuges.

zu (1): In Karlsruhe werden im wesentlichen zwei Typen von Fahrzeugen eingesetzt: Bei den Stadtbahn-Fahrzeugen, deren Türen sich auf beiden Seiten befinden, sind bis zu 7 Sitzgruppen mit je 4 Sitzen einer Tür zugeordnet, während bei den Straßenbahn-Fahrzeugen mit bis zu 6 Sitzgruppen pro Tür zu rechnen sind. Entsprechend der Berechnungsmethode in der Fachliteratur ergeben sich die in Tab. 2 genannten Fahrgastwechselzeiten:



Tab. 2: Fahrgastwechselzeiten (in Sekunden, gerundet) pro Haltestelle⁶

Anteil der Ein- und Aussteiger	Fahrzeugtyp			
	S-Bahn		Straßenbahn	
	ohne Trittstufe	mit Trittstufe	ohne Trittstufe	mit Trittstufe
30%	27	32	23	28
50%	45	54	38	46

Bei der Berechnung der Fahrgastwechselzeiten ist danach zu unterscheiden, ob vom Bahnsteig aus ein stufenloser Ein- und Ausstieg möglich ist oder ob eine Trittstufe zu überwinden ist. Es ist anzunehmen, daß bei den meisten Ein- und Ausstiegstüren der Karlsruher Stadtbahnfahrzeuge auch zukünftig noch eine Trittstufe vorhanden sein wird, die ein Hindernis für Rollstuhlfahrer, Gehbehinderte, Blinde, Personen mit schwerem Gepäck oder Mütter mit Kinderwagen und selbst für "normale" Fahrgäste darstellt. Deshalb muß mit einer verlängerten Fahrgastwechsel-Dauer gerechnet werden. Unterstellt man eine Höhendifferenz von rund 20 cm zwischen Bahnsteig und Wagenfußboden, so verlängert sich die Fahrgastwechselzeit um rund 20%.⁷

Für diesen technischen Zeitaufwand werden im folgenden einheitlich 9 sec zusätzlich zur Fahrgastwechselzeit angesetzt. Der Ruck beschreibt physikalisch den Übergang vom Stillstand in eine gleichförmige Beschleunigung bzw. umgekehrt den Übergang von einer gleichförmigen Verzögerung zum Stillstand.

Tab. 3: Technisch bedingten Zusatz-Haltezeiten:

Zuschlag Ruck für Halt	1,0 sec
Türöffnung	2,5 sec
Tür schließen	2,5 sec
Prüf- und Fehlermeldezeit	1,0 sec
Reaktionszeit Fahrer	1,0 sec
Zuschlag Ruck für Anfahren	1,0 sec
Summe Zusatz-Haltezeit	9,0 sec



Somit lassen sich folgende **minimale Zugfolgezeiten** ermitteln, die sich als Summe aus

technisch möglicher Zugfolgezeit + Fahrgastwechselzeit + Zusatz-Haltezeit

zusammensetzen, wobei noch zu unterscheiden ist, ob eine Trittstufe beim Ein- und Aussteigen zu überwinden ist oder nicht. Hierbei wird unterstellt, daß ein Karlsruher Stadtbahn-Fahrzeug zum Einsatz kommt, so daß die Fahrgastwechselzeit und somit auch die minimale Zugfolgezeit gegenüber dem Straßenbahnzug leicht erhöht ist:

ohne Trittstufe beim Ein- und Aussteigen:

- Aus- und Einsteigeranteil je 30%: $44 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 27 \text{ sec} = 80 \text{ sec}$
- Aus- und Einsteigeranteil je 50%: $44 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 45 \text{ sec} = 98 \text{ sec}$

mit Trittstufe beim Ein- und Aussteigen:

- Aus- und Einsteigeranteil je 30%: $44 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 32 \text{ sec} = 85 \text{ sec}$
- Aus- und Einsteigeranteil je 50%: $44 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 54 \text{ sec} = 107 \text{ sec}$

Es ist davon auszugehen, daß an der zukünftigen Tunnel-Haltestelle Lammstraße der Aus- und Einsteigeranteil bei jeweils 50% und nicht bei 30% liegen wird, und zwar wegen des hohen Umsteigerverkehrs und wegen der Tatsache, daß die Haltestelle Lammstraße die Funktion der beiden heutigen Haltestellen Herrenstraße und Marktplatz zusammen übernehmen soll, was zu einem besonders hohen Fahrgastaufkommen führen wird. Dies gilt für alle im Tunnel geradeaus fahrenden Straßenbahnzüge, also in der Fahrtrichtung von und nach Durlacher Tor. Die Situation ist dagegen bei den Zügen in der Relation Mühlburger Tor - Hbf entspannt, denn das hohe Fahrgastaufkommen verteilt sich auf die Stationen Lammstraße und Marktplatz.

