Optimale ÖV-Netze für Modellstädte

Abschlussarbeit für Diploma of Advanced Studies „Verkehrsingenieurwesen“

Dezember 2013

Bearbeiter: Dr. Volker Banhardt

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Markus Friedrich (Universität Stuttgart)

Universität Stuttgart
Institut für Straßen-und Verkehrswesen
Lehrstuhl für Verkehrsplanung und Verkehrsleittechnik

IVT Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme
Institute for Transport Planning and Systems

ETH
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Aufgabenstellung 4
2. Literaturübersicht 6
2. 1 ÖV Liniennetze 6
2. 2 Betriebskosten des öffentlichen Verkehrs 8
3 Vier-Stufen-Modell und Modellierung 10
4. Strukturdaten und Kostenrechnung 12
4.1 Nachfragestruktur der Modellstadt 12
4.2 MIV und ÖV Netz 13
4.3 ÖV Bedienung 16
4.3.1 Taktverkehr und Betriebszeit 16
4.3.2 Fahrzeugtypen 16
4.3.3 Fahrzeugkapazitäten und Auslastung während der Spitzenstunde 17
4.4 Modellierung in VISUM 17
4.5 Kostenrechnung 19
4.5.1 Erträge 19
4.5.2 Berücksichtigte Kosten 19
4.5.3 Ergebnis 20
5. Ergebnisse 21
5.1 Untersuchte Parameter 21
5.2 ÖV Netze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand 23
5.2.1 Zwei Durchmesserlinien 23
5.2.2 Modal Split 23
5.2.3 Betriebliches Ergebnis 26
5.2.4 Einfluss einer Taktverdichtung in der HVZ 30
5.2.5 Verlängerung der Parksuchzeit 30
5.3 ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Einfluss des Haltestellenabstandes 31
5.3.1 ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand 31
5.3.2 Einfluss des Haltestellenabstandes 34
5.4 Einfluss der Verteilung der Erwerbstätigen und Arbeitsplätze 37
5.4.1 Ergebnisse mit Verteilung ET2 38
5.4.2 Vergleich Verteilungen ET1 und ET2 - Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung 39
5.5 Mittlere Reisegeschwindigkeiten und Reisezeiten 41
5.6 Umsteigen und Fußgänger 42

6. Diskussion 44
6.1 Verkehrsbelastungen der ÖV Liniennetze 44
6.1.1 Einfluss Parksuchzeit 44
6.1.2 Einfluss des Bedienungstaktes 45
6.1.3 Einfluss einer Taktverdichtung in der Hauptverkehrszeit 46
6.1.4 Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung 47
6.1.5 Einfluss des Haltestellenabstandes 48
6.2 Umsteigeanteile 50
6.3 Netzausnutzung 51
6.4 Mittlerer Haltestellenabstand 54
6.5 Elastizitäten 56
6.5.1 Modal Split und Taktzeit 56
6.5.2 Modal Split und Haltestellendichte 57
6.5.3 Modal Split und MIV Geschwindigkeitsreduktion 58
6.6 Subventionen oder Gewinn pro ÖV Fahrt 59
7. Zusammenfassung 61
8. Literatur 63
9. Anhang 64
9.1 Kapitel 4 – Strukturdaten und Kostenrechnung 64
9.1.1 Berechnung der Fahrzeugkosten 64
9.1.2 Berechnung variabler Kosten 64
9.1.3 Bezirke der Modellstadt 65
9.2 Kapitel 5 - Ergebnisse 67
9.2.1 Kapitel 5.2 - ÖV Systeme mit 500 m mittleren Haltestellenabstand 67
9.2.2 Kapitel 5.3 - ÖV Systeme mit 1000m mittleren Haltestellenabstand 68
9.2.3 Kapitel 5-4 - Einfluss der Verteilung der Erwerbstätigen und Arbeitsplätze 69
9.2.4 Kapitel 5.5- Mittlere Reisegeschwindigkeiten und Reisezeit 71
9.2.5 Umsteigen und Anteil Fußgänger 72
9.3 Kapitel 6 – Diskussion 73

Danksagung

Diese Arbeit ist meine Abschlussarbeit für das Weiterbildungsdiplom / Diploma of Advanced Studies „Verkehrsingenieurwesen“ welches erstmals von November 2011 bis Dezember 2013 am Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme an der ETH Zürich angeboten wurde.

Den Studienkollegen danke ich für die stetige Unterstützung und Hilfsbereitschaft während der vergangenen zwei Jahre – als Stichwörter möchte ich nur Hausübungen und Treffpunkt Basel SBB an diversen Samstagvormittagen nennen.

Herrn Prof. Dr. Kay W. Axhausen danke ich für die Initiierung, Planung, Durchführung und Koordination des gesamten Studiengangs und seine Beratungen.

Herrn Prof. Dr. Markus Friedrich danke ich ausdrücklich für die Betreuung dieser Abschlussarbeit, die immer sehr zeitnahe und von Tageszeiten unabhängige Beratung und die Hilfestellungen zu verschiedensten Visum-relevanten Fragestellungen.

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Öffentlicher Personennahverkehr (ÖPNV) ist heute -oder noch immer- eine Selbstverständlichkeit in europäischen Städten. Inwiefern er von den Bürgern benutzt wird, hängt entscheidend vom Liniennetz und dem angebotenen Fahrplan ab. Diese stellen die Angebotsgrundlagen des öffentlichen Verkehrs (ÖV) dar, der im Wettbewerb mit zu anderen Verkehrsmitteln steht.

Für die Fahrgäste sind dabei eine gute Anbindung durch kurze Fußwege zu den Haltestellen, hohe Bedienungshäufigkeiten und kurze Reisezeiten von großer Bedeutung. Ebenso sind auch die aktuellen Fahrpreise wichtig. Demgegenüber ist der Betreiber sehr an einem hohen Kostendeckungsgrad interessiert. Bei einer Liniennetzplanung und der Fahrplanbildung müssen deshalb folgende Fragen geklärt werden:

1. Wie viele Haltestellen sind angemessen?
   Kurze Haltestellenabstände reduzieren die Zu- und Abgangszeit für die Fahrgäste. Gleichzeitig erhöhen kurze Abstände die Fahrzeit, da die Fahrzeuge öfters halten müssen. Längere Fahrzeiten beeinflussen die Verkehrsmittelwahl und können zudem zu höheren betrieblichen Kosten führen.
2. Wie viele Linien sind erforderlich?
   Eine hohe Netzabdeckung mit einem dichten Liniennetz reduziert die Zu- und Abgangszeiten. Eine hohe Liniendichte reduziert die Umsteigehäufigkeit, da mehr Relationen direkt bedient werden. Eine hohe Netzabdeckung und Liniendichte erhöht jedoch die Liniennetzlänge und beides führt zu höheren Kosten für den Fahrweg und den Betrieb.
3. Welcher Takt und welche Fahrzeuggrößen sind erforderlich?
   Ein hoher Takt reduziert die Wartezeiten an der Starthaltestelle und an Umsteigehaltestellen. Ein hoher Takt erhöht aber gleichzeitig die Fahrleistung, d.h. die Fahrplankilometer der Fahrzeuge und damit die Kosten. Große Fahrzeuge sind kosteneffizienter, da mit weniger Fahrern mehr Fahrgäste befördert werden können.
4. Die Frage, welches Verkehrssystem angemessen ist, wird in dieser Arbeit aufgrund der gesetzten Randbedingungen nicht untersucht. Es wird natürlich überprüft, ob die angeforderten Kapazitäten mit dem hier gewählten ÖV Verkehrsmittel Bus für die betrachtete Modellstadt zur Verfügung stehen.

Diese Fragen unterstreichen, dass sich der ÖV im Spannungsfeld zwischen bestem Angebot für die Fahrgäste und Bezahlbarkeit durch den Betreiber befindet. Sprich, bei einer Liniennetzplanung und der Fahrplanbildung im öffentlichen Verkehr handelt es sich um ein Optimierungsproblem.

Im Rahmen dieser Arbeit wird theoretisch anhand einer Modellstadt die Frage untersucht, wie viel Verkehr beschrieben durch ein Liniennetz und einem dafür hinterlegten Fahrplan kann sich diese Modellgemeinde leisten. Als Randbedingung wird vorgegeben, die betrieblichen Zeit- und Entfernungskosten und die Abschreibung für die Fahrzeuge, nicht aber die Infrastrukturkosten durch die Fahrgasteinnahmen zu decken.

Aufgabenstellung

Im Rahmen der Diplomarbeit sind folgende Aufgaben zu bearbeiten:

- Literaturanalyse zum Problem des „Public Transport Network Design Problems“
- Erstellung einer idealisierten Modellstadt (monozentrische Stadt), in der die Nutzungsdichten variiert werden können. Für diese Modellstadt ist ein vereinfachtes, skalierbares ÖV-Netzkonzept zu entwickeln (ein Netz für n Durchmesserlinien wobei n variiert wird, nur ein Verkehrssystem, Annahme einer mittleren Fahrgeschwindigkeit und einer Haltestellenaufenthaltszeit). Das Verkehrsangebot der anderen Modi (Pkw, Fuß, Rad) ist vereinfacht abzubilden.
- Erstellung eines einfachen 4-Stufenalgorithmus für die Modellstadt. Es genügt einen Fahrtzweck (Wohnung-Pflichtaktivität) abzubilden.
- Erstellung eines ÖV-Kostenmodells mit Kostensätzen für die Kostenkomponenten Zeit (Arbeitszeit), Entfernung (Kraftstoff, Reparatur) und Fahrzeug (Abschreibungskosten und Versicherung). Für die Erlöse wird ein fixer Betrag je Fahrt angenommen.
- Entwicklung und Analyse unterschiedlicher Ausprägungen des ÖV-Angebots:
    - Variation der Haltestellenabstände
    - Variation der Netzdichte und der Anzahl Linien.
    - Variation der Takte
- Darstellung der Verkehrsleistung, des Modal-Splits und des Kostendeckungsgrads für jede Lösung. Darstellung des Zusammenhangs von Nutzungsdichte und Kostendeckungsgrad.
- Zusammenfassung und Interpretation der Ergebnisse.

2. Literaturübersicht

2. 1 ÖV Liniennetze

Eine grundlegende Übersicht zu Liniennetzen des öffentlichen Verkehrs geben Vuchic (2005) oder Weidmann (2012). Vuchic beschreibt notwendige Randbedingungen, damit ÖV Liniennetze attraktiv werden. Eine davon ist die Zugänglichkeit von Haustüre zur ÖV Haltestelle. Für einen Busverkehr reduzieren Zugangszeiten von mehr als 5 Minuten laut Vuchic den Prozentsatz der möglichen Fahrgäste um annähernd 70%, bei 4 Minuten werden noch etwa 50% der potentiellen Fahrgäste erreicht. Weidmann betrachtet die Abnahme der Anzahl der ÖV Fahrten in Abhängigkeit von der Distanz zwischen Wohnung und Haltestelle. Danach sind für Distanzen von 500 m nur noch weniger als 10% der Personen erreichbar.

Für eine gute Liniennetzeffizienz sind nach Vuchic fünf Faktoren wichtig:

1. Bereitstellung von umsteigefreien Verbindungen, insbesondere für Bereiche hoher Verkehrsdichten.
2. Betriebliche Flexibilität: Verknüpfungen der einzelnen Linien verbessert die Zuverlässigkeit und erlaubt z.B. einen besseren Umgang mit Betriebsstörungen.
3. Verknüpfungen sind auch notwendig mit anderen Verkehrsmodi, z.B. Bahn mit Bus oder Individualverkehr, oder auch die Einrichtung von Fahrradstationen.
4. Eine gute örtliche Lage der Verkehrsknoten mit minimalen Wegen beim Umsteigen und eine generell sehr gute Zugänglichkeit.
5. Geringe Systemkosten, hier insbesondere auch Infrastrukturkosten, wobei zwischen Investitionshöhe und dadurch gewonnene Systemeffizienz abzuwägen ist (z.B. ein Gewinn durch höhere Geschwindigkeiten oder schnellere Zugänglichkeit).

Bezüglich des Linienabstandes werden für U-Bahnen als Richtwert 800 m angegeben, um eine Basisversorgung sicherzustellen. Städte mit entsprechend großer Nachfrage rechtfertigen auch Linienabstände von 300 bis 500 m. Typische Bus- oder Straßenbahnlinienlängen betragen 5 bis 12 km in Mittelstädten und bis zu 15 bis 20 km in Großstädten. Diese können deutlich länger sein, sobald ein straßenunabhängiger ÖPNV wie Stadt- oder U-Bahn vorliegt.

Linien können grundsätzlich voneinander unabhängig sein oder ineinander integriert - hier benützen verschiedene Linien gleiche Streckenabschnitte. Erstere bringen deutlich höhere Anteile umsteigender Passagiere mit sich. Während unabhängige Linien sehr zuverlässig arbeiten, weisen sie in der Regel über ihre gesamte Länge dieselbe Kapazität auf und sind damit in ihren Endbereichen oft schlecht ausgelastet. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Anzahl der umsteigenden Personen bei der Auslegung der Stationen zu berücksichtigen sind und diese komplexer und entsprechend groß werden. Es ist oft zu beobachten, dass unabhängige Liniennetze meist in stark belasteten U-Bahnnetzen auftreten. Dagegen sind Liniennetze, die erheblich unterhalb ihrer maximalen Kapazität betrieben werden und für die eine extreme Zuverlässigkeit nicht die höchste Priorität hat, oftmals ineinander integriert. Als Beispiel hierfür nennt Vuchic die Stadtbahn Stuttgart. Auf eine detailliertere Darstellung der Typen von Nahverkehrslinien und der Beschreibung realer Liniennetze sowie deren Bewertung wird hier verzichtet und auf Kapitel 4.3 von Vuchic verwiesen.

In seiner Arbeit untersucht van Nes (2002) den sogenannten „multi modalen Verkehr“, bei dem für eine Reise verschiedene Verkehrsmittel zum Einsatz kommen. Er betrachtet aus Nutzersicht als Hauptkriterien für die Verkehrsmittelwahl Reisekosten und -zeit. Von diesen Wahlkriterien leitet der Nutzer indirekt Anforderungen an das Liniennetz ab, wie örtlicher Zu- und Abgang an Haltepunkten, Autobahnauffahrten oder zeitliche Zugänglichkeit – wann wird das Verkehrssystem mit welchem Takt bedient- und schließlich Reisegeschwindigkeiten oder benötigte Reisezeiten. Ein Betreiber dagegen sieht zunächst einmal die Kosten von Investition, Unterhalt und Betrieb.

Eine Schlussfolgerung aus seinen Untersuchungen für van Nes ist, dass bei heutigen ÖV Liniennetzen die Abstände der Haltestellen zu gering sind. Er empfiehlt optimale Distanzen von 600 bis 800 m. Größere Haltestellenabstände erlauben kürzere Reisezeiten und somit eine Senkung der Betriebskosten. Als durchschnittliche Reisegeschwindigkeit empfiehlt er -abgeleitet von seinen Untersuchungen in den Niederlanden- im städtischen ÖPNV 30 km/h. Weiter befürwortet er größere Linienabstände von optimal 750 bis 800 m.

Anderhub et al. (2008) untersuchen die Leistungsfähigkeit von öffentlichen Verkehrssystemen unter Beachtung verschiedener Aspekte wie Fahrplanstabilität, Unregelmäßigkeiten im Betrieb, Komfortansprüche der Fahrgäste und akzeptierte Fahrzeugbesetzungen ausgedrückt durch Personen pro m² Fahrzeugfläche. Sie empfehlen eine maximale Stehplatzdichte im Spitzenkurs von 3 Personen pro m², was für einen Stadtbus mit 12 m Länge etwa 63 Personen entspricht. Dies ist etwa 10% geringer als z.B. im Rhein-Neckar Verbund durchschnittlich angenommen wird (70 Personen, Dmochowski, 2012). Ein als komfortorientiertes bezeichnetes maximales Fassungsvermögen wird von Anderhub für einen Standardbus mit 1150 Fahrgäste pro Stunde und für einen Gelenkbus mit 1560 Fahrgäste pro Stunde angegeben.

Das Thema Zuverlässigkeit für Liniennetze des ÖV untersuchen Tahmasseby et al. (2006). Maßgebliche Variablen für die Form eines ÖV Liniennetzes sind für sie Haltestellen und deren Anordnung, die Art der Linien (Durchgangslinien, Kreuzmuster, Tangentiallinien) und die Bedienungsfrequenz. Sie beschreiben das Optimierungsproblem der ÖV als eine Minimierung der Reisezeiten einerseits und der Betriebskosten und Infrastrukturkosten zuzüglich Unterhaltskosten. Konkret vergleichen sie 2 Netzwerke für eine Modellstadt. Das erste besteht aus 8 Halblinien, die alle in einem Zentrum enden, das Zweite aus vier Durchmesserlinien. Während die Betriebskosten als vergleichbar bewertet werden, sind die Infrastrukturkosten für die Variante mit Durchgangslinien günstiger. In einer zweiten Analyse wurden zusätzlich Kosten für die Zuverlässigkeit ermittelt. Unter dieser erweiterten Betrachtung ist die Halblinien-Variante aufgrund geringerer Kosten für Ersatzservicefahrten für ausfallende Fahrplanfahrten günstiger. Für das Netz mit Durchmesserlinien wurde eine Ausfallwahrscheinlichkeit von annähernd 10% der Fahrplanfahrten ermittelt, gegenüber 2,5% für die Halblinienvariante. Zur Kompensation dieser relativ hohen Ausfallraten wurden Tangentiallinien als Umgehungsrouten in das Netz mit Durchmesserlinien eingebaut. Es zeigte sich, dass dies trotz der Zusatzinfrastrukturkosten eine wirksame Maßnahme zur Steigerung der Netzzuverlässigkeit und zur Kostenreduktion für die Ausfallkosten darstellt. Für Netze mit Durchmesserlinien nimmt die Wirksamkeit mit dem Abstand der „Umgehungsringes“ vom Zentrum zu. Außen liegende Ringlinien können die Zuverlässigkeit so deutlich steigern, dass die Gesamtkosten beider Varianten vergleichbar werden.

2. 2 Betriebskosten des öffentlichen Verkehrs

Basierend auf Kostensätzen des Niederländischen Verkehrsministeriums von 1996 leitet von Nes (2002) für einen Stadtbus Kosten für die Fahrzeugabschreibung von 33 €/h ab. Weiter gibt er Betriebskosten für einen Bus von 78 €/h und für eine Straßenbahn von 122 €/h, jeweils inklusive aller Zeitkosten. Aufgrund der größeren Fahrzeugkapazitäten berechnet er für die Straßenbahn einen günstigeren Kostensatz pro Kilometer gefahrene Strecke von 0,69 €/km (Beispiel Utrecht), verglichen mit 0,99 €/km für Busverkehr.

Aktuelle Zahlen aus Deutschland veröffentlicht der Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV). 2012 betrugen die mittleren Kosten einer ÖPNV Fahrt 1,55€ und der mittlere Erlös einer Fahrt 0,76€ (VDV, 2012). Mit etwas geringeren durchschnittlichen Einnahmen pro Fahrgast rechnet aktuell die Rhein-Neckar-Verkehr GmbH als Vertreter einer Nahverkehrsgesellschaft eines Ballungsraumes. Hier werden durchschnittlich 0,70 € ermittelt (Dmochowski, 2013).

Betriebskosten von Busverkehr beschreiben in Detail Frank et al. (2008) und fassen Ihr Modell in eine gut handhabbare Excel Datei. Als Kostenbestandteile werden zeitabhängige, fahrzeuganzahlabhängige, kilometerabhängige und sonstige Kosten dargestellt. Für die Zeitkosten wird auf Tarifabschlüsse in Deutschland zurück gegriffen und ein Faktor zur Beschreibung eines Wirkungsgrades des Personaleinsatzes beschrieben. Fahrzeugabhängige Kosten berücksichtigen Fahrplandetails, Laufleistung, einen Faktor zur Beschreibung der Fahrzeugeffizienz, Fahrzeugkapitalkosten, sowie Angaben zur Versicherungsprämie eines Fahrzeuges. Detailliert werden Gleichungen zur Berechnung der kilometerabhängigen Kosten unter Berücksichtigung von Fahrzeug abhängigem Diesel- bzw. Schmierstoffverbrauch, Instandhaltungskosten und Reifenkosten nach VDV Vorschriften angegeben. Als sonstige Kosten werden tägliche Versorgung der Fahrzeuge und Overheadkosten betrachtet.

Daganzo (2010) beschreibt verschiedene Liniennetzstrukturen und untersucht Betriebsbedingungen mit dem Ziel, gleiche Reisezeiten für ÖV und den motorisierten Individualverkehr (MIV) zu ermöglichen. Die betrachteten Großräume werden durch Quadrate unterschiedlicher Größe, aber jeweils mit homogener Nachfrage idealisiert modelliert. ÖV Liniennetze verlaufen entlang der Kanten dieser Quadrate. Linien können in einer oder in beiden Richtungen betrieben werden. Das Liniennetz besitzt einen variablen Linienabstand, indem in Zentrumsnähe kleinere und in der Peripherie größere Quadrate verwendet werden. Mittels dem damit aufgebauten Modell wird beurteilt, für welche Netzgrößen welches öffentliche Verkehrssystem (Bus, Bus Rapid Transit (BRT), Stadtbahn (LRT) oder U-Bahn) die kürzeste Reisezeit und aus Betreibersicht die günstigsten Produktionskosten erlaubt. Eine Kombination verschiedener Verkehrssysteme, wie von van Nes bearbeitet, wird von Daganzo nur am Rande betrachtet, jedoch werden keine Zahlen genannt.

Daganzo untersucht das Reiseverhalten von berufstätigen Pendlern, die jeweils zwei Fahrten pro Tag durchführen. ÖV Fahrzeuge werden mit ihrer Kapazität, durchschnittlichen Reisegeschwindigkeit und Haltezeiten an Haltestellen beschrieben. Für Busse werden durchschnittliche Reisegeschwindigkeiten von 25 km/h angenommen, für Bus Rapid Transit Systeme 40 km/h, für Stadt- oder U-Bahn 60 km/h. Als Betriebskosten werden 40 US$ pro Stunde für Bus und BRT, sowie 120 US$ pro Stunde für die U-Bahn angenommen. Für die Abschreibungskosten der Fahrzeuge 2 US$ pro km Busfahrt und 6 US$ pro km U-Bahnfahrt. Für eine Moduswahl werden Reisezeit, Umsteigeverhalten,

Verfrühung bzw. Verspätung berücksichtigt. Value Travel Time Savings (VTTS) Werte für Reisezeitgewinne werden mit 20 US$ pro Stunde bewertet. Damit werden für verschiedene Liniennetzmodelle Betriebskosten abgeleitet. Über eine Maximierung der Fahrzeugbelastung für die untersuchten Liniennetze wird eine Optimierung hinsichtlich minimaler Gesamtkosten erreicht.

Das Modell wird zunächst auf eine Stadt der Größe Barcelonas angewendet. Als optimal wird ein Liniennetz mit hohem Abdeckungsgrad durch Bus (88%), einem geringeren Wert für BRT (66%) und aufgrund der hohen Infrastrukturkosten geringen Abdeckungsanteil für U-Bahn (14%) ermittelt. Betrachtet werden 20000 Fahrten pro Stunde über eine mittlere Distanz von 10 km. Verglichen mit dem aktuellen Liniennetz von Barcelona wird festgestellt, dass das theoretisch optimale Netz größere Haltestellenabstände aufweist und damit schnellere mittlere Reisegeschwindigkeiten von 25 km/h ermöglicht. In Realität ist die mittlere Busreisegeschwindigkeit in Barcelona 21,4 km/h. Das schnellste Verkehrsmittel ist im Modell BRT. Dieser erlaubt kürzere Gesamtreisezeiten als die U-Bahn, ist aber immer noch deutlich langsamer als der MIV. Der kleine Abdeckungsanteil für die U-Bahn ist ein Indiz für recht lange Fußwege. Dies wird jedoch nicht explizit angegeben.

Modelliert werden auch 80000 Fahrten pro Stunde und einer mittleren Reisedistanz von 20 km. Beim Vergleich der öffentlichen Verkehrsmittel wird erneut ein BRT System favorisiert, welches die kürzesten Reisezeiten ermöglicht. Für schienengebundene ÖV Systeme werden die deutlich höheren Investitionskosten und damit verbundenen größeren Linienabständen aufgrund der langen Zugangszeiten als nachteilig bewertet. Für Fußgänger werden jedoch geringe Gehgeschwindigkeiten von zwei km/h angenommen, was mit häufigem kreuzen von Straßen begründet wird. Da die Zugangszeiten dadurch relativ lang sind, kompensiert dies die höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten des Schienenverkehrs. Im Vergleich der schienengebundenen Fahrzeuge schneidet die Stadtbahn (LRT) günstiger als eine U-Bahn ab. Denn diese hat zwar gleiche Reisegeschwindigkeiten wie eine U-Bahn, aber deutlich geringere Betriebskosten von 4US$ pro km und ebenso 25% geringere Investitionskosten. Sobald durch Zubringerbusse oder „kiss&ride“ Parkplätze die nachteilig geringen Zugangsgeschwindigkeiten kompensiert werden, stellt ein Stadtbahnsystem der Systemoptimum dar.

3 Vier-Stufen-Modell und Modellierung

Das Vier-Stufen-Modell bildet die Grundlage für die Berechnung der Verkehrsnachfrage in der Modellstadt. Eine nähere Erläuterung des Modells und zur allgemeinen Vorgehensweise findet sich z.B. in Friedrich (2012) oder Justen (2006). Die Modellierung erfolgt mitder Software VISUM. Bezüglich weiterer Informationen zur Software VISUM wird auf das entsprechende Benutzerhandbuch verwiesen (PVT, 2012). Abbildung 3-1 zeigt im Überblick den schematischen Ablauf des Vier-Stufen-Modells.

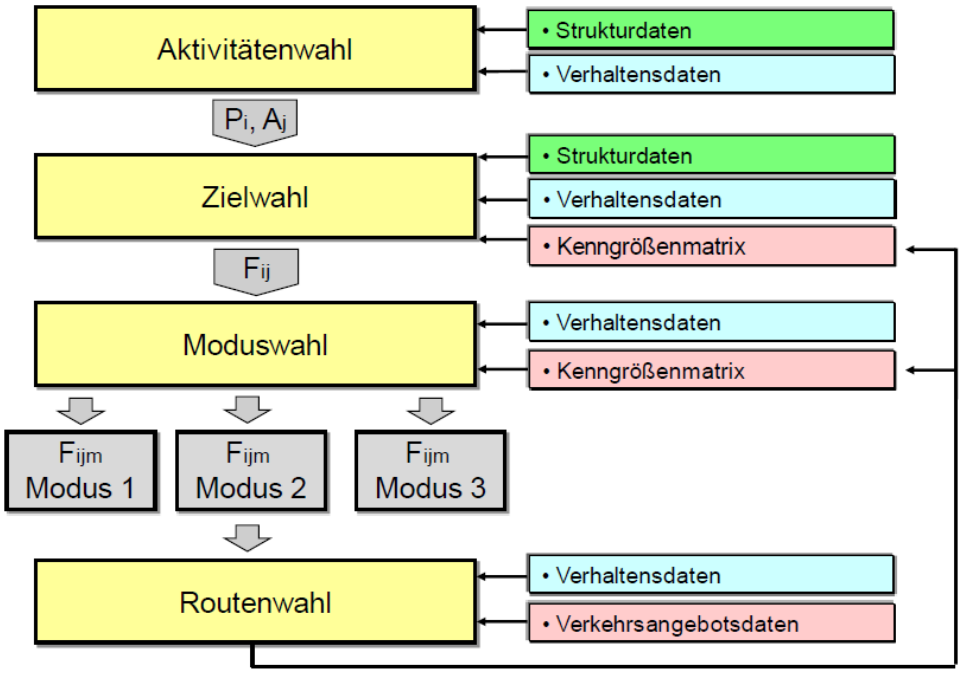


Abbildung 3-1: Schematischer Ablauf und Eingangsdaten in das Vier-Stufen-Modell (Friedrich, 2012).

Bei der Verkehrserzeugung oder Aktivitätenwahl wird für jeden Bezirk und jede Nachfrageschicht das Quell- und Zielaufkommen berechnet. In dieser Arbeit werden Ortveränderungen ausschließlich für die Quelle-Ziel-Gruppen „Wohnen-Arbeiten“ und „Arbeiten-Wohnen“ betrachtet und damit die Aktivitätenkette „Wohnen-Arbeiten-Wohnen“. Dabei wird davon ausgegangen, dass jeder Erwerbstätige nur heimatgebundene Fahrten und pro Arbeitstag genau zwei „motorisierte“ Fahrten macht. Ergebnis in dieser Untersuchung sind die Randsummen für die Quell- und Zielverkehrsaufkommen der Nachfrageschichten „Wohnen-Arbeiten“ bzw. „Arbeiten-Wohnen“, d.h. der Nachfragematrix.

Im zweiten Schritt, der Verkehrsverteilung oder Zielwahl, werden die einzelnen Elemente der Nachfragematrix berechnet. Dabei wird einerseits die Attraktivität der Nachfrageschicht und andererseits der Widerstand der Ortsveränderung zwischen den betrachteten Matrixzellen oder Bezirken betrachtet. In VISUM ist hierfür ein Gravitationsmodell implementiert. Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass die durchgeführten Fahrten direkt proportional zum jeweiligen Quell- und Zielverkehr und den jeweilig ermittelten Nutzenfunktionen zwischen diesen Bezirken sind. Als Nutzenfunktion V_{VT} wird ein zweiseitig gekoppeltes Logitmodell verwendet. Sie ist für alle Rechnungen unverändert und lautet:

$$V_{VT} = -0{,}05 * tt0 \qquad (3\text{-}1)$$

wobei tt0 der Reisezeit MIV im unbelasteten Netz entspricht

Bei Schritt drei, der Moduswahl, wird die gesamte Nachfrage pro Nachfrageschicht auf die einzelnen Verkehrsträger aufgeteilt. Diese Aufteilung erfolgt in dieser Arbeit bimodal auf Pkw (MIV) oder öffentlichen Verkehr (ÖV). Für beide Modi wurde der Nutzen auch hier mittels Logit Ansatz mit den beiden nachfolgenden linearen Nutzenfunktionen bewertet. Diese sind erneut für alle Betrachtungen konstant geblieben und lauten für MIV und ÖV:

Nutzenfunktion für MIV: $V_{MIV} = -0{,}05 * ttc - 0{,}05 * tps$ (3-2)

wobei ttc der Reisezeit im belasteten Netz (min) entspricht und
tps der Parksuchzeit für Bezirk (in min) entspricht.

Nutzenfunktion für ÖV: $V_{\ddot{O}V} = -0{,}05 * JRT - 0{,}2 * NTR - 0{,}05 * OWTA$ (3-3)

wobei JRT die gesamte Reisezeit in Minuten ist;
NTR die Anzahl der Umsteigevorgänge angibt und
OWTA die Startwartezeit in Minuten bedeutet.

Im abschließenden Schritt, der Verkehrsumlegung, werden die ermittelten Quelle-Ziel-Verkehrsströme auf die im Netzmodell vorhandenen Wege oder Routen zugeordnet. Die Routenwahl erfolgt für den MIV mittels Gleichgewichtsumlegung unter Verwendung einer Widerstandsfunktion vom Typ BPR mit den Parametern a = 0,8 und b = 4. Andere Faktoren gehen nicht die Widerstandsfunktion ein.

$$t_{akt} = t_0 * \left(1 + a \left(\frac{q}{q_{max}}\right)^b\right) \quad (3\text{-}4)$$

Die ÖV Umlegung erfolgte fahrplanfein, ermittelt also für alle Quelle-Ziel-Relationen die Verbindungen entsprechend der festgelegten Fahrplaninformation. Die Umlegungszeit beträgt 1 Stunde, da dieser Arbeit die Annahme eines konstanten Taktes zugrunde liegt[1]. Die Verbindungssuche erfolgt nach dem Branch & Bound Verfahren.

Die empfundene Reisezeit (ERZ) beinhaltet nachfolgende Parameter mit den angegebenen Faktoren. Ein Betreiberwechsel wird nicht berücksichtigt. Die ERZ berechnet sich zu:

ERZ = Fahrzeit im Fahrzeug * 1 (3-5)
+ Zugangszeit * 1 bzw. 1,5 (T5) [2]
+ Abgangszeit * 1 bzw. 1,5 (T5)
+ Gehzeit * 1
+ Startwartezeit * 2 [3]
+ Umsteigewartezeit * 5
+ Umsteigehäufigkeit * 5 min / Umsteigen

Der Widerstand einer Verbindung ist in dieser Arbeit eine lineare Kombination aus ERZ und der Verfrühung bzw. Verspätung dieser Verbindung. Die ERZ, eine Verfrühung und eine Verspätung werden jeweils mit dem Faktor 1 bewertet. Die Fahrtkosten fließen dagegen nicht in Widerstand ein. Der Widerstand einer Verbindung wird in das Aufteilungsmodell nach Kirchhoff eingesetzt, um somit deren Nutzen und schließlich den Anteil der Verbindung an der gesamten Nachfrage zu berechnen. Der Parameter der Widerstandsempfindlichkeit β der Kirchhoff-Gleichung wurde zu 4 gesetzt.

[1] Diese Arbeit betrachtet somit die „5 Tage Arbeitswoche“ und berücksichtigt keine Änderung des Verkehrsaufkommens und des Verkehrsangebotes des Abend-, Samstag- oder Sonntagsverkehr, siehe Kapitel 4.3.
[2] Siehe Details in nachfolgendem Kapitel „Ergebnisse“.
[3] Die Startwartezeit beträgt 50% der Fahrzeugfolgezeit. Hierfür wurde für das Attribut Startwartezeit eine in VISUM implementierte Gleichung angewendet. Die Parameter sind hierbei: A = 0,5 und E=1.

4. Strukturdaten und Kostenrechnung

4.1 Nachfragestruktur der Modellstadt

Untersucht wurde eine kreisförmige Modellstadt mit einem Zentrum in ihrer Mitte. Der angenommene Durchmesser dieser Stadt beträgt 10 km. Die Modellstadt wurde für die Modellierung in 121 Bezirke aufgeteilt. Zusätzlich sind 8 Außenbezirke vorhanden. Letztere sind im Winkelabstand von 45° angebracht (siehe Abbildung 4-1).

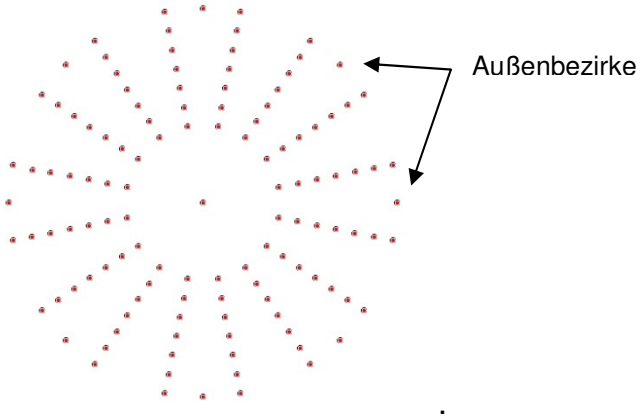
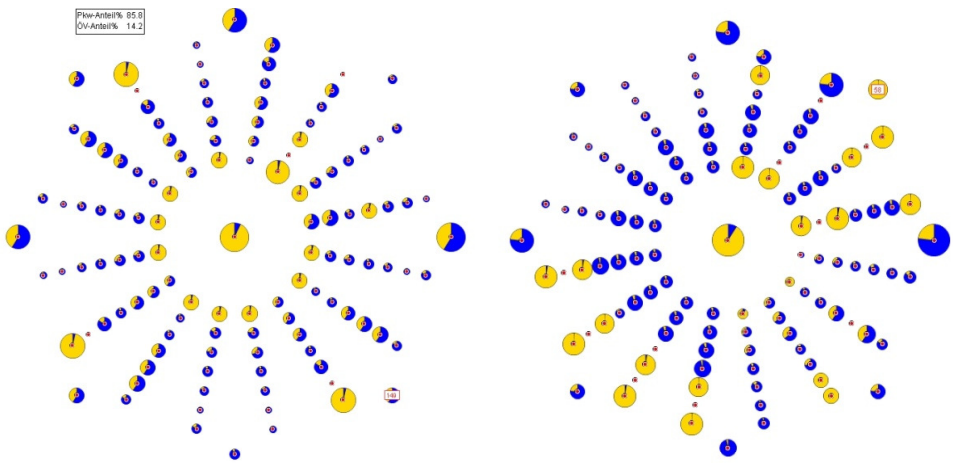


Abbildung 4-1: Bezirksstruktur der Modellstadt

Als Aktivitätenketten wurde Wohnen-Arbeit-Wohnen betrachtet. Quelle der Verkehrsnachfrage sind die Wohnorte der Erwerbstätigen der Stadt, Ziele sind Arbeitsplätze. Zwei verschiedene Erwerbstätigen- bzw. Arbeitsplatzverteilungen wurden für diese Aktivitätenketten bewertet. Diese sind in Abbildung 4-2 dargestellt. Verteilung ET1 repräsentiert 264.000 Erwerbstätige bzw. Arbeitsplätze, Verteilung ET2 leicht erhöht 291.000 Erwerbstätige bzw. Arbeitsplätze. Den einzelnen Bezirken wurden sogenannte Gebietstypen zugewiesen, die charakteristische Brutto-Erwerbstätigen- bzw. Arbeitsplatzdichten aufweisen. Entsprechende Dichteangaben für die betrachteten Gebietstypen reines Wohngebiet, allgemeines Wohngebiet, Mischgebiet, Dienstleistung/Industrie und Kerngebiet Innenstadt wurden den Angaben von Friedrich (2013) entnommen. Dem Zentrum wurde eine erhöhte Arbeitsplatzdichte zugewiesen. Die Angaben für alle Bezirke finden sich im Anhang.



Verteilung ET1 Verteilung ET2

Quelle = Erwerbstätige= gelb, Ziele = Arbeitsplätze = blau

Abbildung 4-2: Betrachtete Erwerbstätigen- bzw. Arbeitsplatzverteilungen

4.2 MIV und ÖV Netz

Die Stadt ist für den Individualverkehr mittels 16 vom Zentrum ausgehende Radialstraßen (die Winkeldifferenz beträgt jeweils 22,5°) und zusätzlich 10 kreisförmig um das Zentrum angeordnete Tangentialstraßen erschlossen. Die Tangentialstraßen schneiden die Radialstraßen im Abstand von 500 m. Die Tangentialstraße R1 ist der dem Zentrum am nächsten gelegene Ring, R10 der äußerste Ring. Abbildung 4-3 zeigt diese Straßenanordnungen.

Den einzelnen Straßen sind verschiedene Typen zugeordnet, die sich in ihrer Kapazität und maximalen Geschwindigkeit im unbelasteten Netz unterscheiden. Einzelne Fahrstreifen wurden nicht modelliert und Mehrstreifigkeit auch nicht berücksichtigt. Während die Kapazität in dieser Arbeit unverändert gelassen wurde, wurde die Geschwindigkeit für verschiedene Simulationsvarianten variiert, siehe Tabelle 4-1.

	Straßentyp →	**50**	**51**	**60**	**65**	**Bemerkung**
	Netztyp ↓					
V_{mittel} (km/h)	T1 / T2	40	40	40	30	
	T3 / T4	30	30	30	22,5	Reduktion um 25%
	T5	40	30	30	20	
Kapazität (Fzg / Tag)	alle	24000	18000	18000	8000	für alle Varianten

Tabelle 4-1: Straßentypen mit Kapazitäten und mittleren Geschwindigkeiten im unbelasteten Netz

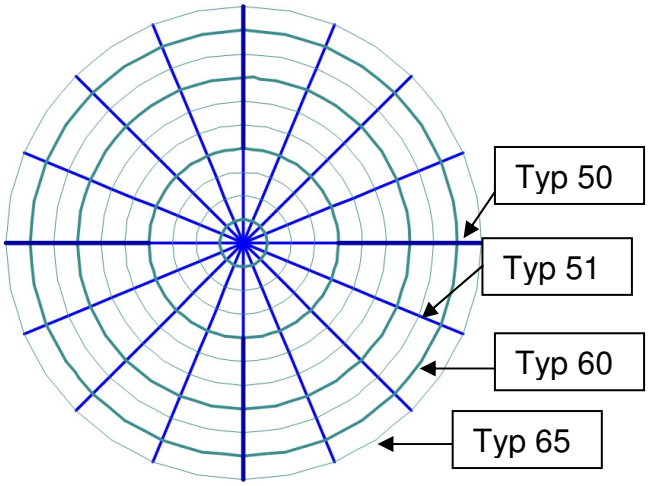
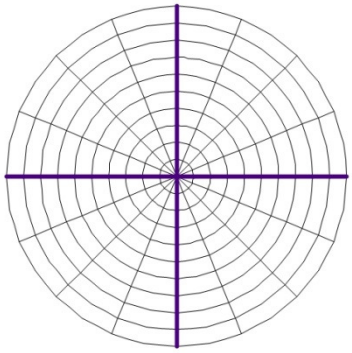


Abbildung 4-3: Straßenanordnungen der untersuchten Modellstadt und Straßentypen.

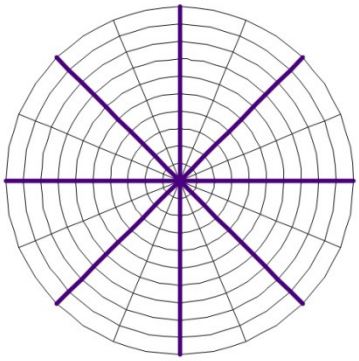
Das Liniennetz des öffentlichen Verkehrs folgt diesem Straßenbild: Es wurden den Radialstraßen folgende Durchmesserlinien und den Tangentialstraßen folgende Tangentiallinien modelliert: Durchmesserlinie DL1 verläuft in Ost-Westrichtung, DL2 in Nord-Südrichtung, DL3 und DL4 unter 45° und 225° bzw. 135° und 315°. DL5 bis DL8 sind jeweils um 22,5° gegenüber DL1 bis DL4 versetzt. Die Lage der Tangentiallinie wird durch die Zahl 4, 5, 7 oder 9 definiert. Diese bezeichnet den Ring bezüglich zum Zentrum analog der obigen Straßennomenklatur. Tabelle 4-2 listet die untersuchten Netze auf, Abbildung 4-4 zeigt ausgewählte Netzstrukturen.

Liniennetz → Linienanzahl ↓	2DL	4DL	4DL_R4 4DL_R5 4DL_R9	4DL_R5R9	8DL	8DL_R5 8DL_R9	8DL_R5R9	8DL_R5R7R9
Durchmesser	2	4	4	4	8	8	8	8
Tangential	0	0	1	2	0	1	2	3
Lage der Tangentiallinie	-	-	4., 5. oder 9. Ring	5. und 9. Ring	-	5. oder 9. Ring	5. und 9. Ring	5., 7.und 9. Ring

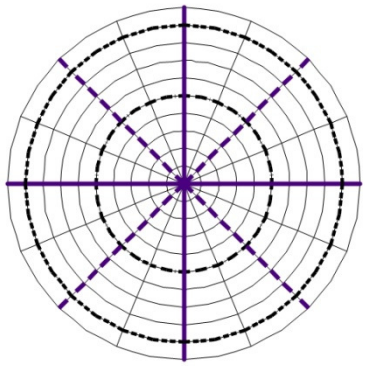
Tabelle 4-2: Übersicht der untersuchten ÖV Liniennetze



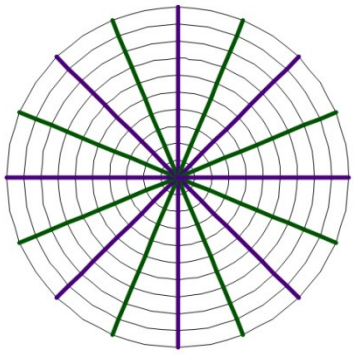
2 Durchmesserlinien (2DL)



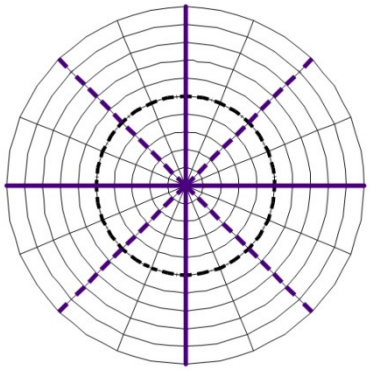
4 Durchmesserlinien (4DL)



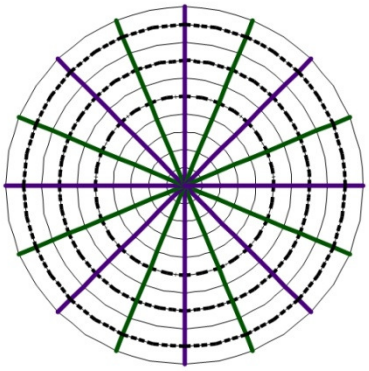
4 Durchmesserlinien und Tangentiall. R5 und R9 (4DL_R5R9)



8 Durchmesserlinien (8DL)



8 Durchmesserlinien und Tangentiallinie R5 (8DL_R5)



8 Durchmesserlinien und 3 Tangentiallinien R5/R7/ R9 (8DL_R5R7R9)

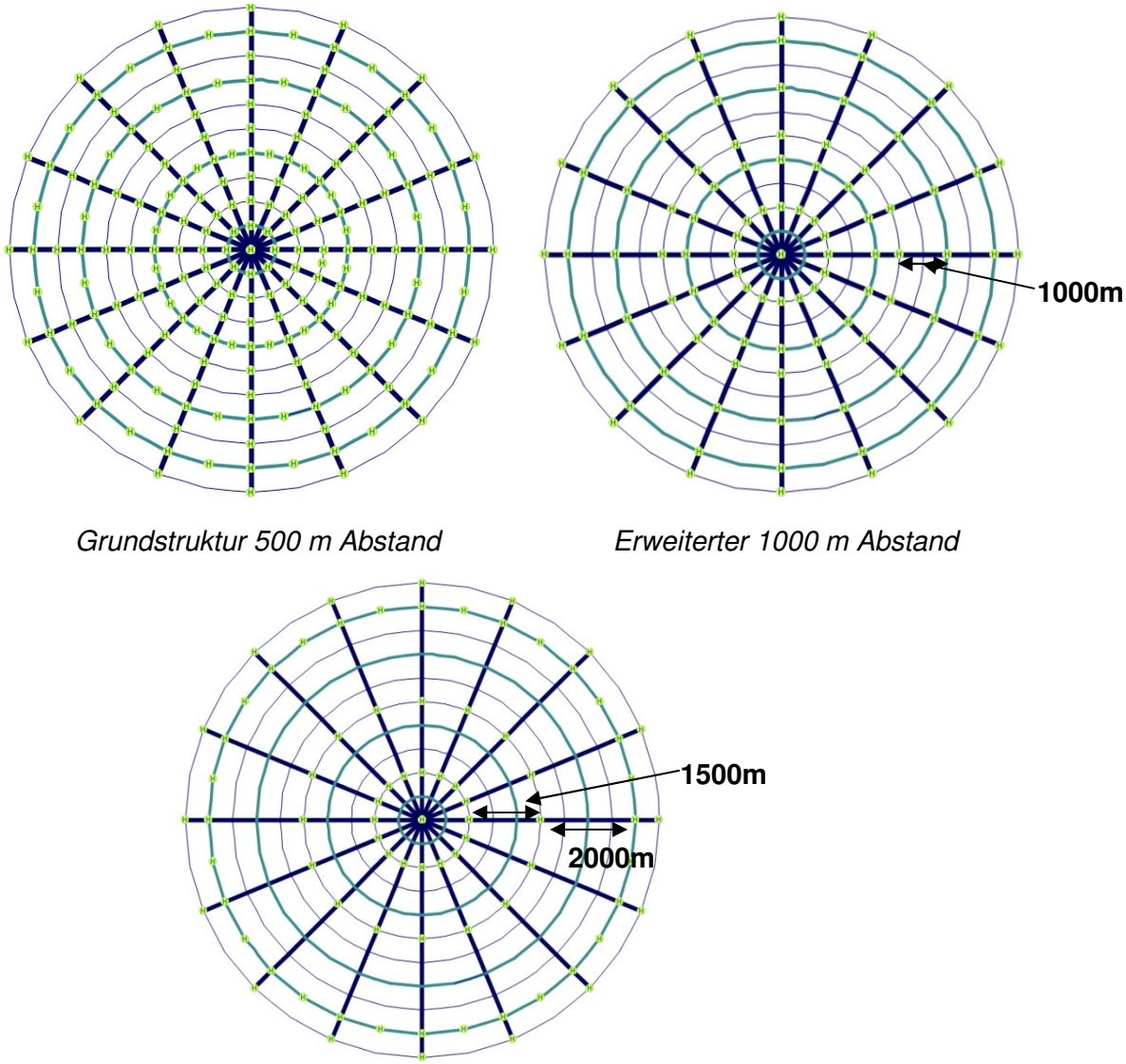
Abbildung 4-4: Modellierte Liniennetze für den öffentlichen Verkehr (Netz 8DL_R5R9 nicht gezeigt).

Als weiterer Parameter der ÖV Linienetze wurde der Haltestellenabstand variiert:

- Die Grundnetze weisen für die Radiallinien einen Haltestellenabstand von 500 m auf und für die Tangentiallinie von 490 m (Linie R5), 690 m (Linie R7) und 880 m (Linie R9) auf. Im Weiteren wird diese Struktur wird als solche mit einem „mittleren Haltestellenabstand“ von 500 m bezeichnet.
- In einem zweiten Netz wurde der Haltestellenabstand von Durchmesser und Tangentiallinien soweit möglich jeweils verdoppelt (Bezeichnung „mittlerer Haltestellenabstand“ 1000 m). Lediglich bei der Tangentiallinie R9 wurde auf eine Verdoppelung verzichtet, da hier der Haltestellenabstand bereits 880 m beträgt.
- Bezüglich der Untersuchung sehr großer Haltestellenabstände wurde eine dritte

Netzstruktur geschaffen deren Durchmesserlinien 1500 und 2000 m Abstände zwischen einzelnen Haltestellen aufweisen[4]. Die Haltestellen der Tangentiallinien wurden nicht geändert. Diese Anordnung wird als „1000m-plus“ mittleren Haltestellenabstand bezeichnet.

Alle Haltestellenanordnungen sind in Abbildung 4-5 dargestellt. Die Anbindungen der Bezirke an das MIV bzw. ÖV Netz werden unten beschrieben.



Grundstruktur 500 m Abstand *Erweiterter 1000 m Abstand*

modifizierter „1000m-plus“ Abstand

Abbildung 4-5: Modellierte Haltestellenanordnungen

[4] Aufgrund dessen wurden die Haltestellen auf dem Ring 7 entfernt. Daher konnte für die Netzstruktur mit 8 Durchmesserlinien nicht mit 3 Tangentiallinien kombiniert werden.

Aufgrund der geringeren Anzahl an Haltestellen für Netzstrukturen mit mittleren Haltestellenabstand 1000 m oder mehr verringert sich im Linienverkehr die gesamte Haltestellenaufenthaltsdauer pro Linienfahrt. Nur aufgrund dessen sind die mittlere Reisegeschwindigkeit von ÖV Netzen mit größerem Haltestellenabstand gegenüber Netzen mit 500 m mittleren Haltestellenabstand höher[5]. Nachfolgende Tabelle 4-3 zeigt die mittleren Reisegeschwindigkeiten. Die mittleren Reisegeschwindigkeiten für Liniennetze „1000m-plus" sind gegenüber Netzen mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand unverändert.

Linie	Haltestellenabstand	
	500 m	1000 m / 1000m-plus
DL1 - DL8	20	24
R4	16,1	
R5	16,4	23,6
R7	18,1	24,1
R9	18,9	23,5

Tabelle 4-3: Mittlere Reisegeschwindigkeiten in km/h für Durchmesserlinien und Tangentiallinien der modellierten ÖV Netze

4.3 ÖV Bedienung

4.3.1 Taktverkehr und Betriebszeit

In der Regel wurde allen ÖV Linien derselbe Takt zugewiesen. Insgesamt wurden 3 Takte betrachtet: 10 min, 20 min und 30 min. Zusätzlich wurde für ausgewählte Liniennetze auch eine Taktverdichtung für die Durchmesserlinien auf 5 min während der Hauptverkehrszeit betrachtet.

Es wurde ausschließlich die Betriebszeit für den Werktags Verkehr zwischen 5:30 und 20:00 Uhr mit konstantem Takt betrachtet, also eine Betriebszeit von 14,5 Stunden. Im Falle der Taktverdichtung erfolgt diese zwischen 6:30 und 9:30 Uhr für die Vormittagsspitze und zwischen 15:30 und 18:30 Uhr in der Abendspitze (d.h. für diese Fälle 6 Stunden Hauptverkehrszeit und 8,5 Stunden Nebenverkehrszeit). Somit werden Abend- bzw. Wochenendverkehr in dieser Arbeit nicht betrachtet.

4.3.2 Fahrzeugtypen

Erste Rechnungen zeigten, dass für das Verkehrsaufkommen Busse als Fahrzeuge geeignet sind und Straßenbahnen aus Kapazitätsgründen für das Untersuchungsgebiet nicht notwendig sind. Eine nachträgliche Ergänzung ist problemlos möglich, da die Parameter Fahrgastkapazität pro Fahrzeug und Fahrzeug relevante Kosten parametriert sind. Als Fahrzeuge wurden daher nur 12 m Standardstadtbusse und 18 m Gelenkbusse für den innerstädtischen Verkehr verwendet. Diese wurden hinsichtlich ihrer Sitzplatz- und gesamten Fahrgastkapazität und variablen Betriebskosten unterschieden.

Die beiden Fahrzeugtypen zugrunde gelegten Betriebskosten werden im nachfolgenden Kapitel detailliert erläutert.

[5] Im Visummodell beinhaltet die Fahrtzeit zwischen den Haltestellen auch die Aufenthaltszeit an der Haltestelle von durchschnittlich 30 Sekunden. Für die Zentrumshaltestelle wurde ein Haltestellenaufenthalt von 1 bis 1,5 Minuten modelliert.

4.3.3 Fahrzeugkapazitäten und Auslastung während der Spitzenstunde

Derzeit eingesetzte Standardbusse weisen eine Sitzplatzkapazität von 35 Plätze und Gelenkbusse von 70 Plätze auf (Dmochowski, 2012). Die maximal zulässige Gesamtfahrgastbelegung beträgt für diese zwei Fahrzeugtypen 70 bzw. 150 Plätze.