Limitierend für die Fahrplangestaltung ist das schwächste Glied der Kette, und dies stellt die Haltestelle Lammstraße aufgrund der genannten langen Fahrgastwechselzeiten dar.

Der ermittelte Wert für die minimale Zugfolgezeit von 85 bis 107 sec, wenn eine Trittstufe vorhanden ist, liegt somit bereits im Bereich der in anderen Städten realisierten kürzesten Zugfolgezeiten von Stadtbahn-, U- und S-Bahn-Systemen, bei denen jedoch keine Fahrstraßenkreuzungen zu berücksichtigen sind.



Abschnittsweises Fahren auf Sicht

Um diesen knappen zeitlichen Spielraum zu erhöhen, wird bezüglich des Karlsruher Stadtbahntunnels ein Konzept diskutiert, wie es in einem gravierenden Engpaß-Abschnitt der Straßenbahn in Köln schon seit vielen Jahren praktiziert wird: Damit ein Stadtbahnzug dem vorausfahrenden Zug, der sich zum Ein- und Aussteigen der Reisenden noch an einer Haltestelle aufhält, in einem kürzeren Zeitabstand als sonst folgen kann, wird vorübergehend das "Fahren auf Sicht" erlaubt, also der signalgesteuerte Betrieb kurzzeitig außer Kraft gesetzt, wie aus Abb. 2 hervorgeht. Auf diese Weise kann der zeitliche Abstand ab Ausfahrt eines Stadtbahnzuges aus einer Haltestelle bis zum Halt des nächsten Zuges in derselben Haltestelle von 44 sec auf nur noch 29 sec verkürzt werden - ein Zeitgewinn von 15 sec. Dies führt jedoch zu Fahrzeitverlängerungen, da der nachrückende Zug im Tunnel ein- bis zweimal anhalten muß. Unter diesen Bedingungen ergeben sich nun die folgenden minimale Zugfolgezeiten, und zwar mit Trittstufe beim Ein- und Aussteigen:

- Aus- und Einsteigeranteil je 30%: $29 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 32 \text{ sec} = 70 \text{ sec}$
- Aus- und Einsteigeranteil je 50%: $29 \text{ sec} + 9 \text{ sec} + 54 \text{ sec} = 92 \text{ sec}$.

Ein solcher Betriebsablauf setzt allerdings eine Ausnahmegenehmigung für die Einfahrt in die Haltestelle mit "Fahren auf Sicht" statt mit Signalen überwacht voraus und führt dazu, daß die Gefahr von Auffahrunfällen, die sonst durch Signale verhindert würden, erhöht ist.

Eine Reduzierung der Geschwindigkeit im signalisierten Betrieb von 60 km/h auf nur noch 40 km/h wurde ebenfalls simuliert. Unter Inkaufnahme einer spürbaren Fahrzeitverlängerung ergibt sich lediglich eine Reduzierung der minimalen Zugfolgezeit von 3 Sekunden, so daß diese Möglichkeit der Kapazitätssteigerung nicht sinnvoll ist.

4.2 Zwangspunkte der Fahrplangestaltung: Fahrstraßenkreuzungen und Betrieb auf dem Südast

4.2.1 Auswirkung der Fahrstraßenkreuzungen im Gleisdreieck Marktplatz

Aufgrund der Tatsache, daß das geplante Gleisdreieck am Marktplatz mehrere Fahrstraßenkreuzungen haben wird, ist die Frage der minimalen Zugfolgezeit nun auch unter dem Aspekt der Fahrstraßenkreuzungen im unterirdischen Gleisdreieck am Marktplatz zu behandeln.



Wie in Abb. 3 schematisch dargestellt, sind im Bereich des Marktplatzes drei Fahrstraßenkreuzungen zu unterscheiden, die im folgenden als Marktplatz-West, Marktplatz-Ost und Marktplatz-Süd oder abgekürzt als M-West, M-Ost und M-Süd bezeichnet werden. Diese Fahrstraßenkreuzungen führen zu sog. Fahrstraßenausschlüssen, so daß die theoretische minimale Zugfolgezeit nicht zu jedem Zeitpunkt realisiert werden kann.