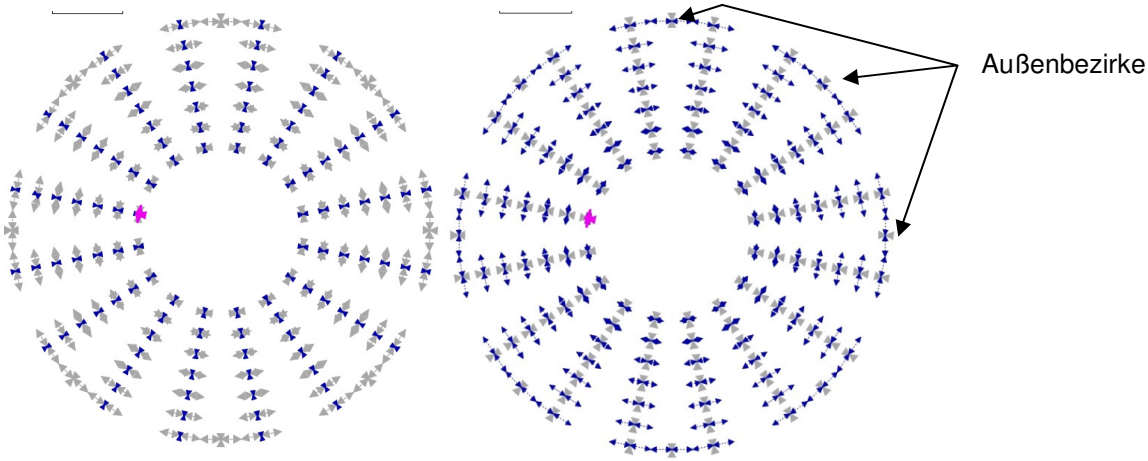
Die maximalen Spitzenstundenbelastungen der einzelnen ÖV Linien wurden bezüglich ihrer Sitzplatzbelegung bewertet. Für die Spitzenstunde wird eine 150% Belegung der Sitzplätze erlaubt. Die Belastung der Spitzenstunde beträgt laut Weidmann (2012) für den innerstädtischen Verkehr etwa 10% der Tagesbelastung. Die Sitzplatzauslastung berechnet sich dann als Quotient aus Belastung (entspricht 10% der Tagespersonen km der betrachteten Linie) und Sitzplatzangebot (Produkt aus Anzahl der Sitzplätze bzgl. Bustyp und Service km am Tag geteilt durch die Betriebsstunden am Tag).

$$A_{Sitzpl} = \frac{Personen\ km}{Sitzplatz\ km} = \frac{10\% * Tagespersonen\ (Linie)}{\frac{Sitzplätze\ (Bustyp) * Service\ km\ (Linie)}{Betriebsstunden}} \quad (4\text{-}1)$$

Das praktische Vorgehen hierbei ist folgendes: Wird für eine Linie die Auslastungsgrenze für einen Standardbus überschritten, so wird dieser durch einen Gelenkbus ersetzt und sichergestellt, dass diese doppelte Sitzplatzkapazität ausreichend ist. Abschließend wird überprüft, dass für die Belastungsspitze auch die Gesamtkapazität der gewählten Busses nicht überschritten wird. Ist beides sichergestellt wird der ausgewählte Bustyp für die Betriebskostenermittlung verwendet.

4.4 Modellierung in VISUM

Wie bereits ausgeführt werden die Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung auf 121 (innere) Bezirke der Modellstädte und 8 Außenbezirke verteilt. Die inneren Bezirke sind an die Tangenialstraßen R4 bis R10 und das Zentrum angebunden. Das Gebiet von Zentrum bis zur Radialstraße R3 wird mit durch den Zentrumsbezirk abgebildet und entsprechend in höheren Quell- und Zielwerten berücksichtigt. Die äußeren Bezirke sind an die jeweils äußersten Knoten der 0°, 45°, 90°, 135°, 180°, 225°, 270° und 315° Achsen angebunden. Abbildung 4-6 zeigt die Anbindung der Modellstadtbezirke an den MIV (Bild a) und an den ÖV (Bild b). Eine detaillierte Darstellung der Anbindungen externer Bezirke zeigt Abbildung 4-7.



a) MIV Anbindung *b) ÖV Anbindungen*

Abbildung 4-6: Anbindungen für die alle Bezirke der Modellstadt

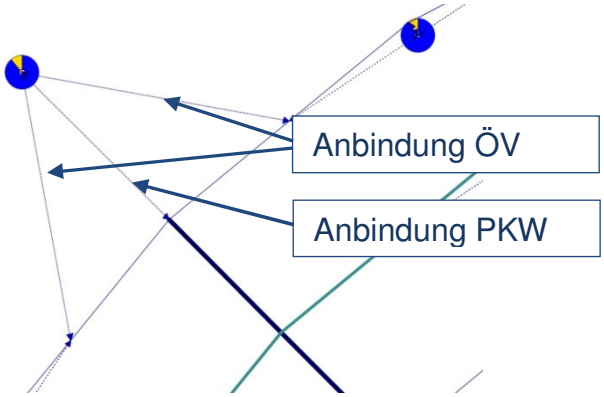
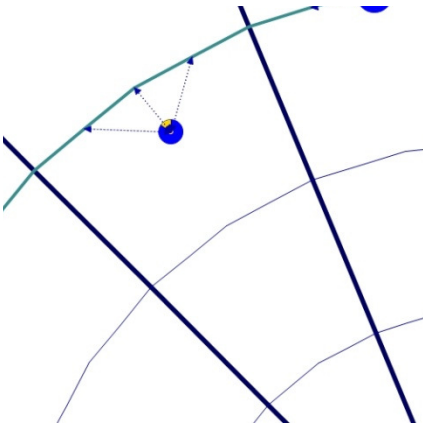
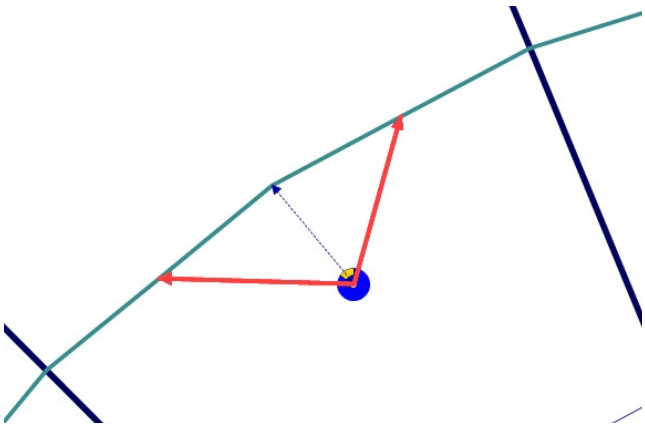


Abbildung 4-7: Anbindungen für die 8 äußeren Bezirke.

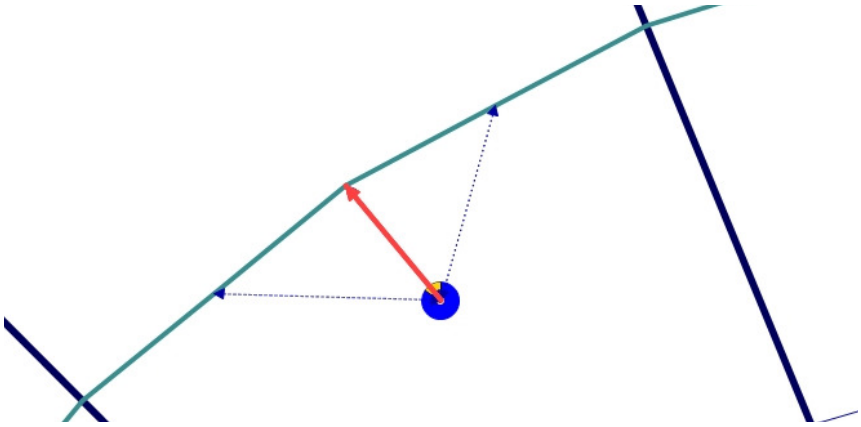
Die Kreisbögen zwischen zwei Radialstraßen weisen 3 einzelne Knoten auf. Der MIV wurde komplett über den mittleren Knoten angebunden, der ÖV Fußverkehr zu je 50% an die beiden äußeren Knoten. Diese Anbindungen zeigt nachfolgende Abbildung 4-8, in einer Übersicht (a) und in zwei Detaildarstellungen für PKW und ÖV (b und c).



a) Übersicht – PKW und ÖV



b) 2 Anbindungen pro Bezirk für ÖV, jeweils 50%



c) Zentrale Anbindung pro Bezirk für PKW

Abbildung 4-8: Anbindung des MIV über mittleren Knoten zwischen 2 Radialstraßen und des ÖV zu je 50% über die zwei Knoten

4.5 Kostenrechnung

4.5.1 Erträge

Pro Fahrgast wurde ein konstanter Erlös von 0,80€ angenommen. Dieser Betrag ergibt sich aus der Überlegung, dass die überwiegenden Einnahmen eines ÖPNV Unternehmens in Deutschlang aus dem Verkauf von Zeitkarten besteht.

Dieser Erlös beruht auf den folgenden Annahmen:

- Kosten einer Monatskarte für eine mittelgroße Stadt von ca. 50€. Kauf von 10 Monatskarten pro Jahr.
- 210 Arbeitstage pro Kalenderjahr
- 2 Fahrten pro Arbeitstag und 1 weitere Fahrt / Kalenderwoche

Damit ergibt sich ein mittlerer Erlös von 1,04€. Vergünstigungen für Schüler, Auszubildende, Studenten, Schwerbeschädigte oder Rentner verringern diesen Erlös auf angenommene 0,80€ pro Fahrgast.

Laut dem Verband deutscher Verkehrsunternehmen betrugen in 2012 die mittleren Kosten für eine ÖPNV Fahrt 1,55€ und der mittlere Erlös beträgt 0,76€. Dies stimmt sehr gut mit obiger Annahme überein (VDV, 2012). Mit etwas geringeren durchschnittlichen Einnahmen pro Fahrgast rechnet der Rhein-Neckar-Verbund. Hier werden durchschnittlich 0,70 € ermittelt (Dmochowski, 2013).

4.5.2 Berücksichtigte Kosten

Unter den Randbedingungen der Aufgabenstellung werden Betriebsstoffe der Fahrzeuge, Zeitkosten durch Fahrer und Personal zur Instanthaltung und Betriebskosten der Fahrzeuge aufgrund von Abschreibung und Versicherung betrachtet.

Bei Betriebskosten werden bei den Betriebsstoffen der Fahrzeuge nur Antriebs- und Reifenkosten pro Fahrzeugkilometer berücksichtigt. Frank et al. (2008) geben Reifenkosten zu ca. 0,15 €/km an. Als Dieselverbrauch von Gelenkbussen benennen die Stadtwerke Augsburg mit 50 l/100km (Bartosch, 2007), was bei gegenwärtigen Kosten von 1,4 €/l etwa 0,75 €/km ergibt. Dies passt gut zu den Angaben von Frank et al. (2008), welche nach Vorgabe der Richtlinie VDV 2318 einen Verbrauch von 42 l/100km für 12 m Standardbusse und von 55 l/100km für 18 m Gelenkbusse angeben. Damit errechnet sich ein Dieselpreis von 0,60€/km bzw. 0,77 €/km errechnen. Dmochowski (2013) gibt aktuell etwas höhere Durchschnittskosten für Fahrzeuge von 0,90 €/km für Standardstadtbusse, 1,20 €/km für Gelenkbusse und 1,90 €/km für Straßenbahnen an. Diese Kostensätze beinhalten neben Treibstoff zusätzlich Instanthaltung, Material, Reinigung, Versicherung und Kosten für Hauptuntersuchungen, sowie die damit verbundenen Kosten für längere Standzeiten der Fahrzeuge.

In dieser Arbeit werden daher für „Verbrauchskosten“ Treibstoff und Reifen für Standardstadtbusse 0,75 €/km und für Gelenkbusse 0,95 €/km angenommen. Für das Fahrfertigmachen werden pro pauschal 0,5 Stunden pro Betriebstag und Fahrzeug mit den unten genannten Stundenlöhnen eingesetzt.

Zeitkosten werden betrachtet für die Fahrtzeiten, Pause- und Wendezeiten, Leerfahrten bei Tagesbeginn und-ende sowie für die Instanthaltung und Reinigung der Fahrzeuge. Für Pausen und Wendezeiten werden pauschal 17% auf die Fahrtzeiten aufaddiert. Für Leerfahrten werden täglich in Summe 1 Stunde angenommen. Bezüglich Instanthaltung wird ein Zeitaufwand von 0,5 Stunde pro Tag angenommen. Die mittleren Zeitkosten für Fahrer und Instandhaltungspersonal werden mit 24 €/h bewertet. Diese berücksichtigen

einen Grundstundenlohn von 13 €/h, die in Deutschland gegenwärtig üblichen 42% Aufschläge für Sozialabgaben, sowie Abend- und Wochenendaufschläge. Aktuelle Zeitkosten gibt Dmochowski (2013) für die Rhein-Neckar-Verkehr GmbH, dem Betreiber des ÖV Verkehrs im Rhein-Neckar-Verbund etwas höher mit 26 €/h für Busse ohne Zuschläge und zu 32,5 €/h inklusive Sonntags- oder Wochenendzuschläge an. Da jedoch die Zusammensetzung leicht von den hier verwendeten Randbedingungen abweichen, wurden unverändert 24 €/h als Zeitkostensatz angenommen.

Die Betriebskosten der Fahrzeuge beinhalten deren Abschreibung über 10 Jahre bei einer 5% Verzinsung und Anschaffungskosten von 230 T€ für den Standardbus bzw. 280 T€ für den Gelenkbus. eine öffentliche Investitionsförderung ist nicht berücksichtigt. Die oben genannten Zahlen beruhen auf Angaben von Dmochowski (2012) und Weidmann (2012). Weiter werden Versicherungskosten für beide Fahrzeugtypen von 2500 € bzw. 3000 € berücksichtigt. Einschließlich einer betrieblichen Fahrzeugreserve von 15% und des Betriebs an 320 Tagen pro Jahr ergeben sich rechnerische Tageskosten von 135 €/Tag und 185 €/Tag für Standard- bzw. Gelenkbus. Gewählt wurden schließlich Fahrzeugbetriebskosten von 150 €/Tag bzw. 200 €/Tag, um andere in der obigen vereinfachten Betrachtung nicht berücksichtigte Verbrauchskosten zu beinhalten. Die detaillierte Berechnung befindet sich im Anhang.

4.5.3 Ergebnis

Ziel dieser Arbeit ist eine Bewertung, welche ÖV Netze sich in der zugrundeliegenden Modellstadt sich wirtschaftlich betreiben lassen. Diese Bewertung erfolgt mittels des jeweiligen absoluten und des entsprechenden relativem Ergebnis.

Das absolute Ergebnis entspricht der Differenz aller Erlöse abzüglich aller im vorigen Kapitel erläuterten Kosten:

$$Ergebnis = \sum_{alle\ Linien} Erlöse - \sum_{alle\ Linien} Kosten \tag{4-2}$$

Als relatives Ergebnis wird der Quotient der Summen Erlöse und Summen der Kosten betrachtet. Dieser Quotient wird um 1 reduziert. Damit entspricht ein relatives Ergebnis berechnet größer Null einem positiven Betriebsergebnis:

$$relatives\ Ergebnis = \frac{\sum_{alle\ Linien} Erlöse}{\sum_{alle\ Linien} Kosten} - 1 \tag{4-3}$$

5. Ergebnisse

5.1 Untersuchte Parameter

Außer Netztyp (Beschreibung nachfolgend), Takt und Fahrzeugtyp wurden weitere Parameter untersucht, die für die Benutzerwahl des Verkehrsmittels wichtig sind[6].

Im Einzelnen sind dies: Eine Parksuchzeit für die Innenstadtbezirke, die Variation der zulässigen MIV Geschwindigkeit, die Einführung von Wartezeiten an wichtigen Knoten der Innenstadt, die Anbindungszeit für Fußgänger zum nächstgelegenen Knoten und die Bewertung der Zugangs- bzw. Abgangszeit bei der Berechnung der empfundenen Reisezeit. Die untersuchten Parametersätze werden sogenannten Netztypen T1 bis T5 zugeordnet; sie sind in Tabelle 5-1 zusammengestellt.

	Anbindungs-zeit Fußg.	**mittlerer Haltestellenabstand**			**Parksuchzeit** (min.)		**Zu/Abgangs-zeit in ERZ**	**zulässige MIV Geschwindigkeit**			**Wartezeit an Innenstadt-**
Erläuterungen →	**1)**		**2)**		**3)**		**4)**	**5)**			**6)**
Netztyp1	min	500 m	1000 m	1000m plus	10/5	20/10/5		40/30	40/ 30/20	30/22,5	sec
T1	3-7	**x**	**x**		**x**		**1,0**	**x**			**0**
T2	3-7	**x**	**x**	**x**		**x**	**1,0**	**x**			**0**
T3	3-7	**x**	**x**		**x**		**1,0**			**x**	**0**
T4	3-7	**x**	**x**			**x**	**1,0**			**x**	**0**
T5 (ET2)	4	**x**			**x**		**1,0**			**x**	**30**
T5 (ET1)	4	**x**			**x**		**1,5**		**x**		**30**

Tabelle 5-1: Betrachtete Netzvarianten und Betriebsparameter, siehe auch Fußnote [7].

Erläuterungen zur Tabelle 5-1:

1) *Anbindungszeit für Fußgänger:* Außenbezirke weisen 10 Minuten auf. Innenbezirke:
   a. 3-7 bedeutet: 3 min. für Ring 4, 4 min. für die Ringe 5 und 6, 5 min. für Ring 7, 6 min. für Ring 8, 7 min. für Ring 8 und 7 min. für Ring 9 und 10.
   b. 4 bedeutet konstant 4 Minuten für alle Innenbezirke.
2) *Mittlerer Haltestellenabstand*: siehe Definition im Kapitel 4.
3) *Parksuchzeit*: 10/5 entspricht einer Parksuchzeit von 10 min. für den Zentrumsbezirk und 5 min. für die Bezirke in Ring 3. 20/10/5 entspricht einer Parksuchzeit von 20 min. für den Zentrumsbezirk, von 10 min für die Bezirke der ersten und von je 5 min. für die Bezirke des 2 und 3. Ringes. Siehe Darstellungen in Abbildung 5-1.
4) *Zu- bzw. Abgangszeit in ERZ*: die angegebene Zahl stellt den Bewertungsfaktor bei der Berechnung der empfundenen Reisezeit dar (siehe Kapitel 3).
5) *Zulässige MIV Geschwindigkeit im unbelasteten Netz*:
   a. 40 / 30 erlauben Geschwindigkeiten von 40 km/h für alle Radial- und die „wichtigen“ Tangentialstraßen, d.h. für die Ringe R1, R4, R7 und R9. Für die restlichen Tangentialstraßen ist dies auf 30 km/h begrenzt;
   b. 30 / 22,5 entspricht einer Reduktion von 25% gegenüber den obigen Werten;

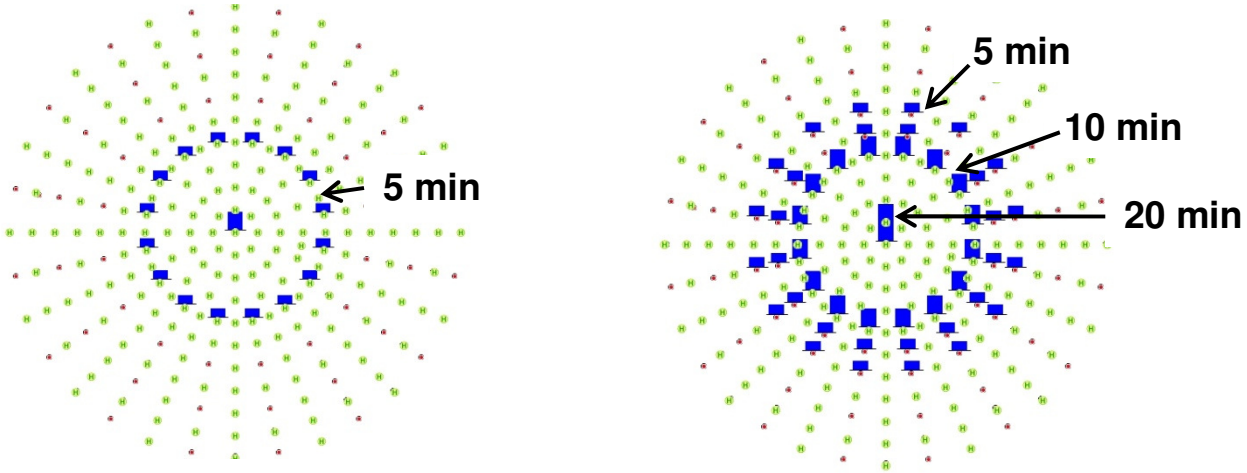
[6] Die Nutzenfunktion der Umlegung basiert nur auf Zeiteffekten und beinhaltet keinen Kostenparameter.
[7] Für Netztyp T5 wurde für Verteilung ET2 mit den MIV Geschwindigkeiten 30 und 22,5 km/h, sowie einem Faktor 1,5 für die Zu- und Abgangszeiten modelliert. Die Ergebnisse unterschieden sich weniger als 3% gegenüber Rechnungen mit in der Tabelle angegebenen Parameter. Damit werden beide Einstellungen als vergleichbar bewertet. Verifikation anhand Liniennetzen: 4DL_R5R9, 8DL_R5 und 8DL_R5R9.

c. 40 / 30 / 20 entspricht 40 km/h auf den äußeren Teilen der 0°, 90°, 180° und 270° Radialstraßen (Straßentyp 50), 30 km/h auf den restlichen Radial- und den „wichtigen“ Tangentialstraßen und 20 km/h auf den restlichen Tangentialstraßen;

6) Wartezeit in Innenstadtknoten: Siehe markierte Knoten in der Abbildung 5-2 unten[8].

Damit lassen sich die betrachteten Netztypen folgendermaßen charakterisieren:

- Netztyp T1 entspricht dem Referenzfall;
- Netztyp T2 entspricht Referenzfall bei verlängerten Parksuchzeiten;
- Netztyp T3 weist gegenüber dem Referenzfall eine um 25% reduzierte erlaubte MIV Geschwindigkeit auf;
- Netztyp T4 entspricht T3 und weist zusätzlich verlängerte Parksuchzeiten auf;
- Netztyp T5 weist mehrere den ÖV begünstigende Faktoren auf: Reduktion der MIV Geschwindigkeit, im Mittel deutlich reduzierte Anbindungszeiten von einheitlich 4 Minuten (bei allerdings einer höheren Bewertung mit Faktor 1,5) und einer zusätzlichen Wartezeit von 30 Sekunden an ausgewählten Innenstadtknoten.



a) Parksuchzeit 10/5 b) Parksuchzeit 20/10/5

Abbildung 5-1: Parksuchzeiten für Bezirke: a) 10/5 Minuten und b) 20/10/5 Minuten

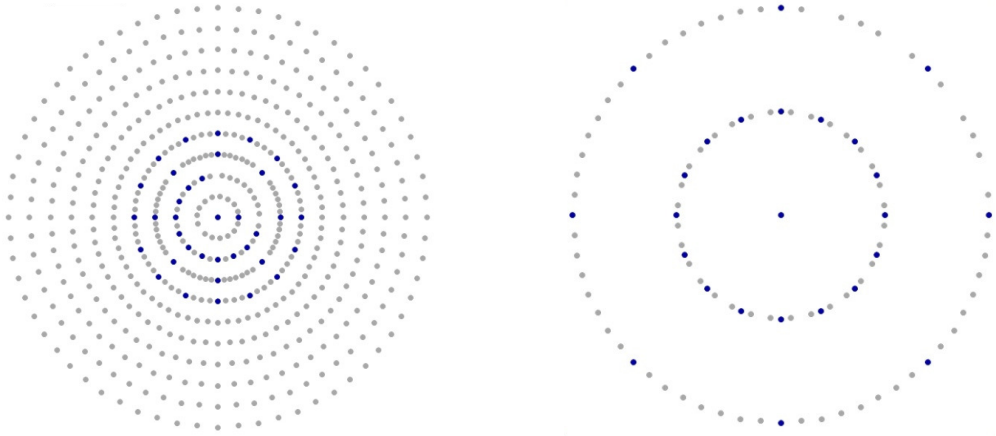


Abbildung 5-2: Wartezeiten an blau markierten Innenstadtknoten von 30 Sekunden für Netztyp T5, rechts in höherer Auflösung für die innersten zwei Ringe.

[8] Einzelne Rechnungen haben gezeigt, dass die Anzahl der Knoten mit 30 s Wartezeit keinen Einfluss auf das Umlegungsergebnis hat (Rechnungen für ET2 mit Netztyp T5). Dies wird jedoch nicht weiter vertieft.

Die folgenden Kapitel beschreiben die Ergebnisse bezüglich Modal Split und Betriebsergebnis entsprechend folgender Struktur:

- Kapitel 5.2 ÖV Netze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand;
- Kapitel 5.3 ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Einfluss des Haltestellenabstandes;
- Kapitel 5.4 Einfluss der Verteilung der Erwerbstätigen und Arbeitsplätze;
- Kapitel 5.5 Mittlere Reisegeschwindigkeiten und Reisezeiten
- Kapitel 5.6 Umsteigen und Fußgänger

5.2 ÖV Netze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand

5.2.1 Zwei Durchmesserlinien

Dieses sehr einfache ÖV Liniennetz wurde nur für Typ 1 mit 500 und 1000 m mittlerem Haltestellenabstand betrachtet. Für beide Verteilungen für die Erwerbstätigen und Arbeitsplätze ET1 und ET2 wurden stets positive absolute und relative Ergebnisse ermittelt. Dieses Ergebnis ist für diese Netzform auch nicht weiter überraschend. Aus diesem Grunde wird im Weiteren nicht weiter darauf eingegangen. Der Modal Split für Netztyp T1 und mit 500 m Haltestellenabstand ist beispielhaft in nachfolgender Abbildung dargestellt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse für ÖV Netze mit 4 oder 8 Durchmesserlinien mit oder ohne zusätzliche Tangentiallinien dargestellt. Die Darstellungen folgen jeweils demselben Vorgehen: Ausgehend von dem Referenz-Netztyp T1 werden anschließend vergleichende Darstellungen für alle untersuchten Netztypen vorgestellt und bewertet.

5.2.2 Modal Split

Alle Modal Split-Werte für den ÖV sind im Anhang tabellarisch aufgelistet (Tabelle A-2).

Abbildung 5-3 zeigt für den Netztyp T1 wenig überraschend, dass mit zunehmendem ÖV Angebot in Form von zusätzlichen Linien oder engeren Fahrzeugfolgezeiten der Modal Split für den ÖV zunimmt. Allerdings sind die Zunahmen bedingt durch mehr Linien nicht ausgeprägt: Die Zunahme beim Übergang eines 4DL Netzes zu einem 8DL-R4R7R9 Netz beträgt absolut nur 1,3%. Dagegen lässt ein 10 Minutentakt im Vergleich zu einem 30 Minutentakt im Mittel einen 4,6% höheren Modal Split erwarten, beim Übergang von 20 auf einen 10 Minutentakt immer noch eine Zunahme von 2,9%. Somit ist eine erheblich stärkere ÖV Benutzung durch engere Takte zu erwarten.

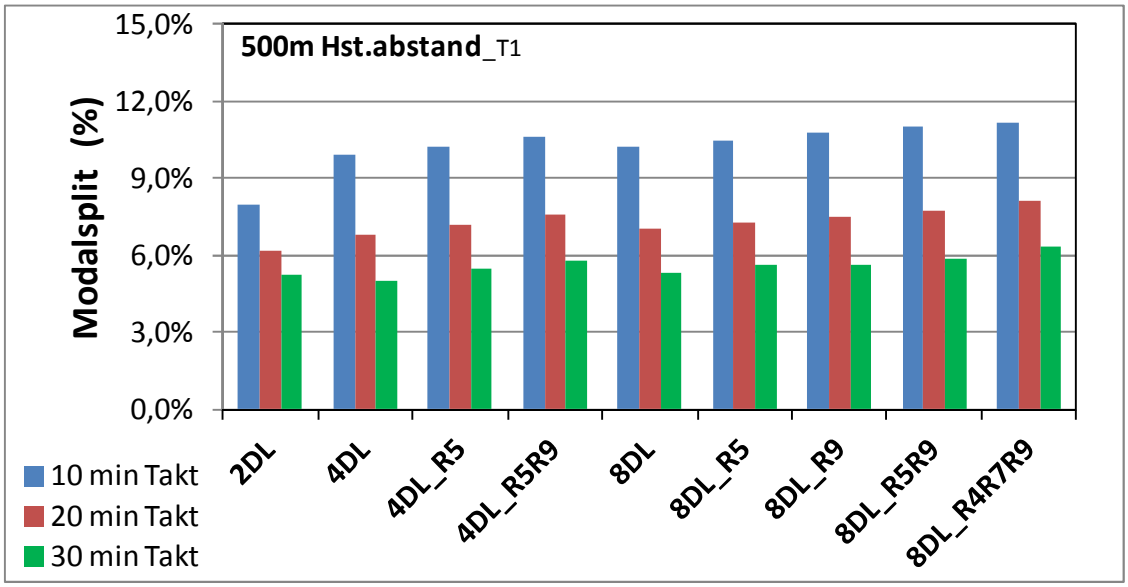


Abbildung 5-3: Modal Split von Netztyp T1 für alle untersuchte Liniennetze und Takte zwischen 10 bis 30 Minuten. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Bei Betrachtung aller Netztypen T1 bis T5 ergeben sich Modal Split-Werte für einen 10 Minutentakt wie in Abbildung 5-4 dargestellt.

- Längere Parksuchzeiten (Netztypen T2 und T4): Höhere Werte werden für längere Parksuchzeiten berechnet (Vergleich der Netztypen T2 und T4 mit Netztypen T1 und T3). Eine längere Parksuchzeit erhöht den Modal Split für den ÖV um (absolut) 1 bis 1,2 Prozent.
- Reduktion der maximalen MIV Geschwindigkeit um 25% (Netztyp T3): Diese Geschwindigkeitsverringerung hat nur einen sehr geringen Einfluss und erhöht den Modal Split für den ÖV um 0,5%.
- Zusätzliche Einführung von Wartezeiten an ausgewählten Innenstadtknoten und einheitliche Anbindungszeit von 4 Minuten: Auffällig ist die durchschnittliche Steigerung des Absolutwertes um 8,1% für den Netztyp T5 gegenüber T1, was einer relativen Zunahme von 70% entspricht.
- Ein Vergleich der Ergebnisse der Netztypen T4 und T5 zeigt, dass insbesondere die Einführung der im Mittel kürzeren Anbindungszeiten von einheitlich 4 Minuten den Modal Split für den ÖV deutlich steigert. Die durchschnittliche Zunahme beträgt 7,6%. Werden die Unterschiede in den MIV Geschwindigkeiten zwischen beiden Netztypen vernachlässigt, so ist eine schnellere Knotenanbindung entscheidend. Denn die MIV Geschwindigkeitsreduktion erklärt nur die sehr moderate Steigerung um 0,5% (siehe oben Kommentar für Netztyp T3).

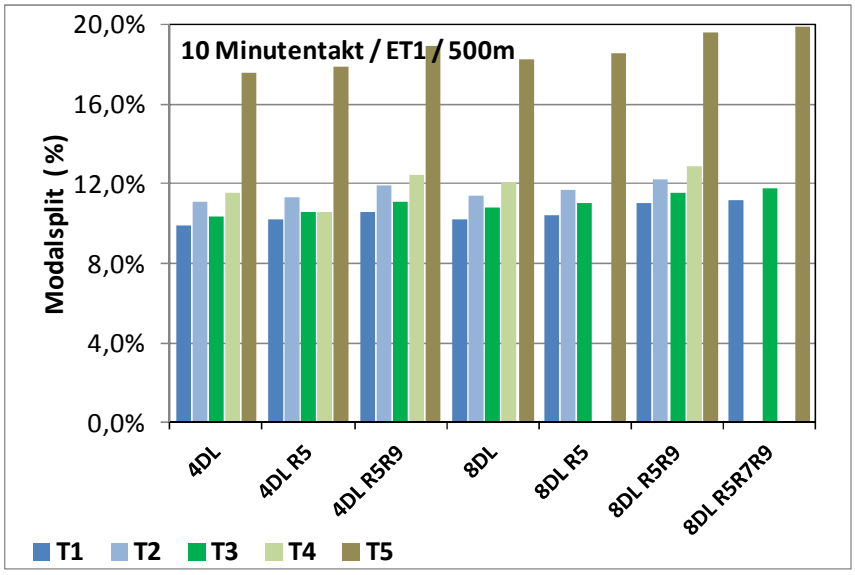


Abbildung 5-4: Modal Split des ÖV für untersuchte Liniennetze und 10 Minutentakt. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Dieselbe Darstellung für einen 20 Minutentakt zeigt Abbildung 5-5:

- Längere Parksuchzeiten (Netztypen T1 und T2): Diese steigert den Modal Split für den ÖV um (absolut) 1%, was einer relativen Erhöhung zu 13% (gegenüber Netztyp T1) entspricht.
- Reduktion der maximalen MIV Geschwindigkeit um 25% (Netztyp T3): nicht untersucht.
- Zusätzlich Einführung von Wartezeiten an ausgewählten Innenstadtknoten und einheitliche Anbindungszeit von 4 Minuten: Auffällig sind die um 7,4% durchschnittlich höheren Werte für diesen Netztyp T5, was bezogen auf den Referenz Netztyp T1 einer Verdoppelung entspricht.

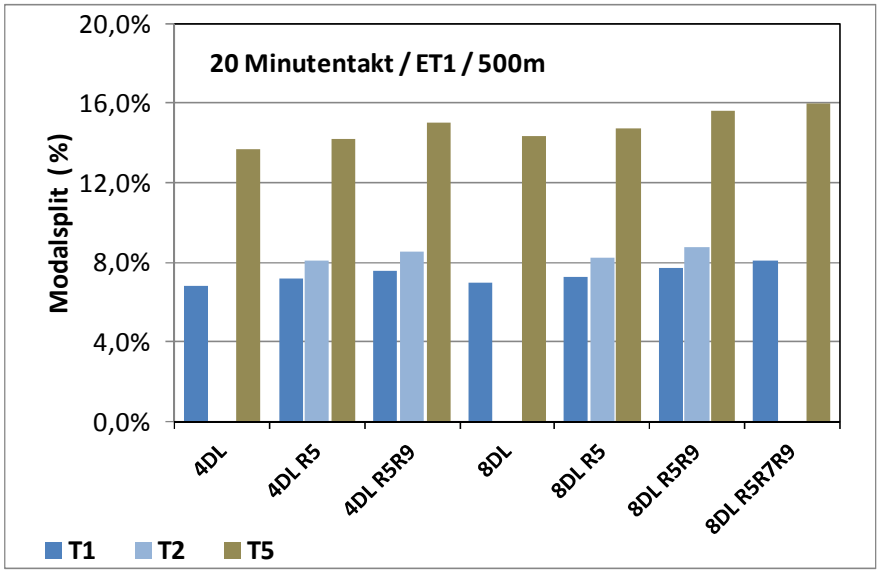


Abbildung 5-5: Modal Split des ÖV für untersuchte Liniennetze und 20 Minutentakt. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

5.2.3 Betriebliches Ergebnis

Für die Berechnung der betrieblichen Ergebnisse sind eventuelle Kapazitätsengpässe zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 4 erläutert, wurden zwei mögliche Beschränkungen berücksichtigt: Sitzplatzkapazität und Gesamtfahrgastkapazität des Fahrzeuges unter Berücksichtigung des Umlegungsergebnisses der einzelnen Linien. In den Tabellen des Anhangs sind alle Fälle farblich unterlegt, für die aus Kapazitätsgründen Gelenkbusse statt Stadtbusse eingesetzt werden. Die Leistungsfähigkeit aller Buslinie wurde mit den von Anderhub (2008) angegebenen maximalen Fahrgastzahlen pro Stunde für Standardbusse (1150 Fahrgäste/h) und Gelenkbusse (1560 Fahrgäste/h) überprüft. Es zeigt sich, dass in allen Fällen die mit Gelenkbussen ausreichend Kapazitäten angeboten werden können. Die größten Belastungsspitzen treten bei einer Taktverdichtung in der Hauptverkehrszeit auf (Kapitel 5.2.4). Selbst hier werden die Grenzwerte von oben nicht erreicht.

Das absolute betriebliche Ergebnis wurde in Kapitel 4 definiert und beschreibt die Differenz der Einnahmen und der hier betrachteten Kosten. Abbildung 5-6 verdeutlicht für einen 10 Minutentakt, dass erwartungsgemäß komplexere Liniennetze ein geringeres bzw. ein negatives Ergebnis aufweisen. Die oben beschriebenen höheren Werte für den ÖV Modal Split für längere Parksuchzeiten (T2 bzw. T4), geringere MIV Geschwindigkeiten (T3) und vor allem die Kombination der ÖV begünstigenden Parameter für Netztyp T5 haben entsprechend mehr Einnahmen und damit gegenüber dem Referenzfall T1 auch verbesserte Ergebnisse. Insgesamt weisen die Netztypen T1 bis T4 allerdings nur für ein Liniennetz mit 4 Durchmesserlinien und maximal einer Tangentiallinie ein positives Ergebnis aus. Nur Randbedingungen entsprechend Netztyp T5 erlauben kostenneutral auch den Betrieb von Netzen mit 8 Durchmesserlinien mit einer Tangentiallinie.

Die Verlängerung der Fahrzeugfolgezeit auf 20 Minuten verändert das absolute Ergebnis nicht grundlegend (Abbildung 5-7). Mit einer verlängerten Parksuchzeit lässt sich ein Netz mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien R5 und R9 noch mit ausgeglichenem Ergebnis betreiben. Dagegen sind für Netztyp T5 alle Netze betrieblich profitabel.

Trotz einer stark eingeschränkten Datenbasis ergeben sich auch für einen 30 Minutentakt vergleichbare Aussagen (Abbildung 5-8).

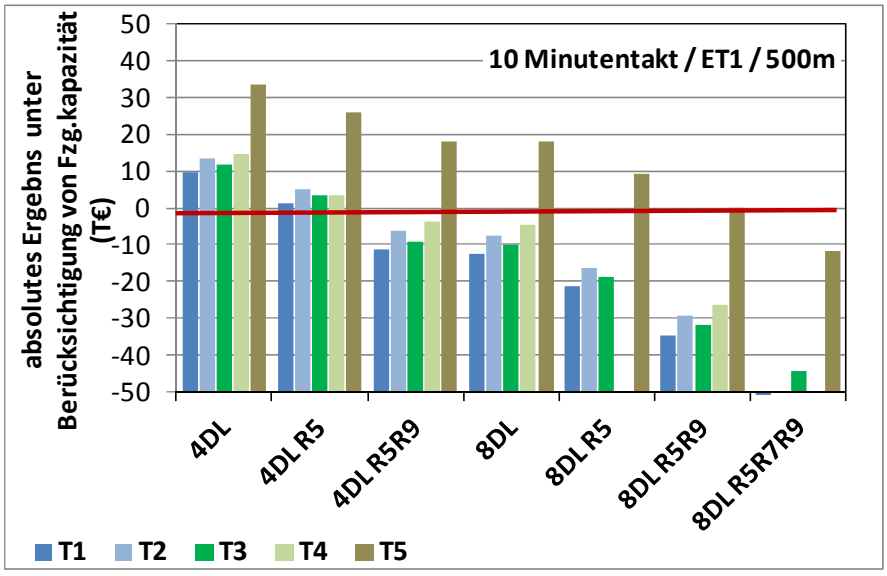


Abbildung 5-6: Betriebliches Ergebnis für untersuchte Liniennetze und 10 Minutentakt. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

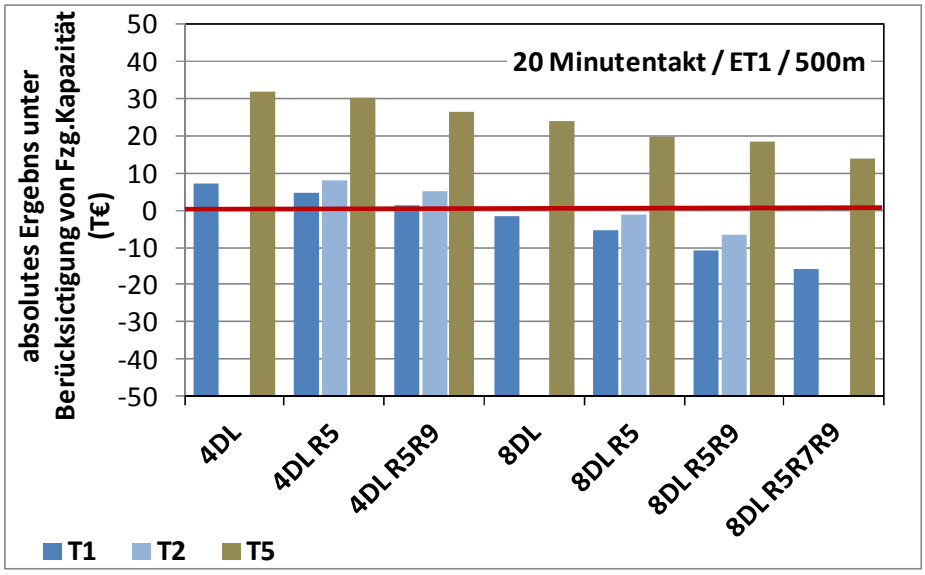


Abbildung 5-7: Betriebliches Ergebnis für untersuchte Liniennetze und 20 Minutentakt 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

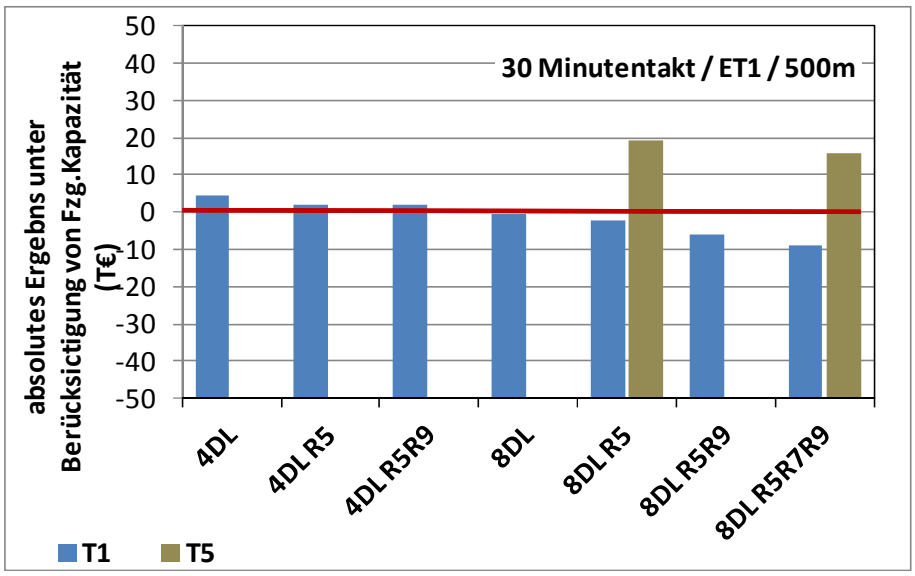
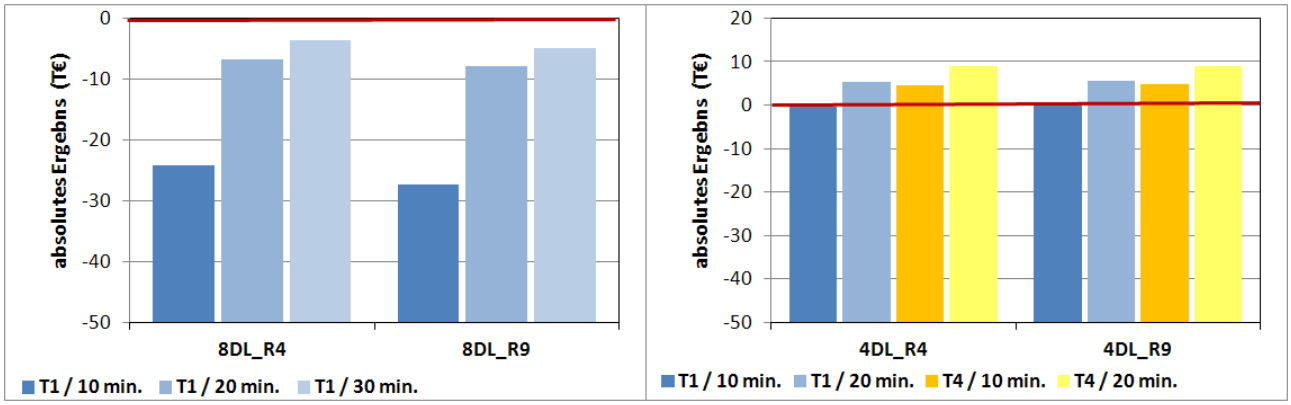


Abbildung 5-8: Betriebliches Ergebnis für untersuchte Liniennetze und 30 Minutentakt 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Für Liniennetze mit 4 oder 8 Durchmesserlinien wurde der Einfluss der Lage einer Tangentiallinie auf den ÖV Modal Split und das betriebliche Ergebnis untersucht. Hierfür wurden die Netztypen T1 und T4 jeweils mit einer Tangentiallinie R4 und einer Linie R9 verglichen. Fahrzeugfolgezeiten von 10, 20 oder 30 Minuten werden betrachtet. Abbildung 5-9 verdeutlicht, dass in allen betrachteten Fällen sehr gut vergleichbare Ergebnisse vorliegen. Somit sollte der Einfluss der Lage der Tangentiallinie auf das Ergebnis von untergeordneter Wichtigkeit sein.



a) Vergleich mit 8 Durchmesserlinien b) Vergleich mit 4 Durchmesserlinien

Abbildung 5-9: Vergleich der betrieblichen Ergebnisse für Netze mit 4 oder 8 DL und jeweils einer Tangentiallinie R4 oder R9 und verschiedene Takte. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Analog zum absoluten Ergebnis wurde ein relatives Betriebsergebnis für die untersuchten Netzformen berechnet (Definition siehe Kapitel 4). Für einen 10 Minutentakt zeigt Abbildung 5-10 die Rechenergebnisse.

Gleich zur Betrachtung des absoluten Ergebnisses können bei einem 10 Minutentakt nur Netze mit bis zu 4 Durchmesserlinien mit einem positiven Ergebnis betrieben werden. Zwischen Referenz-Netztyp T1 und den drei Netztypen mit längeren Parksuchzeiten (T2 bzw. T4) oder geringeren MIV Geschwindigkeiten (T3) sind die Unterschiede gering. Die deutlich höheren Einnahmen für Netztyp T5 erlauben einen kostendeckenden Betrieb von 8 Durchmesserlinien und einer Tangentiallinie R5. Für die Netztypen T1 bis T4 haben 12 m Standardbusse für alle Netzformen eine ausreichende Kapazität. Lediglich für Netztyp T5 werden für Netzformen mit 4 Durchmesserlinien und die die Liniennetz 8DL aus Kapazitätsgründen Gelenkbusse benötigt.

Wird die Fahrzeugfolgezeit auf 20 Minuten verlängert, so lässt sich mit verlängerten Parksuchzeiten auch ein Netz mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien R5 und R9 noch mit ausgeglichenem Ergebnis betreiben. Für Netztyp T5 sind dagegen jetzt alle untersuchten Netze betrieblich profitabel, auch wenn hier fast alle Linien mit Gelenkbussen, statt Standardbussen betrieben werden um ausreichend Kapazität bereit zu stellen (Abbildung 5-11). Für die anderen Netztypen ist ein Ersatz der 12 m Standardbusse durch 18 m Gelenkbusse lediglich für die Liniennetze 4DL und 4DL_R5 notwendig.

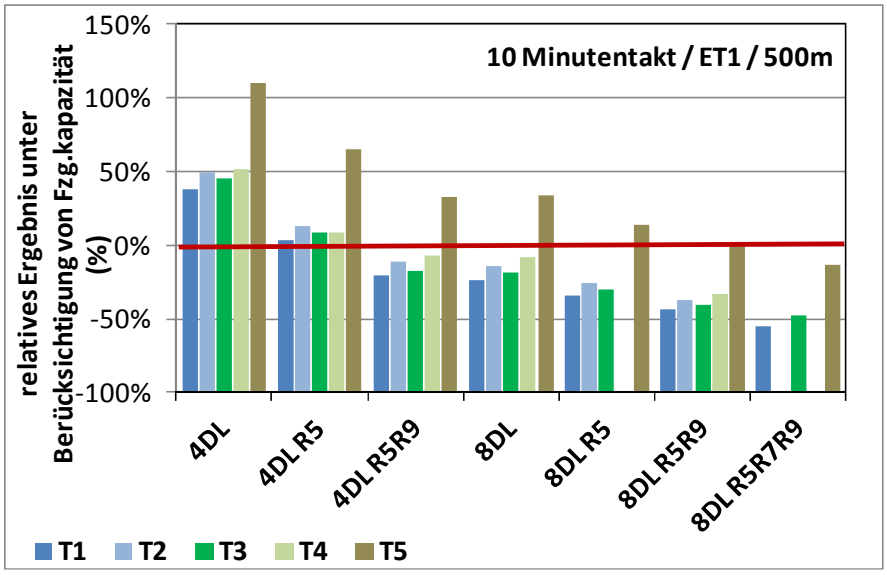


Abbildung 5-10: Betriebliches relatives Ergebnis für untersuchte Liniennetze und 10 Minutentakt. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

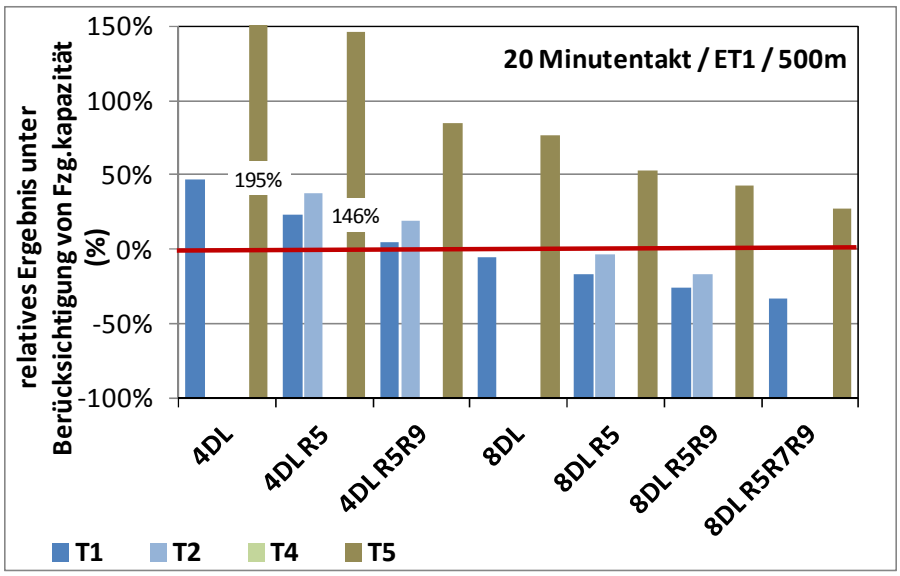


Abbildung 5-11: Betriebliches relatives Ergebnis für untersuchte Liniennetze und 20 Minutentakt. 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

5.2.4 Einfluss einer Taktverdichtung in der HVZ

Zur besseren Bedienung in der Hauptverkehrszeit (HVZ) wurden für die Durchmesserlinien die Takte von 10 auf 5 Minuten verringert. Die Taktverdichtungen erfolgen morgens und abends jeweils für 3 Stunden. Die Bedienung der Tangentiallinien wurde unverändert bei 10 Minuten gelassen, da diese geringere mittlere Auslastungen erreichen. Die von Anderhub (2008) definierte vom Fahrzeug abhängige maximale Belastung für eine Buslinie wurde in keinem Fall nicht erreicht.

Abbildung 5-12 zeigt den Vergleich der relativen Betriebsergebnisse für die 3 betrachteten Netztypen T1, T3 und T5 für eine Taktverdichtung während der HVZ und einem 10 Minutentakt. Wie aus dieser Abbildung ersichtlich, verringert sich für diese Netztypen das relative Betriebsergebnis aufgrund einer Taktverdichtung in der HVZ deutlich. Ein positives Ergebnis wird nur noch für ein Liniennetz mit 4 Durchmesserlinien erreicht. Besonders drastisch negativ ist der Einfluss für Netztyp T5. Tabelle A-3 des Anhangs verdeutlicht, dass die höheren Ausgaben aufgrund der Taktverdichtung für die meisten Netzformen nur zu etwa 50 bis maximal 70% durch zusätzliche Einnahmen gedeckt werden können. Am günstigsten schneiden die Varianten mit zwei Tangentiallinien ab, da hier die Mehrkosten für die Durchmesserlinien auf relativ mehr Linien verteilt werden können.

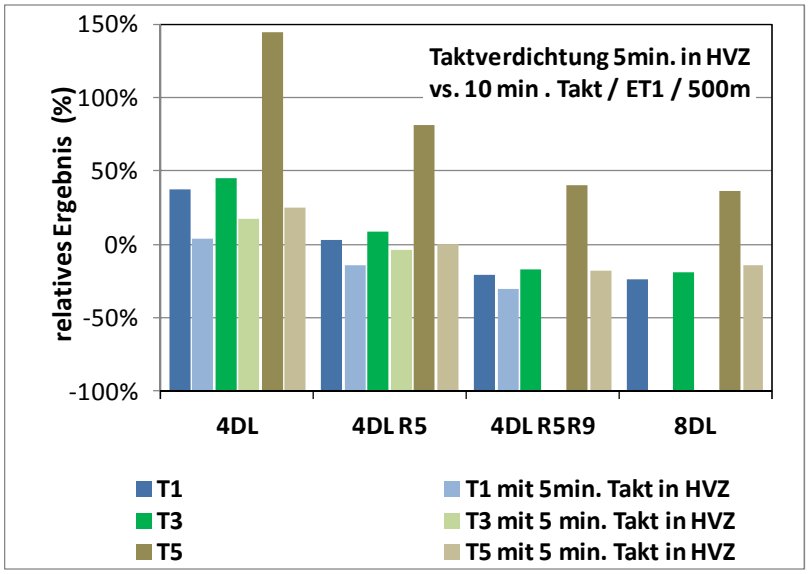


Abbildung 5-12: Relatives betriebliches Ergebnis für Taktverdichtungen in der HVZ 500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

5.2.5 Verlängerung der Parksuchzeit

Für die Netztypen T2 und T4 wurde gegenüber T1 bzw. T3 wie zu Beginn des Kapitels beschrieben die Parksuchzeiten für den Zentrumsbezirk und die zentrumsnahe Bezirke verlängert bzw. eingeführt. Die Gegenüberstellung der relativen Betriebsergebnisse verdeutlicht die für den ÖV erwartete Verbesserung (Abbildung 5-13). Die Betriebsergebnisse sind, bis auf eine Ausnahme, für beide Netzvarianten durchweg um 7 bis 10% gegenüber T1 und T3 erhöht. Für Variante T2 ist somit auch der Betrieb mit einem 10 Minutentakt für die Netzform mit 4 Durchmesserlinien und einer Tangentiallinie (4DL_R5) noch rentabel.