Fahrstraßenkreuzung Marktplatz-Süd

Im Tunnel unter der Kaiserstraße soll ein Teil der vom Durlacher Tor kommenden Züge am Marktplatz Richtung Hauptbahnhof abbiegen (Abb. 3, hellgrüne Linie). Durch jeden in diese Richtung abbiegenden Zug entsteht eine freie Fahrplanlage im weiteren Verlauf des Kaiserstraßen-Tunnels bis zum Mühlburger Tor eine freie Fahrplanlage. Diese freie Fahrplanlage sollte sinnvollerweise ein Zug nutzen, der vom Hauptbahnhof zum Mühlburger Tor fährt (hellblau). Das heißt, daß im Idealfall am Marktplatz zeitgleich sowohl ein Zug, vom Durlacher Tor kommend, Richtung Hauptbahnhof abbiegen (hellgrün) als auch ein zweiter Zug, vom Hauptbahnhof kommend, einmünden müßte (hellblau). Dies ist jedoch nicht möglich, denn diese beiden Züge würden die Fahrstraßenkreuzung M-Süd zeitgleich passieren.

Es stellt sich nun die Frage, welcher zeitliche Abstand zwischen diesen beiden Zugfahrten (hellgrün, hellblau) einzuhalten ist. Dies ist in Abb. 4 dargestellt.

Zuerst biegt der vom Durlacher Tor kommende Zug ab, passiert in einer Linkskurve die Fahrstraßenkreuzung M-Süd und hält in der Haltestelle Marktplatz an (Sekunde 44). Nach einer Sekunde Signalstellzeit und einer weiteren Sekunde Reaktionszeit des Fahrers fährt der Zug der Fahrtrichtung von Süd nach West (blau markiert) an der Haltestelle Marktplatz ab (sec 46), um ab Sekunde 52 die Gleiskreuzung zu erreichen, welche der Fahrtrichtung von Ost nach Süd bereits zur Sekunde 38 geräumt hat. Der Zug der Fahrtrichtung von Süd nach West fährt zur Sekunde 85 in die Haltestelle Lammstraße ein, und zwar genau 60 sec später als ein fiktiver Zug, der anstatt von Ost nach Süd zu fahren, in derselben Fahrplanlage seine Fahrt nach Westen fortgesetzt hätte (gelb markiert). Somit verschiebt sich für jeden in der Fahrtrichtung von Ost nach Süd bzw. Süd nach West verkehrenden Zug das Gefüge der Fahrplantrassen in Ost-West-Richtung jeweils um 60 sec.

Von dieser Verschiebung um je 60 sec in der Ost-West-Richtung sind insgesamt bis zu 9 Züge jede Stunde betroffen.



Fahrstraßenkreuzungen Marktplatz-West und Marktplatz-Ost

Die beiden genannten Linienverläufe von Ost nach Süd (hellgrün) und von Süd nach West (hellblau) sind noch von zwei weiteren Fahrstraßenkreuzungen betroffen, nämlich an den Punkten Marktplatz-West und Marktplatz-Ost (siehe Abb. 3). Der Fahrstraßen-Konflikt entsteht hier jedoch nicht zwischen diesen beiden Linien, sondern zwischen jedem am Marktplatz abbiegenden bzw. einbiegenden Zug und den am Marktplatz geradeaus fahrenden Zügen in der Fahrtrichtung vom Mühlburger Tor zum Durlacher Tor: So lange kurz hintereinander die beiden Züge nach Süden abzweigen (hellgrün) bzw. aus Süden einbiegen (hellblau), bleibt die Fahrtrichtung von West nach Ost (schwarz) im Bereich der Fahrstraßenkreuzungen Marktplatz-West und Marktplatz-Ost gesperrt. Wenn man auch noch die Fahrplanzwänge berücksichtigt, die sich aus dem Betrieb auf dem Streckenast südlich Marktplatz ergeben (siehe Kapitel 4.2.2), ergibt sich für die genannte Fahrtrichtung zwischen Mühlburger Tor und Lammstraße wie auch zwischen Kronenplatz und Durlacher Tor zwangsweise 9 mal pro Stunde eine Zugfolgezeit von 3,3 Minuten (siehe Abb. 6) statt der sonst üblichen 1,3 bis 1,5 Minuten.