Vergleichbare Ergebnisse werden für einen 20 Minutentakt erzielt. Die entsprechende Abbildung ist im Anhang dargestellt.

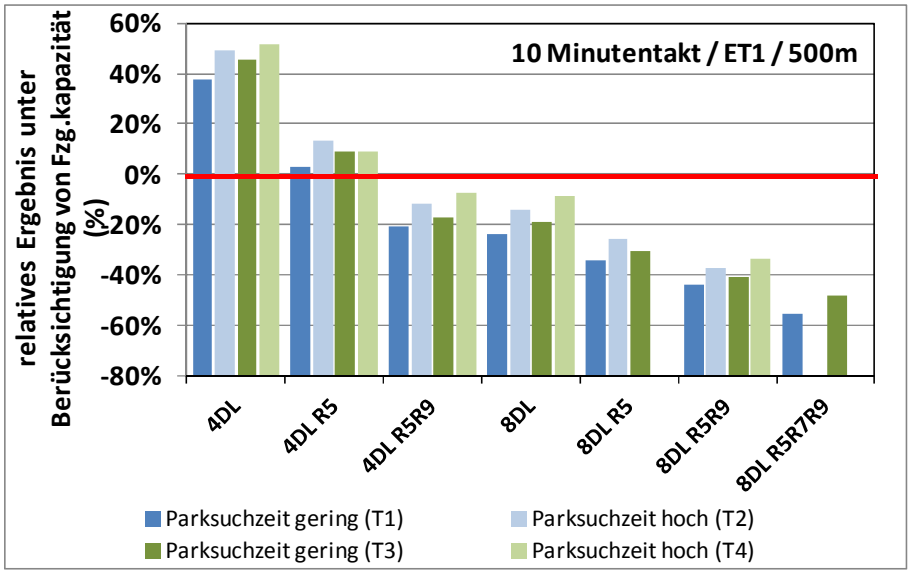


Abbildung 5-13: Einfluss verlängerter Parksuchzeiten auf das relative Betriebsergebnis für 10 Minutentakt (500 m mittlerer Haltestellenabstand, Verteilung ET1).

5.3 ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Einfluss des Haltestellenabstandes

Im Rahmen der Untersuchungen wurden ÖV Netze mit 500 m, 1000 m und ausgewählt für Netztyp T2 auch mit größeren mittleren Haltestellenabständen betrachtet („1000m plus“). Zunächst werden die betrieblichen Ergebnisse für ÖV Netze mit einem mittleren Haltestellenabstand von ca. 1000 m vorgestellt, anschließend diese Ergebnisse mit unterschiedlichen Haltestellenabständen verglichen.

5.3.1 ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand

Für diesen Zustand wurden lediglich die Netztypen T1 bis T4 betrachtet. Die berechneten Werte für den ÖV Modal Split sind nachfolgend in Abbildung 5-14 für einen 10 Minutentakt ersichtlich. Ergebnisse für einen 20 Minutentakt befinden sich im Anhang (Abbildung A-2).

Der größere Haltestellenabstand erhöht den ÖV Verkehrsanteil (Details siehe nachfolgend unten). Analog zu den ÖV Netzen mit 500 m Haltestellenabstand verringert sich der Modal Split für längere Fahrzeugabstandszeiten: Für Netztyp T1 und 10, 20 und 30 Minutentakte von durchschnittlich 11% auf 7,9% und 6,1%. Alle berechneten Werte sind im Anhang aufgelistet. Auch für die anderen Netztypen verringert sich der Modal Split um 3 bis knapp 4% bei einer von 10 auf 20 Minuten verlängerten Fahrzeugfolgezeit.

Die Einführung längerer Parksuchzeiten erhöht ebenfalls den Wert des Modal Splits für den ÖV. Wie ein Vergleich der Werte für T1 mit T2 und von T3 mit T4 in nachfolgender Abbildung 5-14 zeigt beträgt die Differenz ca. 1,2%.

Tabelle A-4 im Anhang listet alle berechneten Werte des ÖV Modal Splits auf.

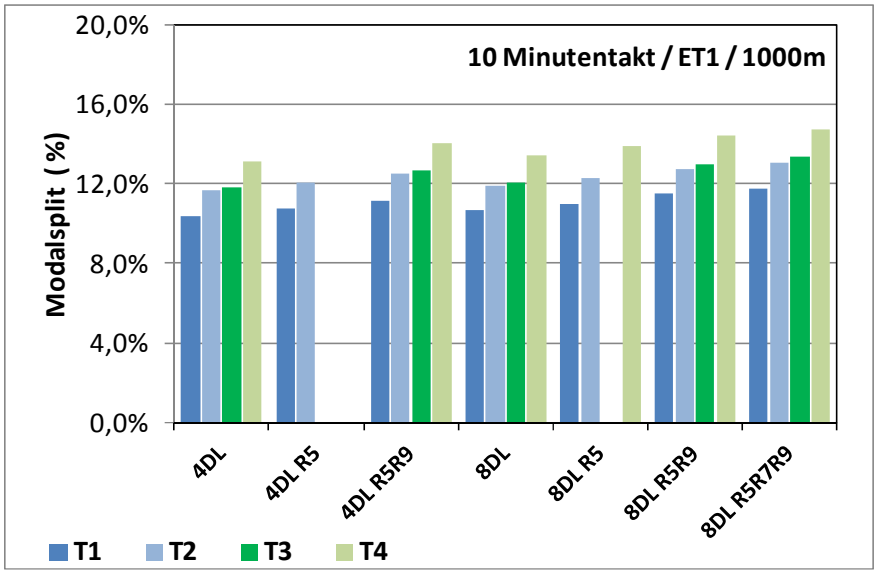


Abbildung 5-14: Werte für den ÖV Modal Split für 10 Minutentakt.
1000 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Die berechneten relativen Betriebsergebnisse verdeutlichen, dass aufgrund des höheren ÖV Verkehrsanteils bei größeren Haltestellenabständen sich für beiden Netztypen T1 und T2 auch Liniennetze mit mehr als 4 Durchmesserlinien mit einem positiven Ergebnis betreiben lassen. Erhöhte Kapazitäten sind erneut berücksichtigt, indem größere Gelenkbusse eingesetzt werden[9]. Die Ergebnisse für alle Netztypen und Fahrzeugfolgezeiten sind in einer Tabelle des Anhang A-5 aufgeführt. In dieser Tabelle sind Werte für Liniennetze bei denen Gelenkbusse zum Einsatz kommen, farblich unterlegt.

Abbildung 5-15 zeigt die berechneten Betriebsergebnisse für einen 10 Minutentakt. Erkennbar ist für den Referenztyp T1 eine Netzform mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien gerade noch kostendeckend. Für Netztyp T4 (reduzierte MIV Geschwindigkeit und verlängerte Parksuchzeit) ist dagegen ein Netz mit 8 Durchmesserlinien und einer Tangentiallinie noch annähernd kostendeckend zu betreiben (Ergebnis -3%). Bei 500 m mittleren Haltestellenabständen war für alle Netztypen T1 bis T4 eine Kostendeckung im besten Fall für ein Netz mit 4 Durchmesserlinien erreichbar (Netzformen 4DL oder 4DL_R5).

[9] Für einen 10 Minutentakt sind Gelenkbusse für Netze mit 4 Durchmesserlinien und für einen 20 Minutentakt für Netze mit 4 oder 8 Durchmesserlinien und Tangentiallinien notwendig Siehe farbliche Markierung in Tabelle A-6 des Anhangs.

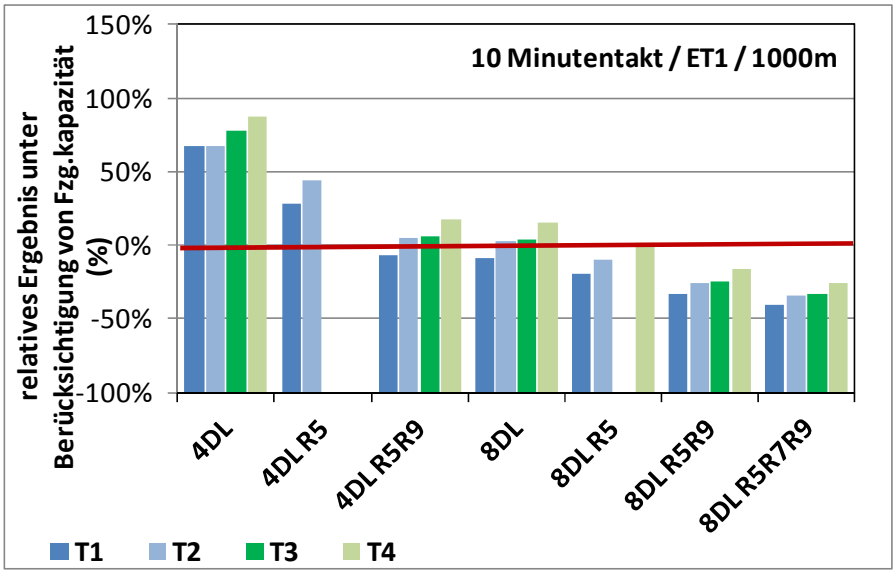


Abbildung 5-15: Relatives Betriebsergebnis für ÖV Netze mit Bedienung im10 Minutentakt. 1000 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Die entsprechende Ergebnisübersicht für eine Bedienung im 20 Minutentakt zeigt Abbildung 5-16. In diesem Fall weisen bis auf zwei Ausnahmen alle gerechneten Varianten ein positives Betriebsergebnis auf. Lediglich für Referenztyp T1 mit 8 Durchmesserlinien und 2 bzw. 3 Tangentiallinien ergeben sich zwei nicht ausgeglichene Ergebnisse von -12% und -21%. Damit ist auch hier eine deutliche Ergebnisverbesserung gegenüber Netzen mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand festzuhalten. Der Vollständigkeit sei erwähnt, dass auch für einen 30 Minutentakt für Netztyp T1 außer für die zwei komplexesten Netze positive Ergebnisse berechnet wurden (alle Werte siehe Tabelle A-5 im Anhang).

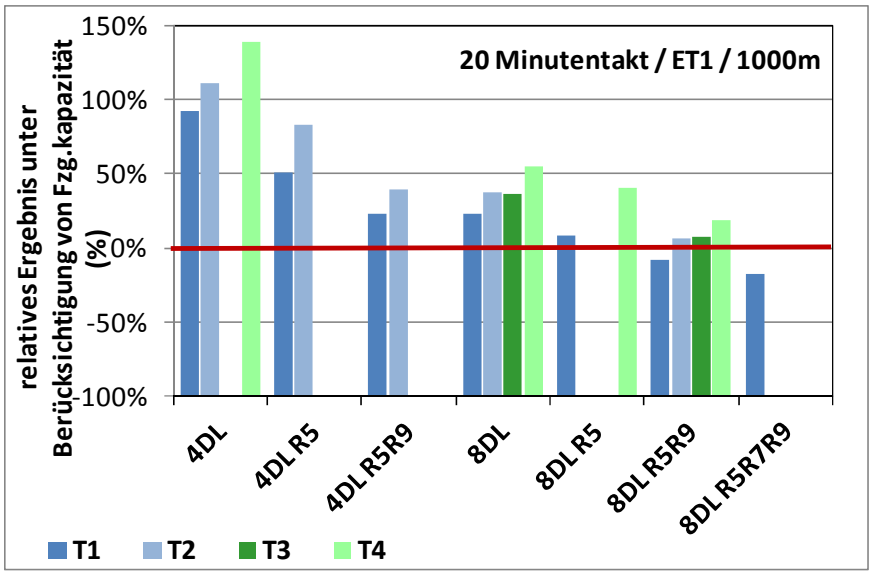


Abbildung 5-16: Relatives Betriebsergebnis für ÖV Netze mit Bedienung im 20 Minutentakt. 1000 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

5.3.2 Einfluss des Haltestellenabstandes

Einfluss auf Modal Split und Betriebsergebnis

Dieser wird für Netztyp T2 (Referenz mit verlängerter Parksuchzeit) für 3 mittlere Abstände bewertet. Die mittleren Abstände wurden in Kapitel 4 definiert. Drei verschiedene Liniennetze wurden untersucht: 4DL_R5R9, 8DL und 8DL_R5R9. Die Bewertung hinsichtlich berechneten Werten für den ÖV Modal Split (Abbildung 5-17), absolutem und relativem Ergebnis (Abbildung 5-18) ist eindeutig. Die günstigsten Werte wurden in allen Fällen für einen mittleren Haltestellenabstand von 1000 m berechnet. Auffallend ist für den Haltestellenabstand 1000m-plus der sehr hohe Anteil von Fußgängern im Verhältnis zu der Anzahl der ÖV Benutzer (Tabelle 5-2).

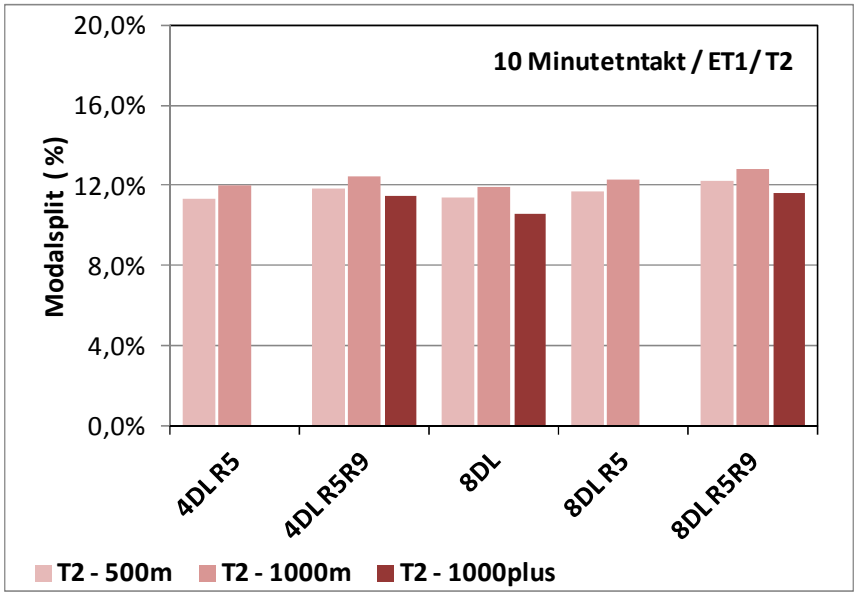


Abbildung 5-17: Werte für den ÖV Modal Split für verschiedene mittlere Haltestellenabstände. Netztyp T2, 10 Minutentakt und Verteilung ET1.

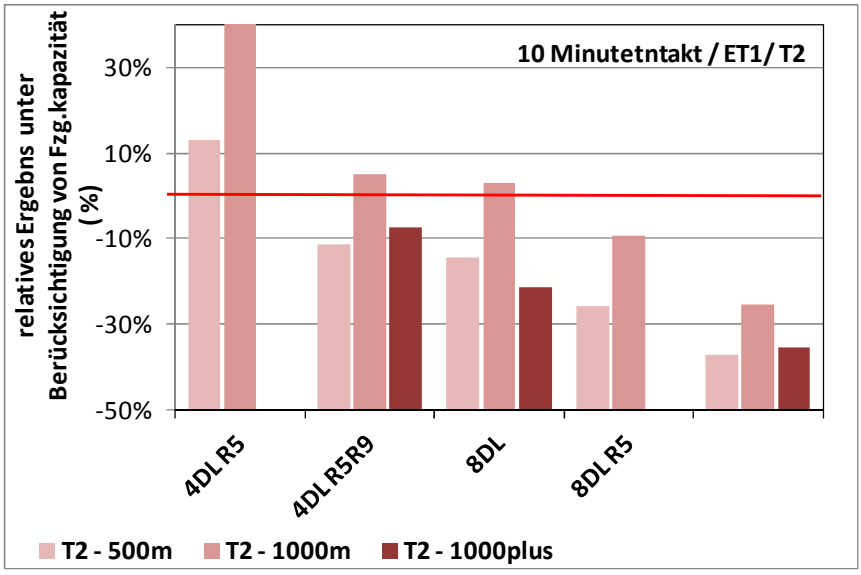


Abbildung 5-18: Relatives Betriebsergebnis für verschiedene mittlere Haltestellenabstände. Netztyp T2, 10 Minutentakt und Verteilung ET1.

Netztyp →	T2 (500m)	T2 (1000m)		T2 - 1000plus	
Takt →	10	10	20	10	20
4DL R5	13%	16%			
4DL R5R9	8%	10%		14%	
8DL	7%	13%	19%	32%	48%
8DL R5	7%	11%			
8DL R5R9	5%	7%		13%	

Tabelle 5-2: Verhältnis von Fußgänger zu ÖV Benutzer für verschiedene mittlere Haltestellenabstände. Netztyp T2, 10 bzw. 20 Minutentakt und Verteilung ET1.

Einfluss der Taktverdichtung

Der Fall eines 5 Minutentaktes während der Hauptverkehrszeit wurde nur für das Referenznetz T1 untersucht. Für alle drei betrachteten Liniennetze mit 4 Durchmesserlinien haben die zusätzlichen Servicefahrten eine Verringerung des relativen Ergebnisses zur Folge, siehe Abbildung 5-19. Ein solcher Betrieb rechnet sich nur noch ohne Tangentiallinie, während er mit einer solchen Linien mit einem Ergebnis von -4% gerade nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben ist. Die Verhältnisse der zusätzlichen Einnahmen zu zusätzlichen Kosten betragen zwischen 41% (4DL_R5R9) und 52% (4 DL) und sind damit nahezu identisch zu den Werten für die entsprechenden Netze mit 500 m Haltestellenabstand. Die Werte der zusätzlichen Einnahmen bzw. Kosten sind in Tabelle A-3 des Anhangs für beide mittleren Haltestellenabstände zusammengestellt.

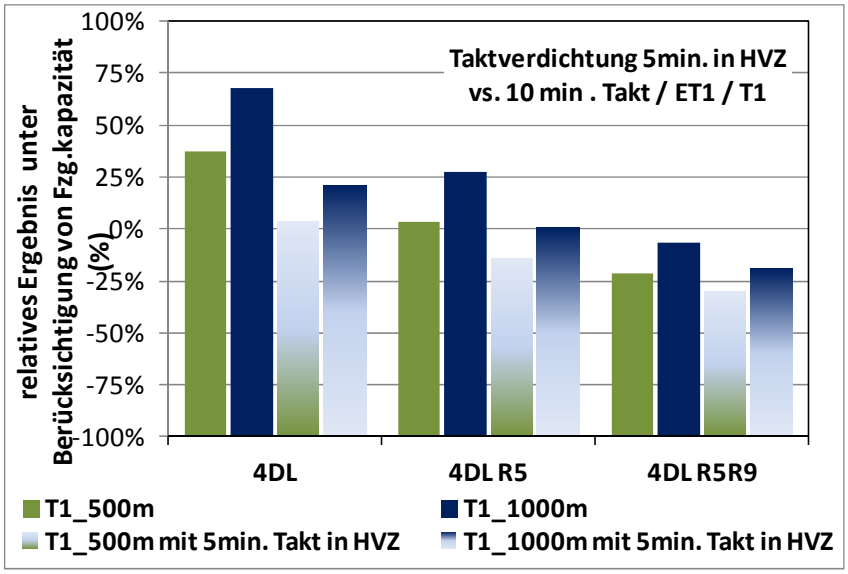


Abbildung 5-19: Relatives Betriebsergebnis – Vergleich von 10 Minutentakt und Taktverdichtung auf 5 Minuten in der HVZ für Durchmesserlinien. ÖV Netze mit 500 m und 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Absolutes Betriebsergebnis

Nachfolgende Tabelle 5-3 zeigt die Differenzwerte der absoluten Betriebsergebnisse für Liniennetze mit 500 und 1000 m Haltestellenabstand. Grau unterlegt sind die Zellen für einen 10 Minutentakt: Die Werte für Netztypen T1 und T2, sowie T3 und T4 sind bis auf eine Ausnahme nahezu identisch. Der Haltestellenabstand wirkt sich hinsichtlich einer verlängerten Parksuchzeit damit auf die Einnahmen und Ausgaben gleich aus.

Netztyp →	**T1**			**T2**		**T3**	**T4**
Takt →	10	20	30	10	20	10	10
4DL	4.916	3.946	3.494	3.046			6.978
4DL R5	**7.316**	3.434	3.519	**8.655**	6.140		
4DL R5R9	**8.013**	4.080	3.475	**8.288**	4.582		12.033
8DL	**8.808**	6.336	5.164	**8.755**		**11.287**	**11.376**
8DL R5	**11.078**	7.426	5.845	**11.148**			
8DL R5R9	**12.240**	7.858	6.798	**12.213**	8.957	**15.438**	**15.687**
8DL R5R7R9	18.439	9.023	7.760		-		

Tabelle 5-3: Differenzen des absolutes Betriebsergebnisse für ÖV Liniennetze mit 500 m und 1000 m. Fett gedruckte Zahlen verdeutlichen die Vergleichbarkeit für T1 mit T2 bzw. T3 mit T4. Berechnung = abs. Ergebnis (1000 m) - abs. Ergebnis (500 m).

Relatives Betriebsergebnis

Der Haltestellenabstand hat für die Netztypen T1 bis T4 einen Einfluss auf das relative Ergebnis. Für einen 10 Minutentakt zeigt Abbildung 5-20 zunächst für die Netztypen T1 und T3 deutlich verbesserte Ergebnisse für Netze mit 1000 m Abstand gegenüber 500 m Haltestellenabstand. Gleiches zeigt sich, wenn auch mit geringerer Datenbasis, auch für einen 20 Minutentakt (siehe Anhang Abbildung A-3 bzw. alle Werte in Tabelle A-6).

Anhand der Ergebnisse für T1 und T2 zeigt sich mit zunehmender Fahrzeugfolgezeit ein steigender Einfluss des Haltestellenabstandes. In Tabelle 5-4 sind analog zur vorhergehenden Tabelle die Differenzen der (jetzt) relativen Ergebnisse für 500 m und 1000 m Haltestellenabstand in Prozent aufgelistet (grau unterlegt wiederum die Werte für einen 10 Minutentakt): Die angegebenen Mittelwerte zeigen für Netztyp T1 nahezu eine Verdopplung beim Übergang von einem 10 auf einen 30 Minutentakt. Für T1 und T2 sind erhöhen sich diese Werte von 10 auf 20 Minutentakt deutlich und annähernd gleich.

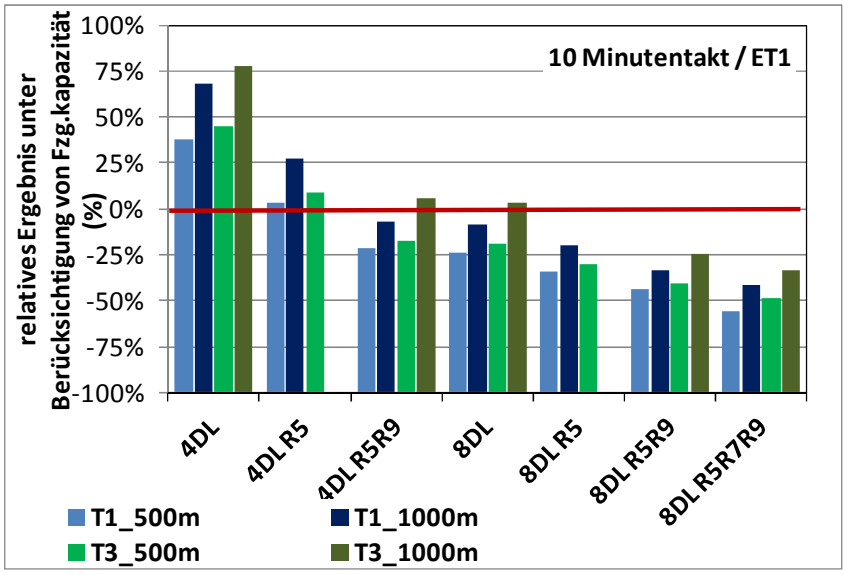


Abbildung 5-20: Relatives Betriebsergebnis – Netztypenvergleich T1 und T3, jeweils mit 500 und 1000 m mittlerem Haltestellenabstand, 10 Minutentakt und Verteilung ET1.

Netztyp →	**T1**			**T2**		**T3**	**T4**
Takt →	10	20	30	10	20	10	10
4DL	30%	45%	57%	18%			36%
4DL R5	25%	27%	35%	32%	46%		
4DL R5R9	14%	19%	24%	16%	21%		25%
8DL	15%	28%	34%	17%		22%	25%
8DL R5	14%	24%	30%	16%			
8DL R5R9	11%	18%	24%	12%	23%	16%	18%
8DL R5R7R9	14%	16%	22%				

Tabelle 5-4: Differenzen der relativen Betriebsergebnisse für Netze mit 500 m und 1000 m mittleren Haltestellenabstand. Berechnung = rel. Ergebnis (1000 m) - rel. Ergebnis (500 m). Grau unterlegt Werte für 10 Minutentakt. Verteilung ET1.

5.4 Einfluss der Verteilung der Erwerbstätigen und Arbeitsplätze

Wie im Kapitel 4 dargestellt, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei unterschiedliche Verteilungen für die Erwerbstätigen und Arbeitsplätze betrachtet. Alle bisherigen Ergebnisse basieren auf der Verteilung mit der Bezeichnung ET1. Die Arbeitsplätze konzentrieren sich auf das Zentrum, auf alle Bezirke des vierten Rings und auf drei Bezirke, die auf dem äußersten Ring lokalisiert sind. Die Erwerbstätigen sind überwiegend auf die anderen Bezirke verteilt. Die zweite Verteilung mit der Bezeichnung ET2 zeichnet sich dadurch aus, dass Arbeitslätze sich auf das Zentrum, auf Bezirke des ersten Quadranten (0 bis 3 Uhr, alle Bezirke auf dem vierten Ring und einzelne Bezirke auf dem zehnten Ring), sowie auf die beiden äußersten Ringe im dritten Quadranten konzentrieren (siehe Abbildung 4-2). Die Konsequenzen auf die Verkehrsströme werden nachfolgend vorgestellt. Der Haltestellenabstand wird nicht variiert und beträgt stets 500 m.