Die gegenüber dem heutigen Straßenbahnbetrieb an der Oberfläche relativ langen Sperrzeiten resultieren nicht allein aus dem, verglichen mit dem Fahren auf Sicht, weniger leistungsfähigen signalisierten Betrieb, sondern auch aus der Annahme, daß der Stadtbahntunnel zur Hauptverkehrszeit mit Fahrzeugen in Doppeltraktion befahren wird. Je länger der Zug ist, desto länger wird das kreuzende Gleis blockiert. Dies wirkt umso schwerer, als im Bereich dieser Gleiskreuzungen aufgrund der engen Kurven nur eine Geschwindigkeit von 20 km/h möglich ist.

4.2.2 Fahrplanzwänge im Stadtbahntunnel durch den Betrieb auf dem Südast

Die Zugfahrten der 4 Zugfahrten, die am Marktplatz aus dem Tunnel unter der Kaiserstraße nach Süden abbiegen (dunkelgrün, hellgrün) bzw. hier aus Süden einbiegen (hellblau, dunkelblau), stehen zueinander in einer engen fahrplantechnischen Abhängigkeit, die nicht aufgelöst werden kann (siehe Abb. 5). Deshalb sind diese 4 Zugfahrten, die im 20-Minuten-Intervall 3 mal stattfinden, als betriebliche Einheit zu sehen, auch was ihre zeitliche Reihenfolge betrifft. Jede andere zeitliche Reihung der Züge würde zu einem dramatischen Kapazitätsverlust der gesamten Stadtbahnstrecke führen, was durch zahlreiche Durchläufe der computergestützten Fahrsimulationen incl. Bildfahrplan-Erstellung ermittelt wurde (siehe Kapitel 2).



4.3 Ergebnis hinsichtlich der theoretisch möglichen Kapazität

Wie eingangs beschrieben (siehe Kapitel 3), beträgt die Zugfolgezeit aller Züge im geplanten Tunnel unter der Kaiserstraße nach dem bislang geplanten Betriebsprogramm im Durchschnitt 109,1 sec. Dieser Wert wäre noch ausreichend groß, um eine praktikable minimale Zugfolgezeit zu gewährleisten, wenn er bei zwei einander folgenden Zügen fahrplanmäßig niemals unterschritten würde. Denn wenn das abschnittsweise "Fahren auf Sicht" erlaubt wäre, könnte selbst bei einem Ein- und Aussteiger-Anteil von 50% aller Fahrgäste an der Haltestelle Lammstraße noch eine minimale Zugfolgezeit von 92 sec erzielt werden (siehe Kapitel 4.1.2). Doch wegen der Vielzahl an Zwangspunkten in der Fahrplangestaltung - Fahrstraßenkreuzungen im Gleisdreieck Marktplatz, Fahrplanzwänge auf dem Streckenast südlich Marktplatz - wird für einen erheblichen Teil der Züge ein wesentlich größerer Zeitabstand untereinander notwendig, und zwar bis zu 3,3 Minuten. Die übrigen Züge müssen deshalb umso enger gebündelt einander folgen, was zu minimalen Zugabständen führt, die teilweise nur 80 sec betragen. Die betrieblich gerade noch praktikable Mindest-Zugfolgezeit von 92 sec wird somit um 12 sec oder 13% unterschritten, und dies, obwohl ein abschnittsweises Fahren auf Sicht unterstellt ist. Wird das abschnittsweise Fahren auf Sicht nicht zugelassen, so beträgt die Mindest-Zugfolgezeit sogar bis zu 107 sec, so daß eine Zeitspanne von 27 sec oder 25% fehlt.

Diese nicht realisierbaren Zugabstände lassen sich am Beispiel der Zugfahrten in der West-Ost-Relation im Tunnel Kaiserstraße ab Haltestelle Helmholtz-Gymnasium mit Abfahrtszeiten 0'20" - 1'40" - 3'00", 20'20" - 21'40" - 23'00" usw. zeigen (siehe Abb. 6). In iterativen Schritten wurde versucht, beim geplanten Betriebsprogramm wenigstens eine Mindest-Zugfolgezeit von 90 Sekunden einzuhalten, und dieser Versuch war nicht erfolgreich.

4.4 In der Praxis erreichbare Kapazität

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, daß das geplante Betriebskonzept nicht einmal in der Theorie realisierbar ist und somit die für den geplanten Stadtbahntunnel Kaiserstraße vorgesehene Kapazität von 33 Zügen pro Stunde und Richtung gar nicht erzielt werden kann. Es stellt sich nun auch die Frage, wie es um diese Realisierbarkeit von Betriebskonzept und Zielkapazität im alltäglichen Betrieb, also in der Praxis, überhaupt bestellt ist.



4.5 Absehbare Engpässe im unmittelbaren Zulauf auf den Stadtbahntunnel

In der vorliegenden Studie wurde das Hauptaugenmerk auf die Streckenverzweigung am Marktplatz gelegt. Es gibt jedoch noch weitere, nicht ganz so schwerwiegende Engpässe im unmittelbaren Zulauf auf den Stadtbahntunnel:

(1) Die Streckeneinmündung aus Richtung Grashofstraße nahe Mühlburger Tor ist nicht kreuzungsfrei vorgesehen. Jeder Zug dieser Fahrtrichtung muß das aus dem Tunnel kommende und nach Westen führende Gleis kreuzen und hierbei die für ihn reservierte Fahrplantrasse zwischen zwei Zügen der Fahrtrichtung West - Ost genau treffen. Schon leichte Verspätungen der einen Fahrtrichtung können sich deshalb in der Kaiserallee auf Züge der Gegenrichtung auswirken. Ein drittes Gleis, das zwischen den zwei Richtungsgleisen der Kaiserallee liegt und etwas mehr als die Länge des längsten Zuges haben muß, könnte dieses Problem beseitigen. Die völlige Kreuzungsfreiheit ist hier im Unterschied zur Streckenverzweigung am Marktplatz jedoch nicht erforderlich.

(2) Ähnliches gilt für den Abzweig Tullastraße, der sogar von zwei Linien befahren werden soll. Auch hier könnte ein drittes Gleis mit mindestens der Länge eines Zuges Abhilfe schaffen.

(3) Für den Abzweig Schillerstraße gilt ähnliches.

(4) Die Haltestelle Helmholtz-Gymnasium wird zwar durch die bei der Grashofstraße abzweigende Linie aus dem Tunnel nicht bedient, doch dafür kommen drei weitere oberirdische Linien am Mühlburger Tor hinzu. Mit 45 Zügen pro Stunde und Richtung und somit einer durchschnittlichen Zugfolgezeit von 80 Sekunden ergibt sich ein weiterer Engpaß, der sich negativ auf die Tunnelstrecke auswirkt.

(5) Am Mühlburger Tor ist ein - wenn auch nur wenige Meter langer - zweigleisiger Abschnitt vorgesehen, der in der Fahrtrichtung von West nach Ost dazu führt, daß die Fahrplanlagen der von der Grashofstraße in Richtung Tunnel einschwenkenden Züge mit den an der Oberfläche verbleibenden Straßenbahnen der Kaiserallee koordiniert werden müssen. Auch hier fehlt ein drittes Gleis auf wenigen Metern Länge.

4.5.1 Weitere Störeinflüsse auf den Betrieb

Im Alltagsbetrieb sind die Züge der Karlsruher Stadtbahn einer Vielfalt von zusätzlichen Störeinflüssen ausgesetzt, die den Betriebsablauf verzögern können, was sich für die Fahrgäste, die eine pünktliche Bedienung erwarten, in Form von Verspätungen sehr unangenehm bemerkbar macht.



Als wichtigste Störeinflüsse sind zu nennen:

- (1) der Mischbetrieb der Stadtbahn-Züge mit anderen Zügen der DB AG (ICE, IC, RE/RB, Güterzüge) auf zweigleisigen DB-Strecken außerhalb der Karlsruher Innenstadt
- (2) eingleisige Streckenabschnitte auf zahlreichen Außenstrecken, auf denen zwar sonst kein nennenswerter oder nur geringer Mischverkehr mit DB-Zügen stattfindet, aber auf denen lediglich punktuell ein zweites Gleis für Zugbegegnungen vorhanden ist
- (3) Mischbetrieb der Straßenbahnzüge mit Kfz auf der Straße, so daß Straßenfahrzeuge die Straßenbahn behindern, beispielsweise durch Erzwingen der Vorfahrt und damit verbundener abrupten Bremsung des Straßenbahnzuges, durch zu langsames Fahren, durch PKW-Stau auf der Fahrspur der Straßenbahn, durch verbotswidriges Halten auf der Fahrspur der Straßenbahn usw.
- (4) technische Defekte an Fahrzeugen oder Infrastruktur (Weichen, Signale, Oberleitungen), was Betriebsstörungen und - unterbrechungen verursacht
- (5) Verzögerungen beim Fahrgastwechsel an Haltestellen durch
 - Gruppen, die sich beim Ein- oder Aussteigen durch eine einzige Tür drängen oder die für verspätete andere Gruppenmitglieder das Schließen der Türen blockieren
 - Rollstuhlfahrer, Gehbehinderte, Blinde
 - Personen mit Kinderwagen
 - Personen mit schwerem bzw. sperrigem Gepäck
 - Überfüllung der Fahrzeuge, so daß sich der Vorgang des Ein- oder Aussteigens verlängert
- (6) Straßenbaustellen, Gleisbaustellen.