5.4.1 Ergebnisse mit Verteilung ET2

Abbildung 5-21 zeigt zunächst die berechneten Werte des ÖV Modal Split der Netztypen T1, T2, T3 und T5 für einen 10 Minutentakt. Erneut zeichnet sich Netztyp T5 durch die höchsten Werte aus, wenn auch die Differenzen zu den anderen Netztypen im Vergleich zu den ET1 Ergebnissen kleiner sind. Die entsprechenden Ergebnisse für einen 20 Minutentakt lassen dieselben Aussagen zu und befinden sich im Anhang.

Die relativen Ergebnisse für eine Fahrzeugfolgezeit von 10 Minuten sind in Abbildung 5-22 dargestellt. Da die Werte der absoluten Ergebnisse keine anderen Aussagen zulassen, sind sie für 10 und 20 Minutentakt zusammen mit den relativen Ergebnissen eines 20 Minutentaktes im Anhang dargestellt. Eine Bewertung folgt im nächsten Abschnitt.

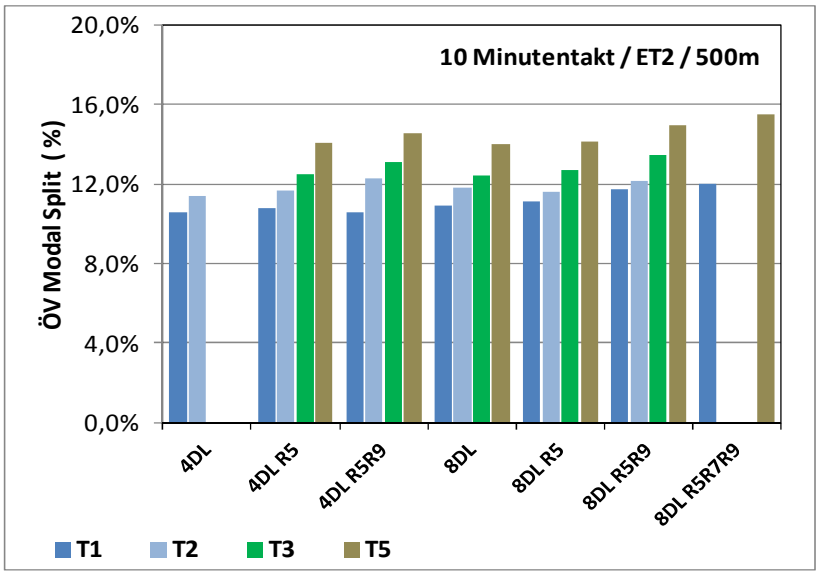


Abbildung 5-21: ÖV Modal Split für verschiedene Netztypen T1, T2, T3 und T5. 500 m mittlerem Haltestellenabstand, 10 Minutentakt und Verteilung ET2.

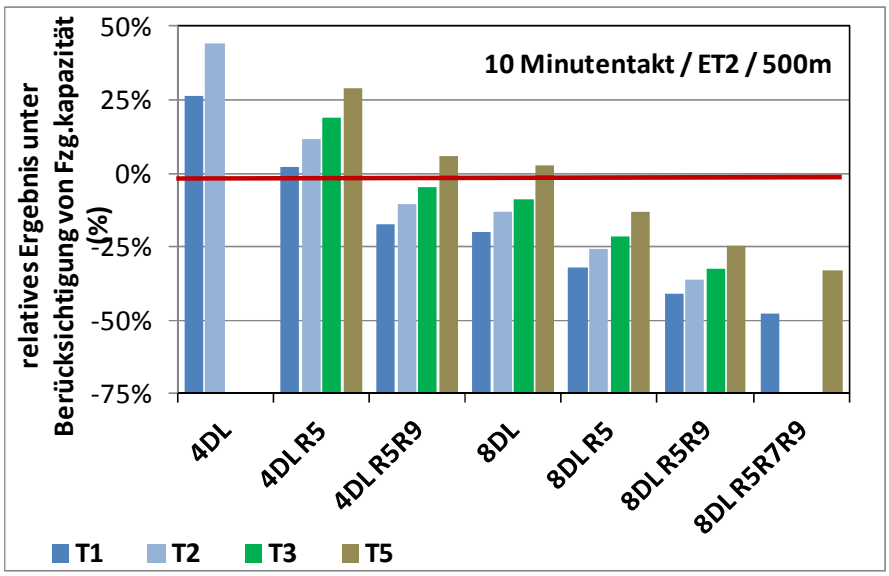


Abbildung 5-22: Relatives Betriebsergebnis für Liniennetze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand, 10 Minutentakt und Verteilung der Erwerbstätigen ET2.

5.4.2 Vergleich Verteilungen ET1 und ET2 - Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung

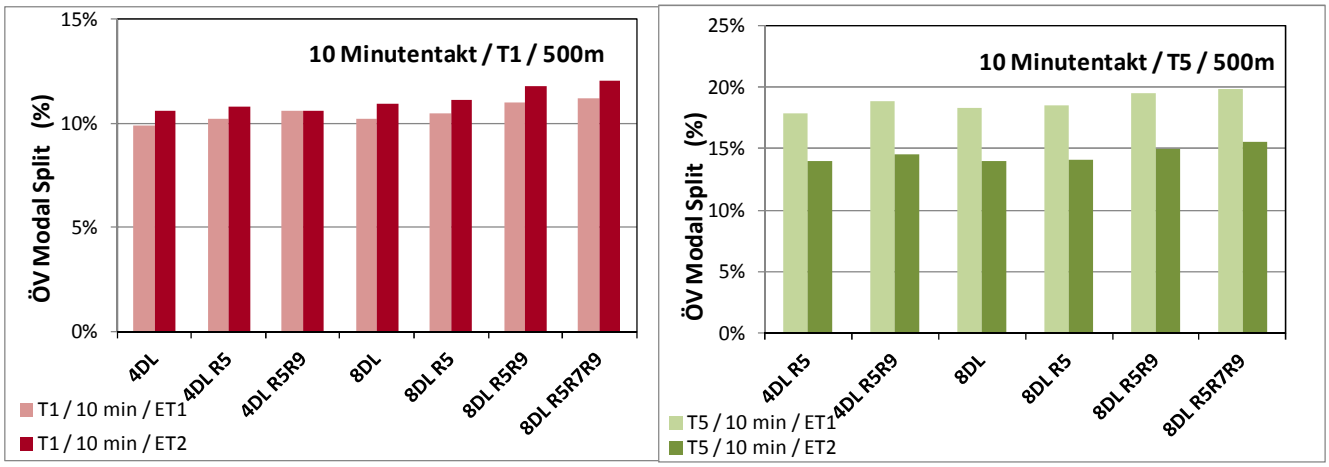
Wie sich die beiden Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung auf verlängerte Parksuchzeiten, auf den ÖV Modal Split und das Betriebsergebnis auswirken, wird hier verglichen.

Einfluss auf Parksuchzeit

Der Einfluss der verlängerten Parksuchzeit wird nur für den Referenznetztyp T1 betrachtet. Es zeigt sich gleich zur Verteilung ET1, dass Parksuchzeiten erwartungsgemäß positiv für die ÖV Benutzung auswirken. Allerdings sind die Unterschiede zwischen ET1 und ET2 sind allerdings nicht signifikant: Mit Verteilung ET1 ist das absolute Ergebnis für eine Fahrzeugfolgezeit von 10 bzw. 20 Minuten gegenüber ET2 um 800 € bzw. 1400 € höher.

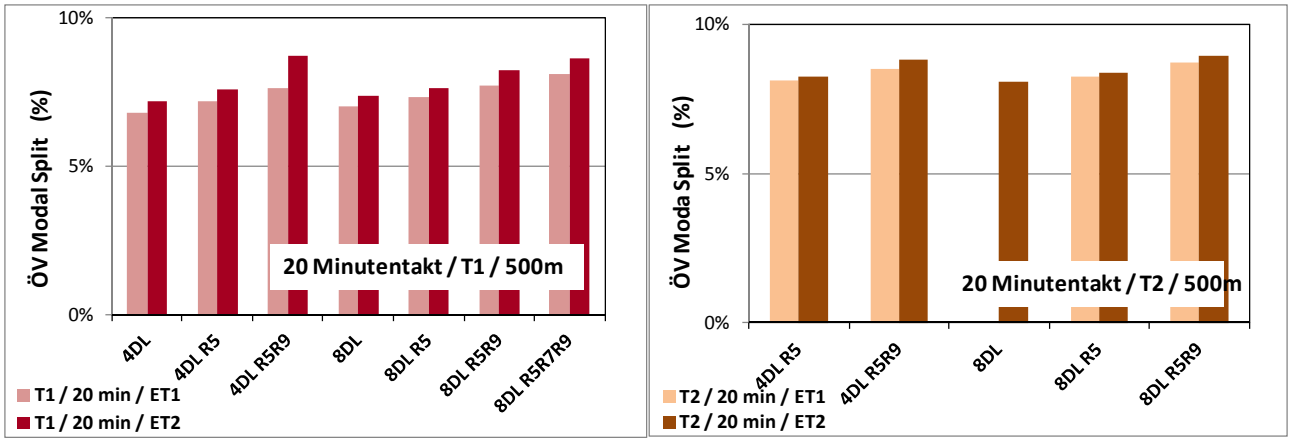
Einfluss auf ÖV Modal Split

Ein Vergleich ist für die Netztypen T1, T2, T3 und T5 möglich. Für den Referenz-Netztyp T1, die Variante mit verlängerter Parksuchzeit T2 und die Variante mit 25% reduzierter MIV Geschwindigkeit T3 führt die Verteilung ET2 zu höheren Werten für den ÖV Modal Split. Jedoch sind die Unterschiede für T1 und T2 moderat: Bezogen auf ET1 differieren die relativen Mittelwerte zwischen 2% und 8%, die größte Differenz bezogen auf einen Einzelwert ist 14%. Für Netztyp T3 (10 Minutentakt) ist der ÖV Modal Split für ET2 um durchschnittlich um 17% höher. Ganz anders jedoch Netztyp T5. Hierfür sind die ET1-Werte für den ÖV Modal Split im Mittel um 23% (10 Minutentakt) bzw. 32% (20 Minutentakt) gegenüber Verteilung ET2 erhöht. Abbildungen 5-23 und 5-24 vergleichen die Ergebnisse für ausgewählte Netztypen und für 10 bzw. 20 Minutentakte.



Netzyp T1 Netztyp T5

Abbildung 5-23: Einfluss der Erwerbstätigenverteilung auf den ÖV Modal Split für Netztypen T1 und T5. Jeweils 10 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.



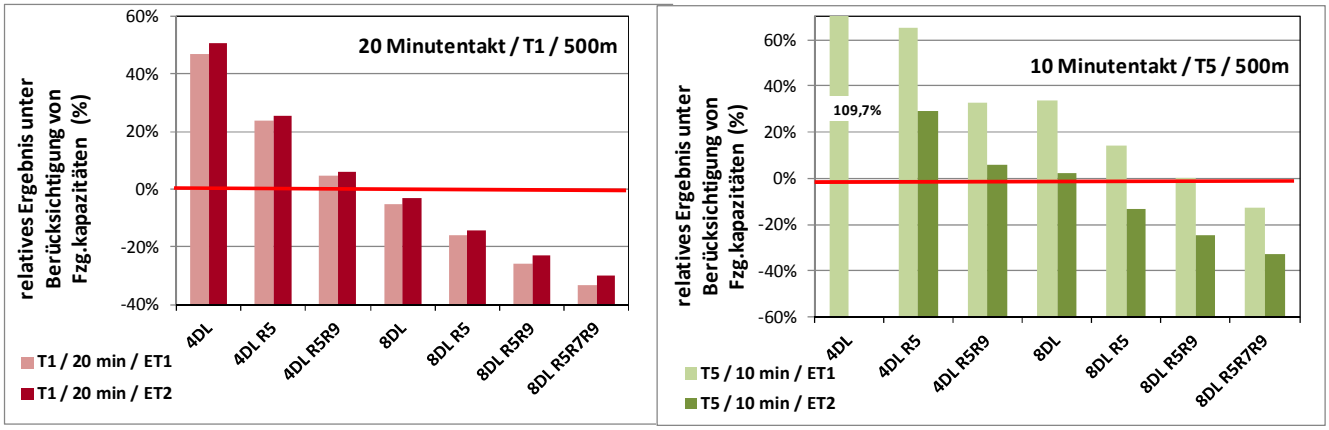
Netzyp T1 Netztyp T2

Abbildung 5-24: Einfluss der Erwerbstätigenverteilung auf den ÖV Modal Split für Netztypen T1 und T2. Jeweils 20 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

Einfluss auf relatives Ergebnis

Die Ergebnisse für den ÖV Modal Split lassen sich auf die relativen Betriebsergebnisse übertragen. Auffallend ist für Netztyp T5 und Verteilung ET1, dass für einen 10 Minutentakt bis auf zwei Netzformen mit positivem Ergebnis gerechnet werden kann. Dagegen haben mit Verteilung ET2 nur Netze mit maximal 4 Durchmesserlinien ein Ergebnis größer Null.

Abbildung 5-25 zeigt die relativen Ergebnisse für Netztyp T1 mit 20 Minutentakt (a) und für Netztyp T5 für einen 10 Minutentakt (b).



a) Netzyp T1, 20 Minutentakt b) Netztyp T5, 10 Minutentakt

Abbildung 5-25: Einfluss der Erwerbstätigenverteilung auf das relative Betriebsergebnis für verschiedene Netztypen a) Netztyp T1 und 20 Minutentakt und b) Netztyp T5 und 10 Minutentakt. Jeweils 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

5.5 Mittlere Reisegeschwindigkeiten und Reisezeiten

MIV

Die mittlere Reiseweite beträgt 6,4 km. Die Art des ÖV Liniennetzes hat praktisch keinen Einfluss auf die mittlere MIV Reisegeschwindigkeiten. Der Netztyp dagegen schon: Die mittlere MIV Reisegeschwindigkeit beträgt für die Netztypen T1 und T2 etwa 37 km/h, für Netztypen T3 und T4 etwa 29 km/h und für Netztyp T5 etwa 28 km/h.

Die Fahrtzeiten sind für beide betrachtete Erwerbstätigenverteilungen und für größere mittlere Haltestellenabstände bis auf eine Ausnahme fast identisch. Diese beträgt für T1 und T2 etwa 10 bis 11 Minuten und für T3 und T4 zwischen 13 und 14 Minuten. Für die Verteilung ET2 beträgt sie auch für T5 zwischen 13 bis 14 Minuten. Dagegen für die Verteilung ET1 und 500m Haltestellenabstand etwa 10 Minuten länger. Die Fahrzeugfolgezeit ist ohne Einfluss, ebenso wie die ÖV Liniennetzform.

In allen Fällen ist der Einfluss einer Parksuchzeit auf die MIV Reisezeit vernachlässigbar. Alle Werte sind in Tabelle A-7 des Anhangs aufgeführt.

ÖV

Für den öffentlichen Verkehr hat erwartungsgemäß das Liniennetz Auswirkungen auf die mittlere Reisegeschwindigkeit: Je mehr Linien angeboten werden, umso kürzer ist die Reisezeit. Die Unterschiede der Reisezeiten zwischen minimalem (4DL) und maximalem Angebot (8DL_R5R9) betragen für einen 10 Minutentakt etwa 11 bis 13% und für einen 20 Minutentakt etwa 5 bis 8%. Wie zu erwarten, haben verlängerte Parksuchzeiten keinen Einfluss auf die mittlere Reisezeit.

Eine Betrachtung der relevanten Datensätze für unterschiedliche Haltestellenabstände (ET1) bzw. ein Vergleich für die beiden Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilungen zeigt, dass beide Parameter nur eine untergeordnete Auswirkung haben. Bis auf sehr wenige Situationen sind die Differenzen kleiner 2,5%.

Für einzelne ÖV Systeme wurden auch die empfundene Reisezeiten bewertet. Für diese Fälle konnten keine Abweichungen von obigen Aussagen festgestellt werden, so dass obige Beobachtungen auch auf die empfundene Reisezeiten gelten.

Alle Werte sind in Tabelle A-8 des Anhangs aufgeführt.

5.6 Umsteigen und Fußgänger

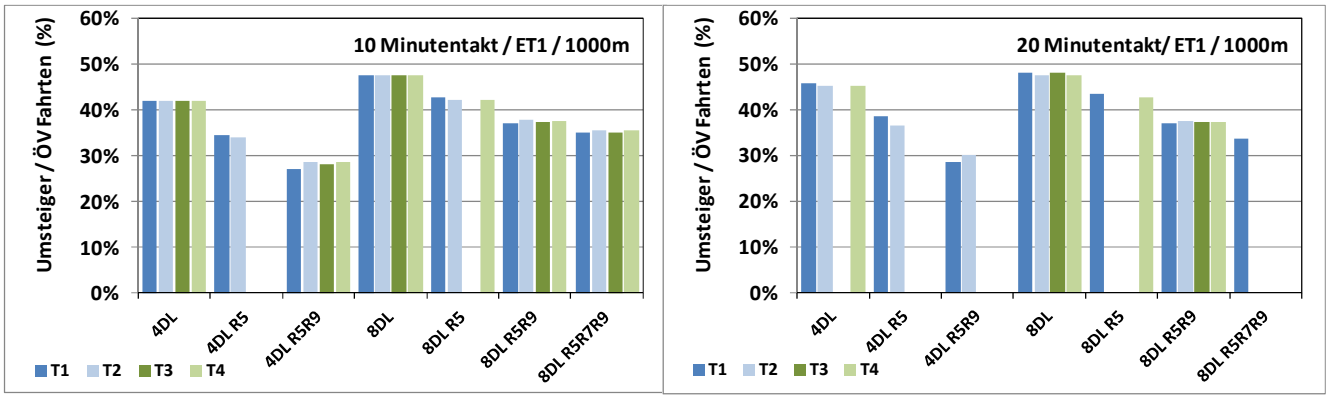
Wie in Kapitel 4 beschrieben, geht neben der Reisezeit und der Startwartezeit die Anzahl der Umsteigevorgänge in die Moduswahl ein. Nachfolgend ist das Umsteigeverhalten zusammen mit dem Anteil Fußgänger bezogen auf die ÖV Fahrten bewertet und dargestellt.

Umsteigen

Für die Verteilung ET1 und größerem mittlerem Haltestellenabstand von 1000 m zeigt nachfolgende Abbildung 5-26 die Anteile der Umsteiger während einer ÖV Fahrt. Dargestellt sind die Ergebnisse für den 10 und 20 Minutentakt und für alle betrachteten Netztypen T1, T2, T3 und T4. Es wird deutlich, dass beide Takte gut vergleichbare Umsteigeanteile aufweisen; die Unterschiede betragen maximal 2%[10].

Der Umsteigeanteil ist für Netze mit 8 Durchmesserlinien stets höher als für solche mit 4 Durchmesserlinien und gleicher Anzahl an Tangentiallinien. Diese Differenz ist am größten für einen 10 Minutentakt (zwischen 8 und 10%). Abbildung 5-26 zeigt weiter, dass pro ÖV Netzform die Umsteigeanteile unabhängig vom Netztyp sind.

Ergebnisse für ÖV Netze mit 500 m mittleren Haltestellenabstand und den Verteilungen ET1 und ET2 sind im Anhang in den Abbildungen A-8 und A-9 dargestellt. Die Ergebnisse sind annähernd identisch.



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt

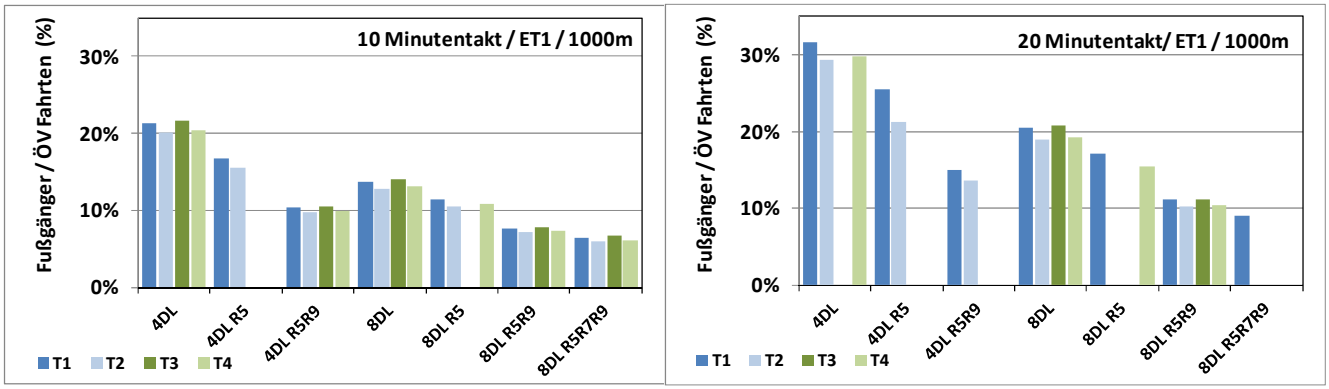
Abbildung 5-26: Anteil der umsteigenden Personen für Netztypen T1, T2, T3 und T4
a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt.
Jeweils Verteilung ET1 und 1000 m mittlerer Haltestellenabstand.

[10] Für Netztyp T1 trifft dies auch für den 30 Minutentakt zu. Allerdings ist keine Datenbasis für andere Netztypen vorhanden, so dass der 30 Minutentakt hier nicht bewertet wird.

Fußgänger

Die Auswertung des Anteils der Fußgänger im Verhältnis zu den ÖV Fahrten zeigt keine überraschenden Ergebnisse. So nimmt dieser Anteil für engere Taktabstände und zunehmendem ÖV Angebot durch mehr Linien deutlich ab. Der Netztyp hat kaum Einfluss auf den Fußgängeranteil.

Nachfolgende Abbildung 5-27 zeigt dies für Erwerbstätigenverteilungen ET1 mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand. Für dieselbe Verteilung und für ET2 mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand sind die Ergebnisse sehr gut vergleichbar und im Anhang in den Abbildungen A-10 und A-11 dargestellt.



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt

Abbildung 5-27: Anteil der Fußgänger zu ÖV Fahrten für Netztypen T1, T2, T3 und T5 a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt. Jeweils Verteilung ET1 und 1000 m mittlerer Haltestellenabstand.

6. Diskussion

Nach einer Darstellung der Netzbelastungen und Diskussion derselben, wird das Umsteigeverhalten für die betrachteten Netzformen, Gesichtspunkte zur Netzausnutzung, zur Netzbelastung und Elastizitäten des ÖV Anteils erörtert.

6.1 Verkehrsbelastungen der ÖV Liniennetze

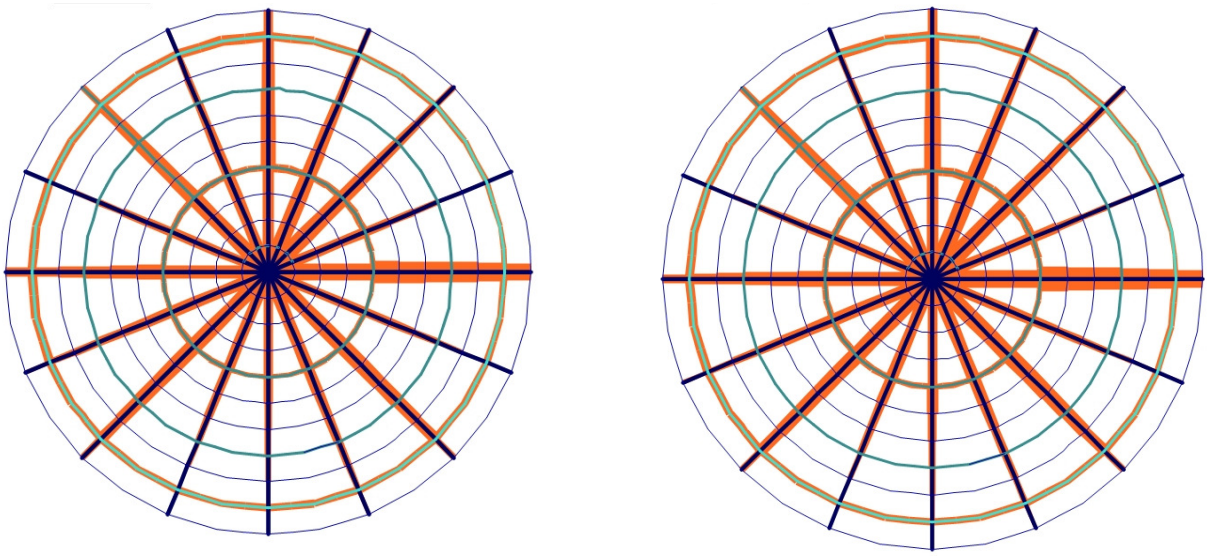
Die Darstellung der berechneten Verkehrsströme für die untersuchten Netzformen verdeutlicht die Bedeutung der verschiedenen Einflussfaktoren und erlaubt eine anschauliche Diskussion.

6.1.1 Einfluss Parksuchzeit

Für die Netztypen T2 und T4 wurde im Innenstadtbereich, d.h. Zentrum und die innersten drei Ringe den Bezirken eine z.T. verlängerte Parksuchzeit zugewiesen; die korrespondierenden Typen ohne bzw. kurzer Parksuchzeit sind T1 bzw. T3. Nachfolgende Abbildung 6-1 vergleicht mögliche Effekte einer Parksuchzeit auf die Verkehrsverteilungen für Netze mit 8 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien betrieben im 10 Minutentakt und mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand für die Erwerbstätigen- bzw. Arbeitsplatzverteilungen ET1.

Für beide Verteilungen ET1 und ET2 führen zusätzliche Parksuchzeiten lediglich zu größeren Verkehrsströmen, jedoch zu keinerlei Umlagerung zwischen den Linien. Dies zeigt auch eine jeweilige Betrachtung der mittleren Auslastungen der einzelnen Linien.

Dies ist nicht unerwartet, denn die Parksuchzeiten erhöhen die MIV Reisezeit und damit den MIV Widerstand und somit direkt den ÖV Anteil am Modal Split. Für die ÖV Reisezeit sind sie dagegen per Definition ohne Auswirkung.

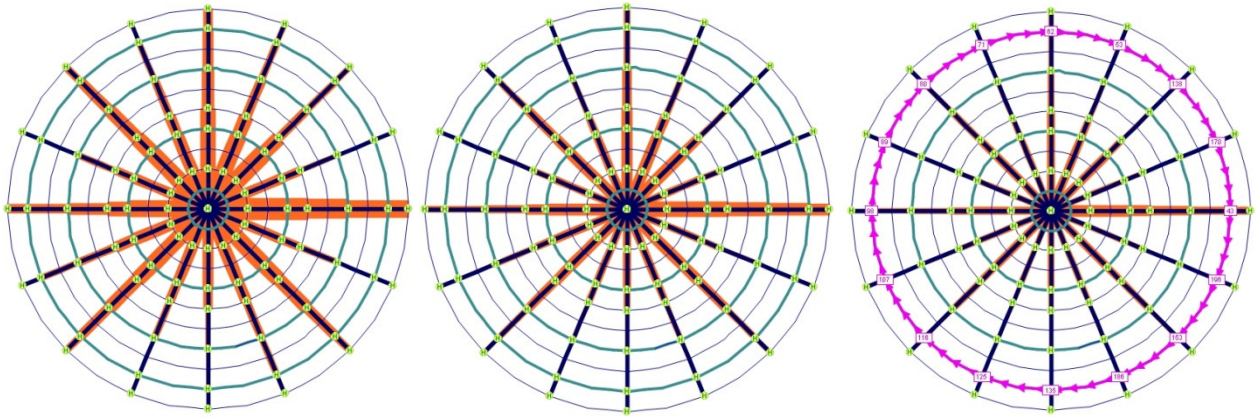


a) Netztyp T3 b) Netztyp T4

Abbildung 6-1: Einfluss einer Parksuchzeit auf Linienbelastungen für Netz mit 8 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien. Verteilung ET1, 10 Minutentakt und 500 m mittlerem Haltestellenabstand: a) Netztyp T3, b) Netztyp T4.

6.1.2 Einfluss des Bedienungstaktes

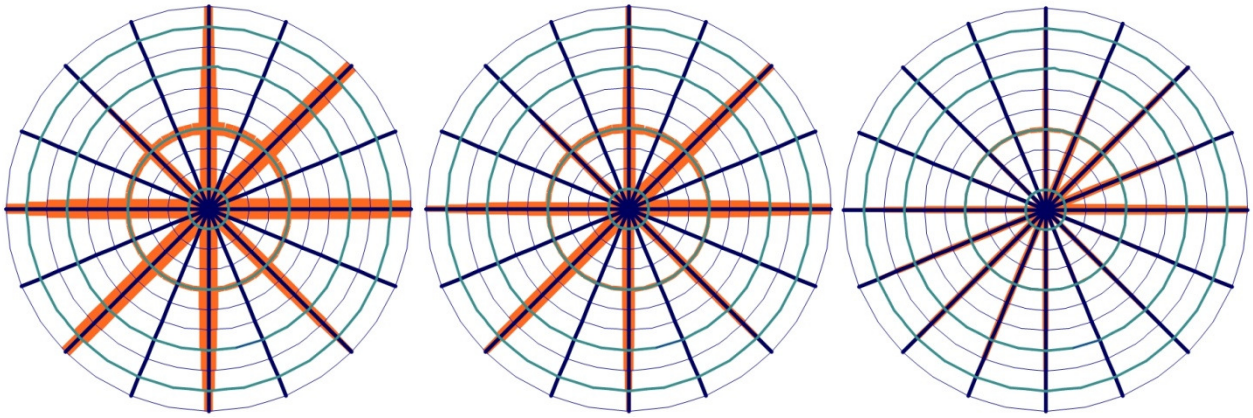
Abbildung 6-2 betrachtet Netze mit 1000 m Haltestellenabstand und 8 Durchmesserlinien. Für Netztyp T1 wird der Takt zwischen 10, 20 und 30 Minuten variiert. Offensichtlich ändern sich die Verkehrsströme auf den Linien sehr ähnlich mit der Taktänderung. Analog ist dies auch für Netze mit zusätzlichen Tangentiallinien zu sehen (siehe Anhang).



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt c) 30 Minutentakt

Abbildung 6-2: Einfluss des Taktes auf Verkehrsmengen für Netz mit 8 Durchmesserlinien. Netztyp T1, Verteilung ET1 und 1000 m mittlerer Haltestellenabstand: a) 10 min., b) 20 min und c) 30 min.

Für die Erwerbstätigenverteilung ET2 werden im Vergleich zu ET1 die einzelnen ÖV Linien wesentlich unterschiedlicher belastet. Abbildung 6-3 zeigt dies für ein Netz mit 4 Durchmesser- und einer Tangentiallinie. Die Verkehrsbelastung wird mit der Verlängerung der Fahrzeugfolgezeit reduziert. Auch hier sind keine Verlagerungseffekte zu beobachten, d.h. die Reduktionen erfolgen gleichmäßig für die einzelnen Linien, was anhand der Verhältnisse der mittleren Auslastungen nachgewiesen wurde.



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt c) 30 Minutentakt

Abbildung 6-3: Einfluss des Taktes auf Verkehrsmengen für Netz mit 4 Durchmesserlinien und 1 Tangentiallinie. Netztyp T2, Verteilung ET2 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand: a) 10 min., b) 20 min und c) 30 min.

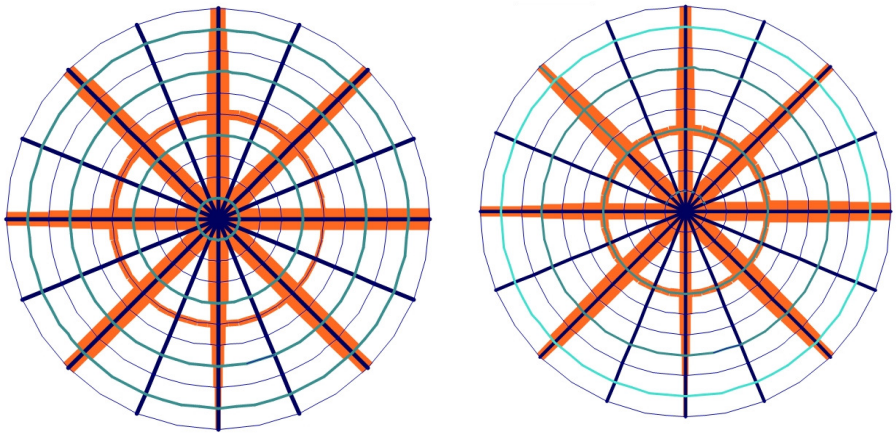
6.1.3 Einfluss einer Taktverdichtung in der Hauptverkehrszeit

Die Taktverdichtung auf 5 Minuten erfolgte auf den Durchmesserlinien, im nachfolgenden Beispiel für 4 Durchmesserlinien des Netztyp T3. Die zusätzlichen Tangentiallinien werden unverändert mit einem 10 Minutentakt bedient.

Für den Netztyp T3 zeigt die Abbildung 6-4 merklich zunehmende Verkehrsströme auf den vier Durchmesserlinien für den Fall einer Taktverdichtung[11]. Tabelle 6-2 vergleicht die mittleren Auslastungen der einzelnen Tangentiallinien und die durchschnittliche Auslastung der jeweils 4 Durchmesserlinien. Die ebenfalls dargestellten relativen Änderungen im unteren Teil der Tabelle verdeutlichen einen erheblichen Einfluss des Netztyp auf diese Veränderungen: Für die Netztypen T1 und T3 nimmt die mittlere Auslastung der Tangentiallinien (4DL_R5 oder 4DL_R5R9) eher ab. Für die Durchmesserlinien dagegen stark zu (74 bis 100%). Dies spiegelt annähernd die Taktverdichtung wider. Für beide Netztypen ist somit eine Verlagerung auf die nunmehr besser bedienten Durchmesserlinien festzuhalten. Dagegen sinkt für T5 die Auslastung der in den 10 Minutentakten stark frequentierten Tangentiallinien drastisch, ohne dass dies durch eine entsprechende Zunahme der Werte der Durchmesserlinien ausgeglichen wird. Für diesen Netztyp sind bei einer Taktverdichtung auch insgesamt reduzierte Auslastungen berechnet worden.

	Netzform	Tang.linie ↓ Takt →	T1		T3		T5	
			5/10	10	5/10	10	5/10	10
mittlere Auslastung	4DL_R5	R5	15	17	19	18	17	26
	4DL_R5R9	R5	13	16	16	21	14	24
		R9	16	19	19	20	17	39
	4DL_R5	DL1-DL4	59	34	74	37	69	66
	4DL_R5R9	DL1-DL4	50	28	63	33	57	48
Ø Änderung	4DL_R5	R5	-12%		6%		-35%	
	4DL_R5R9	R5R9	-17%		-14%		-49%	
	4DL_R5	DL1-DL4	74%		100%		5%	
	4DL_R5R9	DL1-DL4	79%		91%		19%	

Tabelle 6-1: Taktverdichtung während der HVZ: Vergleich der mittleren Auslastungen und durchschnittliche Änderungen für verschiedene Netztypen. Verteilung ET1.



a) Mit Taktverdichtung auf 5 Minuten b) ohne Taktverdichtung

Abbildung 6-4: Einfluss einer Taktverdichtung in der Hauptverkehrszeit auf Verkehrsmengen für Netz mit 4 Durchmesserlinien und 1 Tangentiallinie. Netztyp T3, Verteilung ET1 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand: a) mit Taktverdichtung auf 5 Minuten (R5), b) 10 Minutentakt ohne Taktverdichtung (R4).

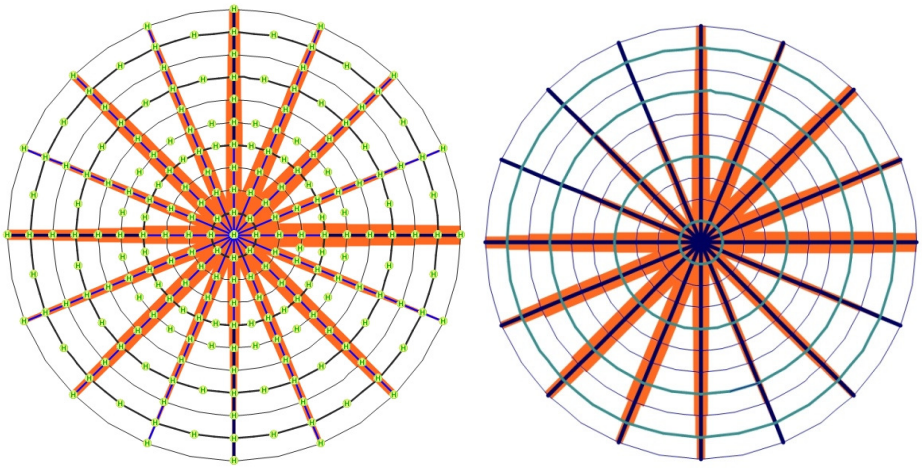
[11] Potentielle Unterschiede aufgrund der Verwendung der Tangentiallinie R5 im Falle der Taktverdichtung (a) und von R4 ohne Taktverdichtung (b) werden vernachlässigt.

6.1.4 Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung

Ein Vergleich der berechneten Verkehrsströme für Netze mit ausschließlich Durchmesserlinien zeigt klar, wie die Verteilungen ET1 und ET2 bzw. deren verschiedenartige Ortsverteilung von Quellen und Zielen die ÖV Linienbelastung beeinflusst. Beispielhaft wird in Abbildung 6-5 dies für ein Netz 8DL dargestellt. Die auf die Innenstadt zentrierte Arbeitsplatzverteilung in ET1 weist unterschiedlich belastete Linien auf. Die Einzelwerte der Auslastung betragen zwischen 17 und 34% (linkes Bild). Für die Verteilung ET2 sind diese Differenzen noch erheblich stärker ausgeprägt. Die Linien im zweiten und vierten Quadranten sind schwach und in ihren Außenbereichen sehr schwach ausgelastet. Dagegen Linien im ersten und dritten Quadranten sehr stark ausgelastet. Diese erheblich asymmetrische Belastung reflektiert die geänderte Nachfragesituation: Die Konzentration der Arbeitsplätze auf den ersten und dritten Quadranten. Die Einzelwerte der mittleren Auslastung schwankt zwischen 17 und 52%. Im zweiten und vierten Quadranten sind für die Verteilung ET2 die Linien in den Außenbereichen extrem schwach ausgelastet, so dass hier die Unterschiede der Querschnittsbelastungen zwischen ET1 und ET2 noch stärker ausgeprägt sind.

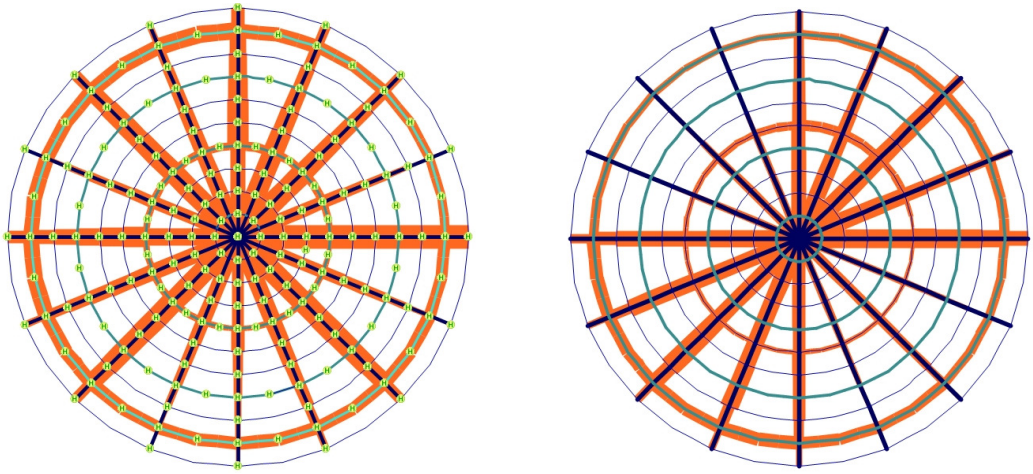
Auch für Tangentiallinien zeigt sich ein wichtiger Unterschied zwischen beiden Verteilungen, siehe Abbildung 6-6 für Netze mit 8 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien. Ähnlich zur Darstellung für 8 Durchmesserlinien sind für beide Verteilungen ET1 und ET2 die unter 0 - 180° und 45 - 225° verlaufenden Linien besonders hoch und für ET2 die Linien des zweiten und vierten Quadranten sichtbar geringer belastet. In der vergrößerten Darstellung der Verkehrsbelastungen der Tangentiallinien von Abbildung 6-7 werden für Netztyp T5 die lokale Unterschiede deutlich. Die höhere Belastungen befinden sich für Verteilung ET2 erwartungsgemäß im ersten und dritten Quadraten, für ET1 treten die höchsten Belastungswerte im zweiten Quadranten auf. Die Verhältnisse von maximaler zu minimaler ÖV Belastung sind für Verteilung ET2 gegenüber ET1 zwischen 10 und 20% höher. Diese Bewertung gilt für die Netztypen T2 und T5.

Im Anhang befinden sich die entsprechenden Darstellungen für Netze mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien.



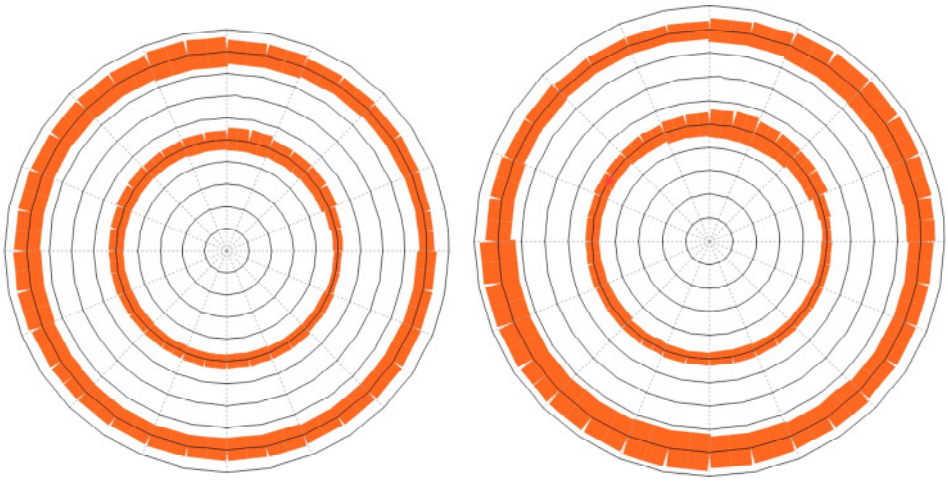
a) Verteilung ET1 b) Verteilung ET2

Abbildung 6-5: Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung auf die Linienbelastung für Netze mit 8 Durchmesserlinien. Netztyp T2, 10 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand: a) Verteilung ET1, b) Verteilung ET2.



a) Verteilung ET1 b) Verteilung ET2

Abbildung 6-6: Einfluss der Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung auf die Linienbelastung für Netze mit 8 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien. Netztyp T5, 10 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand:
a) Verteilung ET1, b) Verteilung ET2.

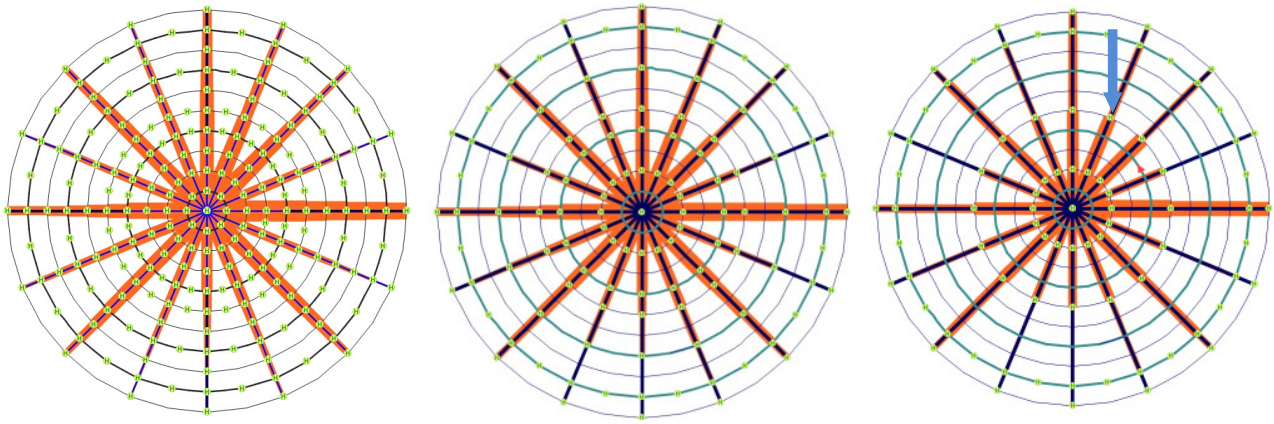


a) Verteilung ET1 b) Verteilung ET2

Abbildung 6-7: Verkehrsbelastungen der beiden Tangentiallinien für Netze 8DL_R5R9. Netztyp T5, 10 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand:
a) Verteilung ET1, b) Verteilung ET2.

6.1.5 Einfluss des Haltestellenabstandes

Der mittlere Haltestellenabstand ist in Abbildung 6-8 beim Vergleich für Netze mit 8 Durchmesserlinien variiert. Die Abstände sind 500 m, 1000 m und größer 1000 m („1000m-plus“). Der Netztyp ist T2 und es liegt eine Bedienung im 10 Minutentakt vor. Prinzipiell weisen die Darstellungen ein gleiches Muster auf: Stärker oder schwächer sind stets dieselben Linien belastet. Die steigende Distanz zwischen den Haltestellen vergrößert die Differenzen der einzelnen Belastungsquerschnitte, was sehr deutlich für die Darstellung „1000m-plus“ am Ring 5 erkennbar ist (siehe Pfeil).



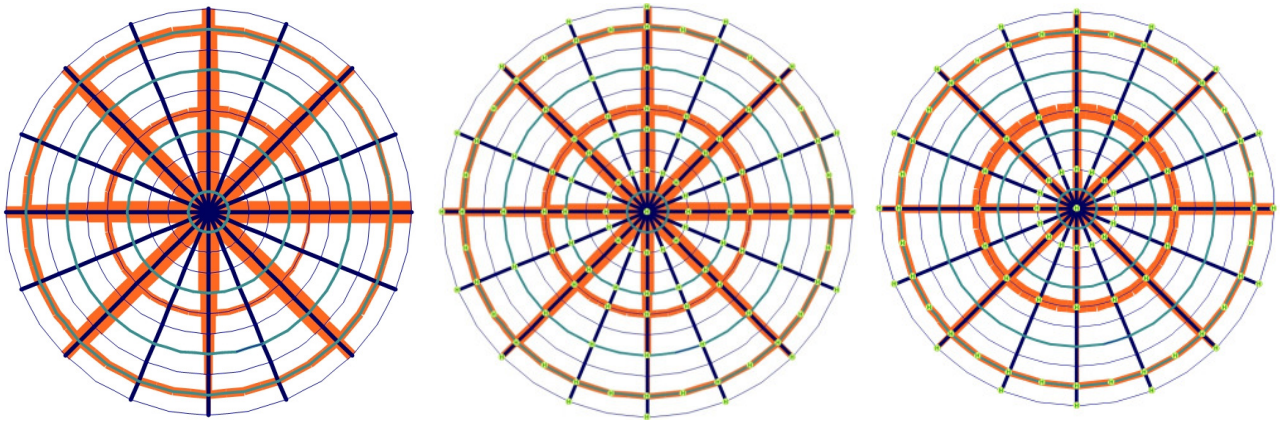
a) 500 m b) 1000 m c) „1000m-plus“

Abbildung 6-8: Einfluss des mittleren Haltestellenabstandes auf Verkehrsmengen für Netze mit 8 Durchmesserlinien. Netztyp T2, Verteilung ET1 und 10 Minutentakt: a) 500 m, b) 1000 m und c) 1000m-plus.

Einen ähnlichen Vergleich für 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien zeigt die Abbildung 6-9. In dieser Darstellung sind zwei Beobachtungen auffallend: Wie bereits im Ergebniskapitel dargestellt wird für einen Haltestellenabstand von 1000 m der höchste Modal Split für den ÖV erreicht. Werden die Haltestellenabstände weiter vergrößert, so nimmt nicht nur der Modal Split ab, sondern auch der Anteil des Verkehrs, der über die Durchmesserlinien geführt wird.

Die zweite Auffälligkeit ist, dass die innere Tangentiallinie R5 zunehmende Wichtigkeit erhält. So nimmt die Auslastung mit zunehmendem Haltestellenabstand von 20% über 22% auf 32% zu. Im Falle von 1000m-plus ist diese Linie mit Abstand am stärksten ausgelastet. Bezogen auf die Bezirke von Ring 4 mit vielen Arbeitsplätzen heißt dies, dass diese in einigen Fällen mehr oder weniger nur noch über die R5 Linie erreichbar sind, was die starke Frequentierung von R5 für das Netz 1000m-plus begründet.

Auch im Falle von 8 Durchmesserlinien wird die Tangentiallinie R5 für sehr große Haltestellenabstände auf den Durchmesserlinien die am stärksten ausgelastete Linie. Und erneut steigt ihre Auslastung gegenüber dem Netz mit 1000 m Haltestellenastand deutlich von 15% auf 24% (siehe Anhang).



a) 500 m b) 1000 m c) „1000m-plus“

Abbildung 6-9: Einfluss des mittleren Haltestellenabstandes auf Verkehrsmengen für Netze mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien. Netztyp T2, Verteilung ET1 und 10 Minutentakt: a) 500 m, b) 1000 m und c) 1000m-plus.

6.2 Umsteigeanteile

Umsteigen ist für Netze, die nur Durchmesserlinien aufweisen ausschließlich im Zentrum möglich. Zusätzliche Tangentiallinien bieten an allen Kreuzungen mit Durchmesserlinien zusätzliche Umsteigemöglichkeiten. Dennoch zeigt eine entsprechende Auswertung, dass die höchste Anzahl an Umsteigern für Netze mit ausschließlich 4 bzw. 8 Durchmesserlinien ermittelt wird. Dies gilt für beide Erwerbstätigenverteilungen, alle Netztypen, alle Takte und unabhängig vom Haltestellenabstand. Beispielhaft zeigt dies Abbildung 6-10 für einen 10 Minutentakt und den Referenznetztyp T1. Hier ist für die Netze mit 1 oder 2 Tangentiallinien die relative Abnahme der Anzahl der Umsteiger gegenüber den beiden Netzformen mit 4 (links) und 8 Durchmesserlinien (rechts) aufgetragen. Es ist hier auch zu sehen, dass diese relative Abnahme für 4 Durchmesserlinien größer ist. Bei 8 Durchmesserlinien sind die Änderungen mit kleiner 10% eher geringfügig.

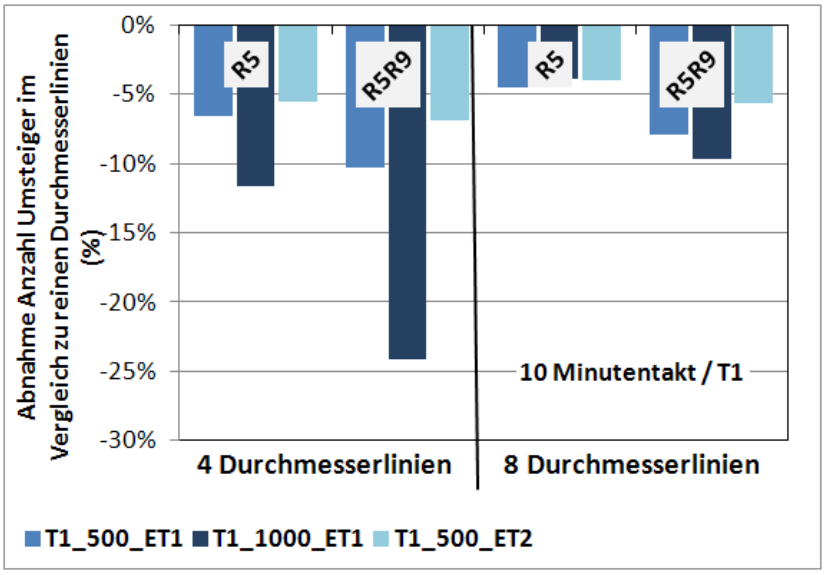


Abbildung 6-10: Relative Abnahmen der Anzahl der Umsteiger in Netzen mit Tangentiallinien im Vergleich zu Durchmesserlinien-Netzen. Verteilung ET1, 500 m mittlerer Haltestellenabstand und 10 Minutentakt.

Die Gesamtzahl der ÖV Fahrten steigt mit zusätzlichen Tangentiallinien. Dies verdeutlicht, dass das zusätzliche ÖV Angebot überwiegend für Direktfahrten genutzt wird bzw. einfach mehr attraktive Direktfahrten angeboten werden. Zur Vervollständigung sei erwähnt, dass in der Nutzenfunktion der Moduswahl Umsteigen durch zusätzliche Reisezeit „bestraft“ wird. Eine diesbezügliche Variation der Nutzenfunktion wurde jedoch nicht durchgeführt.

6.3 Netzausnutzung

Die mittlere Auslastung der ÖV Linien und das Verhältnis der umgelegten Personenkilometer zu den angebotenen Servicekilometer sind Kenngrößen, die nachfolgend als Maße für die Netzausnutzung oder einer Netzeffizienz dargestellt und diskutiert werden.

Die mittlere durchschnittliche Auslastung ist in Abbildung 6-11 für Netztypen T1 bis T5, einer zugrunde liegenden Erwerbstätigenverteilung ET1 und einen 10 Minutentakt für Netze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand dargestellt. Die Auslastungswerte sind für den Einsatz von 12 m Standardbussen berechnet worden[12]. Festzuhalten ist, dass zwischen den Netztypen T1 bis T4 kaum Unterschiede festzustellen sind: Die in der Abbildung dargestellten Potenznäherungskurven verdeutlichen dies: Die obere Kurve nähert T5 an, in der Mitte sind diese aufeinanderliegend für T2 bis T4 und knapp darunter für T1. Sehr ähnlich sind entsprechenden Daten für den 20 Minutentakt (siehe Anhang), sowie die entsprechenden Auswertungen für Verteilung ET1 mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Verteilung ET2 mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand.