Ein Teil der oben aufgelisteten Faktoren tritt besonders während der Hauptverkehrszeit (HVZ) auf, wenn die Zugzahl laut Fahrplan ohnehin ihr Maximum erreicht. Gerade das hohe Aufkommen im gleichzeitig stattfindenden Pendler- plus Schülerverkehr per Auto und Straßenbahn kann gleich zweifach zu Störeinflüssen führen: einerseits Überfüllung der Fahrzeuge mit daraus resultierenden besonders langen Fahrgastwechselzeiten und andererseits PKW-Stau auf der Fahrspur der Straßenbahn im Zulauf auf den Tunnel.



Am Durlacher Tor ist ein weiterer Abzweig baulich als Tunnel-Stützen vorgesehen, so daß in späterer Zukunft eine weitere Tunnelrampe in der Karl-Wilhelm-Straße errichtet werden kann, damit die von und nach Hauptfriedhof fahrenden Züge nicht mehr den Umweg über die Tullastraße nehmen müssen. Dieser Abzweig ist wiederum nicht kreuzungsfrei geplant und deshalb betrieblich nicht sinnvoll, wenn auch die Auswirkungen der "nur" einen Fahrstraßenkreuzung nicht ganz so dramatisch sind wie die drei Fahrstraßenkreuzungen am Marktplatz.

4.5.2 Fehlen von Rückfallebenen zum Ausgleich von Betriebsstörungen

Ausgerechnet in der betrieblich kritischen Phase der HVZ sind im Tunnel Kaiserstraße keinerlei Rückfallebenen vorhanden, um eingetretene Verzögerungen im Betriebsablauf zu kompensieren. Einmal vorhandene Verspätungen werden somit bis zum Ende der HVZ und darüber hinaus "mitgeschleppt" und können erst dann allmählich abgebaut werden, wenn das Fahrplanangebot weniger dicht als während der HVZ ist. Besonders groß ist die Gefahr von Folgeverspätungen, welche auf die Züge der Gegenrichtung übergreifen oder von denen Züge ganz anderer Linien betroffen sind. Wegen der hohen Nachfrage in der HVZ sind von derartigen Störungen besonders viele Fahrgäste betroffen, was zur Folge haben wird, daß die hohe Attraktivität und Wertschätzung, die das Karlsruher Stadtbahnsystem heute bei seinen Kunden hat, stark beeinträchtigt wird. Vermutlich werden zahlreiche Fahrgäste dem ÖPNV in Karlsruhe den Rücken kehren und (wieder) zum Fahren mit dem eigenen PKW übergehen.

Besonders problematisch wirkt sich hierbei nicht nur die wegen der unterirdischen Fahrstraßenkreuzungen am Marktplatz geringe Kapazität des Stadtbahntunnels, sondern die erforderliche Reihung von Linien aus, die sich ebenfalls aus der nicht-kreuzungsfreien Gleisführung am Marktplatz ergibt. Ist eine der in Abb. 6 dargestellten Zugfahrten, die das Gleisdreieck am Marktplatz befahren, verspätet, so muß das gesamte Gefüge von 4 abzweigenden Zugfahrten (hellblau, dunkelblau, hellgrün, dunkelgrün) zeitlich nach hinten geschoben werden. Eine andere zeitliche Reihung der Zugfahrten im Verspätungsfall ist ohne massive Kapazitätseinbußen nicht möglich.

Lediglich in der Normal- und Nebenverkehrszeit ist die betriebliche Situation weniger angespannt: Zum einen ist die Gefahr, daß Verspätungen auftreten, verglichen mit der HVZ weitaus geringer. Zum anderen können bereits eingetretene und möglicherweise aufsummierte Verspätungen schrittweise wieder abgebaut werden.



5. Fazit

Als Fazit kann festgehalten werden:

Das geplante Betriebskonzept für den Tunnel Kaiserstraße ist zur Hauptverkehrszeit bei großem Fahrgastandrang nicht einmal im Idealfall realisierbar, die angestrebte Zahl von 33 Zügen pro Stunde und Richtung ist somit nicht einmal theoretisch erzielbar, obwohl diese Zahl von Zügen gegenüber der heute erreichten Anzahl von Zügen an der Oberfläche (ca. 45 Züge pro Stunde und Richtung) schon deutlich reduziert ist. Der Grund hierfür sind die Fahrstraßenkreuzungen im unterirdischen Gleisdreieck Marktplatz in Kombination mit den Fahrplanzwängen auf dem Streckenast südlich Marktplatz. Erst recht scheitert dieses Betriebskonzept im alltäglichen Betrieb mit seiner Fülle von zusätzlichen Störeinflüssen. Somit entfallen auch Perspektiven für eine längerfristig wünschenswerte Angebotsverdichtung über die geplante Zahl von 33 Zügen pro Stunde und Richtung hinaus, also beispielsweise der 10-Minuten-Takt auf sämtlichen Linien im Tunnel Kaiserstraße oder gar die Einführung zusätzlicher Linien.

Gäbe es keine Fahrstraßenkreuzungen am Marktplatz, so wäre es nicht notwendig, die Züge der West-Ost-Richtung und der Gegenrichtung zu Pulks aus zwei bzw. drei Zügen zu bündeln. Vielmehr könnten die Züge in immer gleichen zeitlichen Abständen den Tunnel befahren. Die durchschnittliche Zugfolgezeit wäre dann identisch mit der Mindest-Zugfolgezeit. Da die minimale Zugfolgezeit im Worst-Case (Stadtbahn hält an der Lammstraße und setzt die Fahrt geradeaus nach Osten fort, Fahren auf Sicht nicht erlaubt) 107 Sekunden beträgt, aber die durchschnittliche Zugfolgezeit beim geplanten Betriebsprogramm bei 109 Sekunden liegt, wäre der bislang unterstellte Fahrplan im Prinzip machbar. Dies ist jedoch mit der planfestgestellten baulichen Lösung des Stadtbahntunnels im Bereich Lammstraße - Marktplatz nicht vereinbar. Die Kreuzungsfreiheit am Marktplatz würde die Kapazität des gesamten Stadtbahntunnels im Verhältnis von 80 zu 109 Sekunden und somit um 36% erhöhen; zugleich wären die gegenseitigen Abhängigkeiten der Linien (Folgeverspätungen) stark abgemildert.



Quellenangaben

- 1) KASIG Karlsruher Schieneninfrastruktur Gesellschaft mbH: Erläuterungsbericht, Stadtbahntunnel Kaiserstraße mit Südabzweig Ettlinger Straße, Teil des Verkehrsprojekts Kombi-Lösung Karlsruhe, Antrag auf Planfeststellung nach § 28 PBefG, Karlsruhe, 30.11.2005, S.18
- 2) §49 BOSTrab
- 3) KASIG Karlsruher Schieneninfrastruktur Gesellschaft mbH: Erläuterungsbericht, Stadtbahntunnel Kaiserstraße mit Südabzweig Ettlinger Straße, Teil des Verkehrsprojekts Kombi-Lösung Karlsruhe, Antrag auf Planfeststellung nach § 28 PBefG, Karlsruhe, 30.11.2005, S. 17
- 4) http://en.wikipedia.org/wiki/Paris_Métro_Line_14
- 5) der Fahrgast - Magazin des Fahrgastverbandes Pro Bahn, Heft 2/2009: Bus und Bahn wie es sein sollte: Vorbild Japan. S.11
- 6) Schreck u.a., S-Bahnen in Deutschland, Planung, Bau und Betrieb, Düsseldorf 1979, S. 54 f; eigene Berechnungen
- 7) Lehrstuhl für Schienenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, Umdruck Bau und Betrieb von Nahverkehrssystemen, Trassierung von Bahnen nach BOSTrab, http://www.via.rwth-aachen.de/Umdruck_Updates/Bau_und_Betrieb_von_Nahverkehrssystemen/Update_2006_auf_2007.pdf