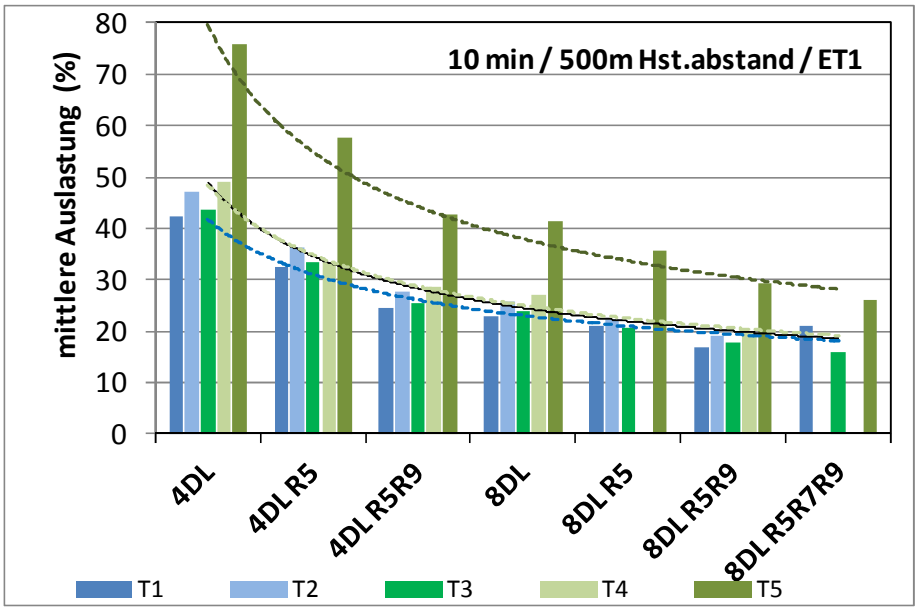


Abbildung 6-11: Mittlere durchschnittliche ÖV Linienauslastung für Netztypen T1 bis T5, sowie deren Potenznäherungskurven.
Verteilung ET1, 500 m mittlerer Haltestellenabstand und 10 Minutentakt.

Das Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer ist die Abbildung 6-12 für Netztyp T1 dargestellt. Der Parameter in dieser Darstellung ist die Fahrzeugfolgezeit. Erkennbar erreichen Netze mit 4 Durchmesserlinien die höchsten Netzauslastungen. Die größten Zunahmen sind bei einer Reduktion von einem 10 auf einen 20 Minutentakt erkennbar, während eine weitere Erhöhung der Fahrzeugfolgezeit auf 30 Minuten die Zahlenwerte nur noch geringfügig erhöht.

[12] Die Überlastung dieses Bustyps für einige Netzstrukturen der Netztyp T5 wird hier nicht weiter berücksichtigt. Als überlastet wird eine Linie bewertet, wenn in der Spitzenstunde die Sitzplatzbelegung größer 150% ist, siehe Ergebniskapitel. In diesem Fall werden Gelenkbusse eingesetzt.

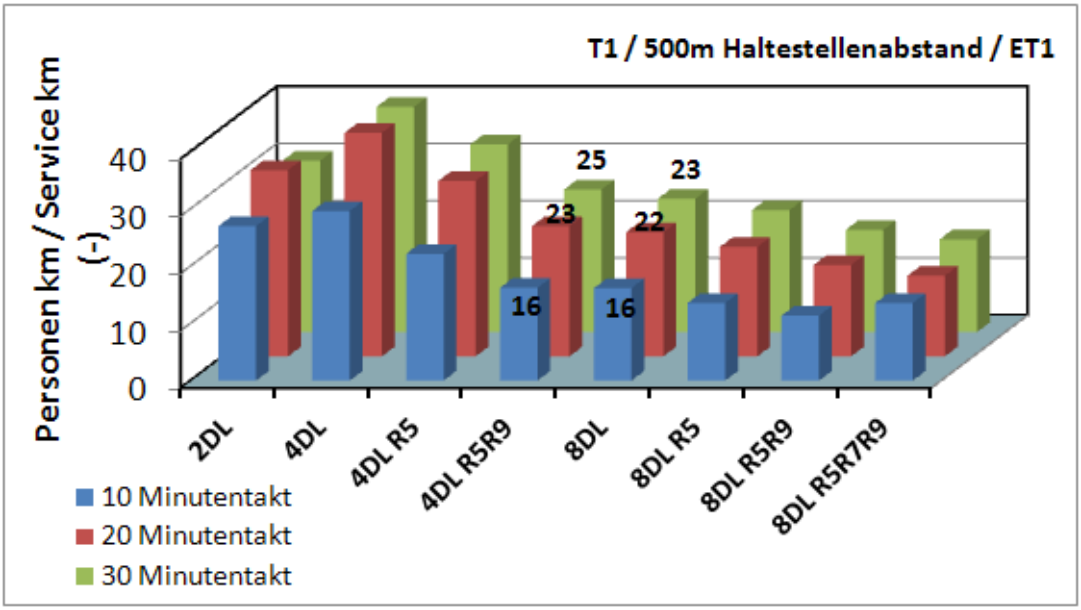


Abbildung 6-12: Netzausnutzung ausgedrückt mittels Personenkilometer/Servicekilometer für Netztyp T1 und 10 bis 30 Minutentakte.
500 m mittlerer Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Dieselbe Darstellung nunmehr für die Netztypen T1 bis T4 in Abbildung 6-13 mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und einer Erwerbstätigenverteilung ET1. Eine verlängerte Parksuchzeit erhöht das Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer ebenso um etwa 10%, siehe Vergleich T2 mit T1 und T4 mit T3, wie eine MIV Geschwindigkeitsreduktion, siehe Wertevergleich T1 mit T3. Beide Effekte sind damit nahezu gleich wirksam.

Dieselbe Darstellung für Netztypen T1 und T5 stellt Abbildung 6-14 dar. Sie vergleicht die beiden Verteilungen ET1 und ET2 mit jeweils 500 m mittlerem Haltestellenabstand. Erwartungsgemäß werden für T5 höhere Werte berechnet. Dabei haben die beiden Verteilungen sehr unterschiedliche Konsequenzen für die Netztypen: Während für T1 für die eher „polare“ Verteilung ET2 eine um durchschnittlich 23% bessere Netzeffizienz erreicht wird, ist dies für T5 genau anders herum (Reduktion um 9%).

Es stellt sich die Frage, ob mit einem Minimalwert des Verhältnisses von Personenkilometer zu Servicekilometer die Grenze zur Wirtschaftlichkeit unter den hier angenommenen Randbedingungen beschreiben werden kann. Dazu wurde unter Berücksichtigung der notwendigen Fahrzeugkapazitäten für alle Untersuchungen jeweils das Liniennetz ermittelt, das gerade noch ein positives relatives Betriebsergebnis aufweist. Dann wurde das dazu entsprechende Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer bestimmt. Werden nun die Werte der 3 Gruppen von Erwerbstätigenverteilung und mittlerer Haltestellenabstand betrachtet –also ET1 mit 500 m, ET1 mit 1000 m und ET2 mit 500 m, so zeigen sich charakteristische Wertebereiche. Die Verteilung ET1 mit einem Haltestellenabstand von 1000 m weist den geringsten Mittelwert von 19,7 auf, um gerade wirtschaftlich zu arbeiten. Der größte Mittelwert von 25,2 ist für die Verteilung ET2 mit 500 m Haltestellenabstand notwendig. Für ET1 mit 500 m werden 23,0 berechnet. Der vergleichsweise höhere Werte für ET2 ist begründet durch die inhomogene Belastung der ÖV Linien (Abbildungen 6-5 bis 6-7): Im zweiten und vierten Quadranten der Modellstadt wird erheblich weniger Verkehr als im ersten und dritten Quadranten nachgefragt, was die Netzeffizienz reduziert. Zur Optimierung wäre eine Reduktion der Linienanzahl in diesen nachfrageschwachen Quadranten durchzuführen ggf. mit Aufgliederung ihrer Außenäste (Weidmann, 2012).

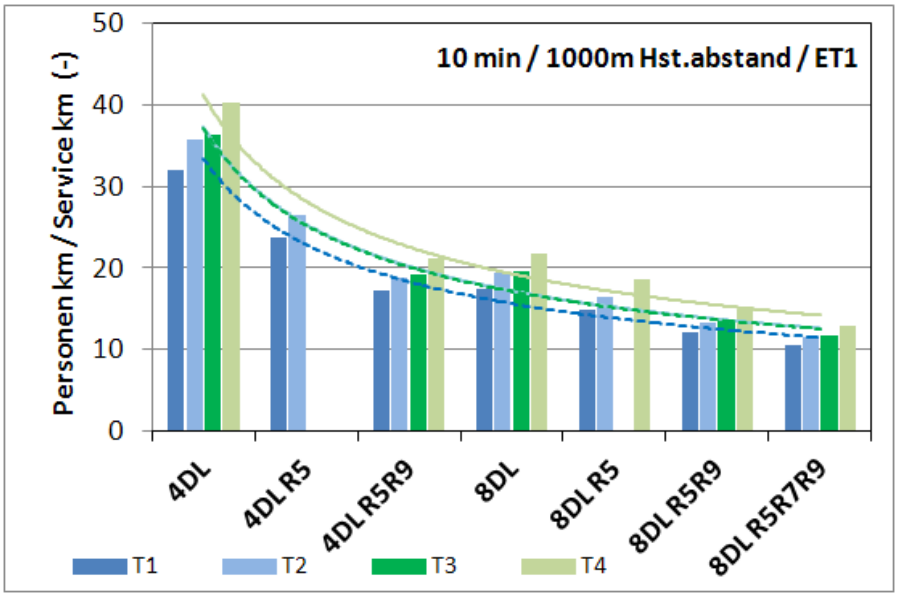


Abbildung 6-13: Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer für Netztypen T1 bis T4, sowie deren Potenznäherungskurven. Verteilung ET1, 1000m mittlerer Haltestellenabstand und 10 Minutentakt.

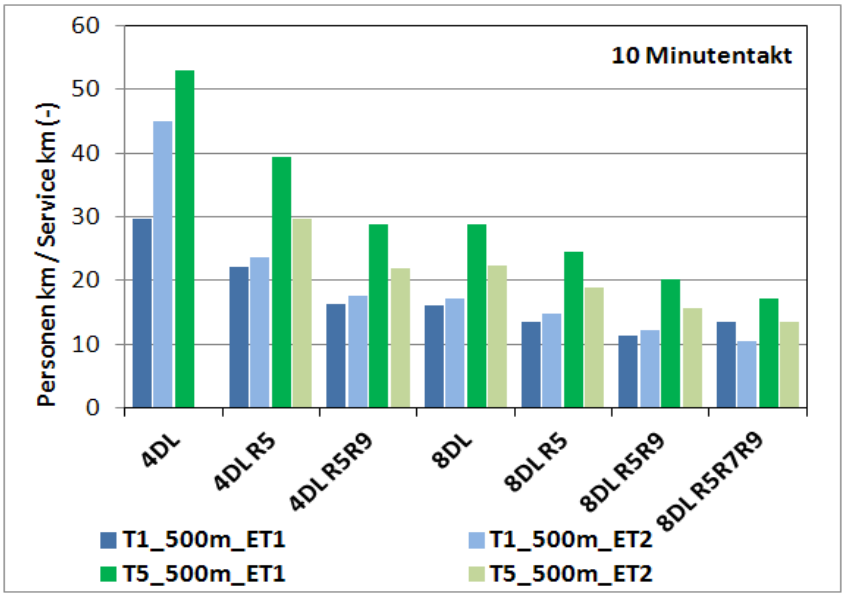


Abbildung 6-14: Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer für Netztypen T1 u. T5. Verteilungen ET1 und ET2, 500 m Haltestellenabstand. 10 Minutentakte.

In den Abbildungen 6-11 bis 6-14 sind für die Netzformen 4 Durchmesserlinien mit 2 Tangentiallinien (4DL_R5R9) und 8 Durchmesserlinien (8DL) sehr vergleichbare Auslastungen festzustellen. Vergleicht man für diese zwei Netzformen die Anzahl der zusätzlichen Fahrgäste aufgrund der zusätzlichen Linien (also einerseits zwischen den Netzformen 4DL und 4DL_R5R9 und andererseits zwischen 4DL und 8DL), so ergeben sich für alle Netztypen, Verteilungen und Takte deutlich größere Differenzen für den Fall der zusätzlichen Tangentiallinien 4DL_R5R9. Somit ermöglichen für die betrachtete Modellstadt zwei zusätzliche Tangentiallinien einen größeren Fahrgastzuwachs als vier zusätzliche Durchmesserlinien. Allerdings ist bezüglich des Betriebsaufwandes zu beachten, dass die äußere Tangentiallinie R9 eine Linienlänge von 28,2 km aufweist, was für den Fahraufwand annähernd drei Durchmesserlinien entspricht (Linienlänge 10 km) und damit die Unterschiede deutlich relativiert.

6.4 Mittlerer Haltestellenabstand

Der Vergleich der Ergebnisse für 500 und 1000 m mittlerem Haltestellenabstand zeigte höhere Modal Split-Werte und damit verbesserte Ergebnisse für Netze mit 1000 m Haltestellenabstand. Weitere Rechnungen wurden für Netztyp T2 mit einem noch größeren mittleren Haltestellenabstand durchgeführt („1000m-plus“). Hierfür verringerte sich der Wert für den Modal Split, ebenso wurde ein geringeres Betriebsergebnis ermittelt (siehe Kapitel 5.3). Alle nachfolgenden Überlegungen beziehen sich auf Netztyp T2.

Berechnungen für die Netzform „1000m-plus“ führen damit auch zu kleineren Verhältnissen von Personen- zu Servicekilometer, wie aus Abbildung 6-15 ersichtlich. Werden die drei Alternativen bezüglich Haltestellenabstand verglichen (500 m, 1000 m oder 1000m-plus), stellt für diese Untersuchung ein mittlerer Haltestellenabstand von 1000 m ein lokales Maximum für die Netzeffizienz dar. Dies erklärt damit auch die entsprechenden betrieblichen Ergebnisse, wo entsprechende Bestwerte für einen 1000 m Haltestellenabstand ermittelt wurden. Van Nes (2002) ermittelte aus Sicht maximalem Betriebsergebnis einen optimalen Haltestellenabstand von 600 bis 800 m. Aufgrund der in dieser Arbeit gewählten Netzstruktur konnten Haltestellenabstände zwischen 500 und 1000 m nicht sinnvoll modelliert werden, weshalb ein echtes Optimum nicht angegeben werden kann.

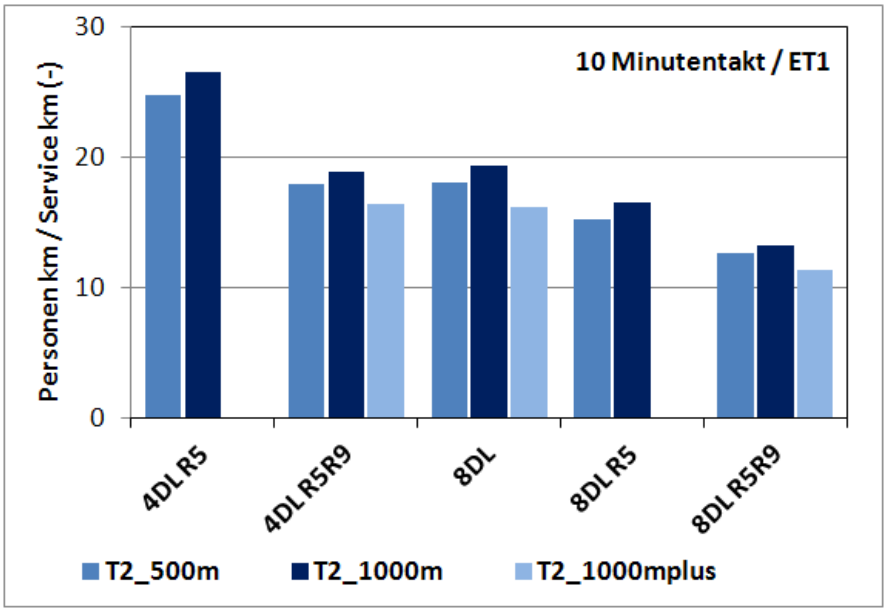


Abbildung 6-15: Verhältnis Personenkilometer zu Servicekilometer für 3 verschiedene mittlere Haltestellenabstände des Netztypen T2.
Verteilung ET1 und 10 Minutentakt.

Weist das Netz sehr weite Haltestellenabstände auf, ist mit einem vergleichsweise hohen Anteil von Fußgänger im Verhältnis zu ÖV Benutzer zu rechnen, wie in Abbildung 6-16 für einen 10 Minutentakt dargestellt. Auch eine Berechnung für einen 20 Minutentakt weist mit 48% für „1000m-plus“ einen mehr als doppelt so hohen Fußgängeranteil auf (gegenüber 19% für 1000 m Haltestellenabstand). Dieser hohe Fußgängeranteil ist auf die langen Wege zu den Haltestellen zurückzuführen. Dieser Effekt ist für die Netzform 8DL besonders deutlich sichtbar. Für diese Netzform sind die Haltestellenabstände mit bis zu 2 km am größten, so dass Nachfragende für kleine Wege praktisch kein brauchbares ÖV Angebot vorliegt und der Fußweg die beste Alternative zum MIV darstellt.

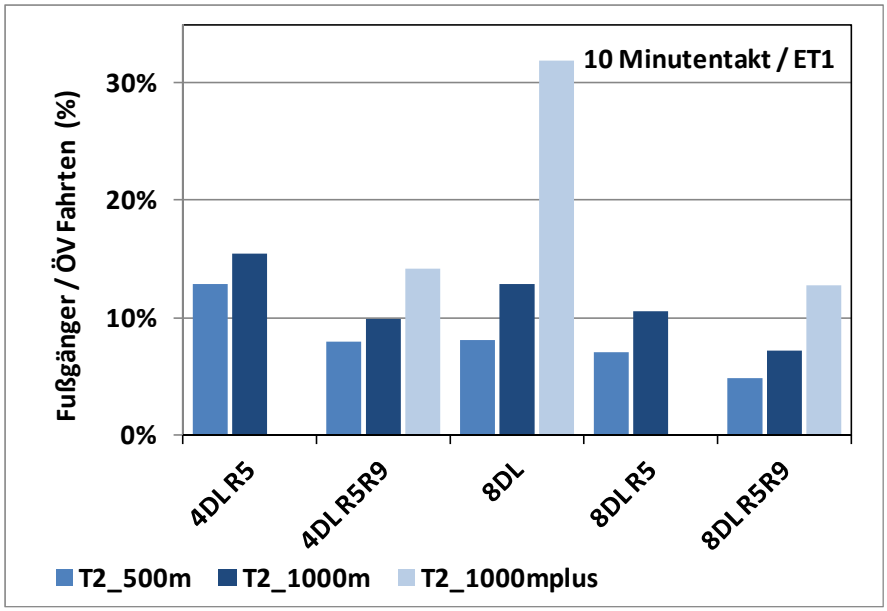


Abbildung 6-16: Verhältnis von Fußgänger zu ÖV Benutzer für verschiedene mittlere Haltestellenabstände. Netztyp T2, 10 Minutentakt und Verteilung ET1.

Betrachtung der Umsteigeanteile: Die Netzform 8DL hat generell gegenüber den anderen Formen den größten Wert (siehe Kapitel 6.1 oben). Laut Abbildung 6-17 ist interessanterweise die Variante mit den weitesten Haltestellenabständen auch diejenige mit höheren Umsteigeanteilen. Sobald jedoch Tangentiallinien vorhanden sind, sinkt der Anteil im Vergleich zu Netzen mit geringeren Haltestellenabständen (siehe Pfeile). Die Begründung liegt wiederum darin, dass bei „1000m-plus“ Netzen die Haltestellen von Durchmesserlinien sehr große Abstände voneinander haben. Somit lohnt sich ein Umsteigen offensichtlich weniger. Auch hier dürfte der Fußweg von der nächstgelegenen Haltestelle derselben Linie zum Endziel die zeitlich als günstiger empfundene Variante darstellen.

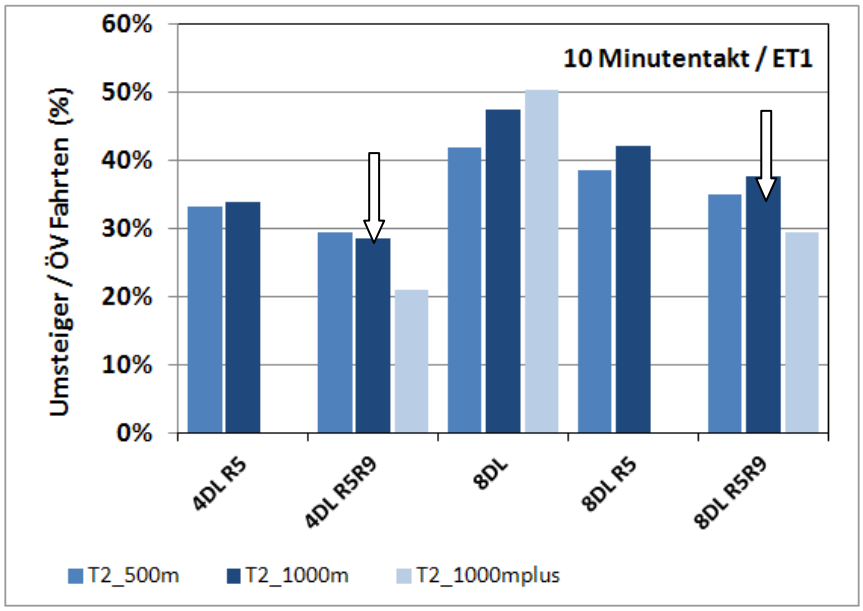


Abbildung 6-17: Verhältnis von Umsteiger zu ÖV Fahrten für verschiedene mittlere Haltestellenabstände. Netztyp T2, 10 Minutentakt und Verteilung ET1.

6.5 Elastizitäten

6.5.1 Modal Split und Taktzeit

Mittels Elastizitätsmodell können Änderungen von Nachfrage- und Angebotsseite eines Verkehrsangebots beschrieben werden. Dies ist zulässig unter der Voraussetzung, dass nur eine Größe geändert wird und die Änderungen klein bleiben. Zunächst wird die Elastizität des Modal Splits bezüglich Änderungen im Bedienungstakt berechnet.

Die Elastizität der Nachfrage T (hier Modal Split) bezüglich des Angebots S (hier Fahrzeugfolgezeit) ergibt sich zu:

$$E_M = \frac{S_0}{T_0}\frac{\partial T}{\partial S} \approx \frac{S_0}{T_0}\frac{T-T_0}{S-S_0} \qquad (6\text{-}1)$$

mit

T = Modal Split und T_0 = Modal Split des Ausgangszustands
S = Fahrzeugfolgezeit und S_0 = Fahrzeugfolgezeit des Ausgangszustands

Für eine Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten ergibt sich $\frac{S_0}{S-S_0}$ zu -2, bei einer entsprechenden Verdichtung von 30 auf 10 Minuten zu -1,5. Damit ergeben sich für die Verteilung ET1 und einen mittleren Haltestellenabstand von 500 m die Elastizitäten bei einer Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten, wie in Abbildung 6-18 gezeigt. Netztyp 5 hat zwar eine signifikant geringere Elastizität, jedoch weist gerade dieser Netztyp auch mit Abstand die höchsten Werte für den Modal Split auf. Weiter sind für einen einzelnen Netztyp die Unterschiede der Elastizitäten für die verschiedenen Liniennetze gering. Dennoch ist festzustellen, dass für Liniennetze ohne Tangentiallinien, also mit 4 oder 8 Durchmesserlinien, jeweils die größten Elastizitäten berechnet werden. Dies trifft bis auf eine Ausnahme auch für die entsprechenden Berechnungen für die Verteilung ET2 und für Netze mit größeren Haltestellenabständen zu (siehe Anhang). Es ist zu beachten, dass die Elastizitätswerte bis -0,9 betragen und damit z.B. für das Liniennetz 4DL die Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten eine Erhöhung des ÖV Modal Splits um 90% zu erwarten ist.

Für eine Taktverdichtung von 30 auf 10 Minuten ergeben sich erwartungsmäßig größere Elastizitätswerte von bis zu -1,6 (Abbildung 6-19).

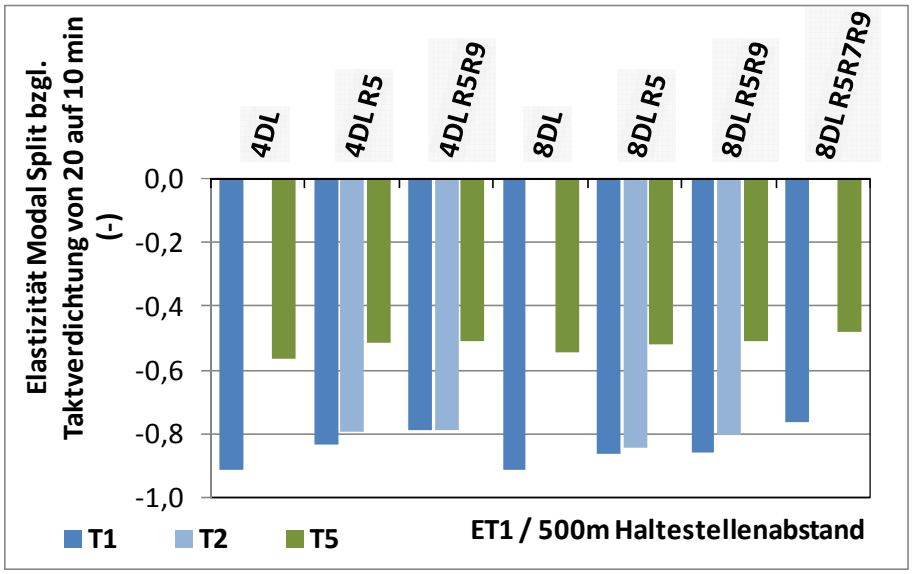


Abbildung 6-18: Elastizitäten für verschiedene Netztypen bei einer Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten. Verteilung ET1, 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

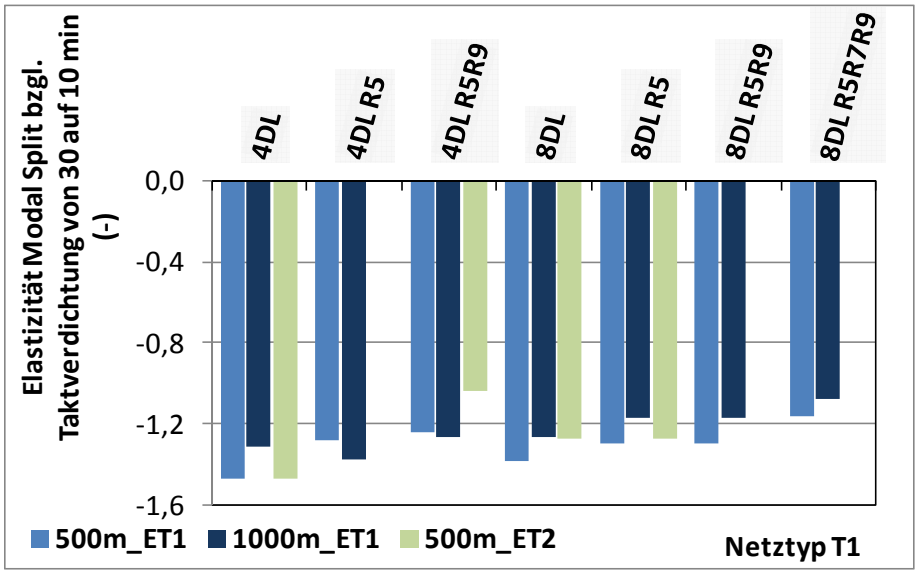
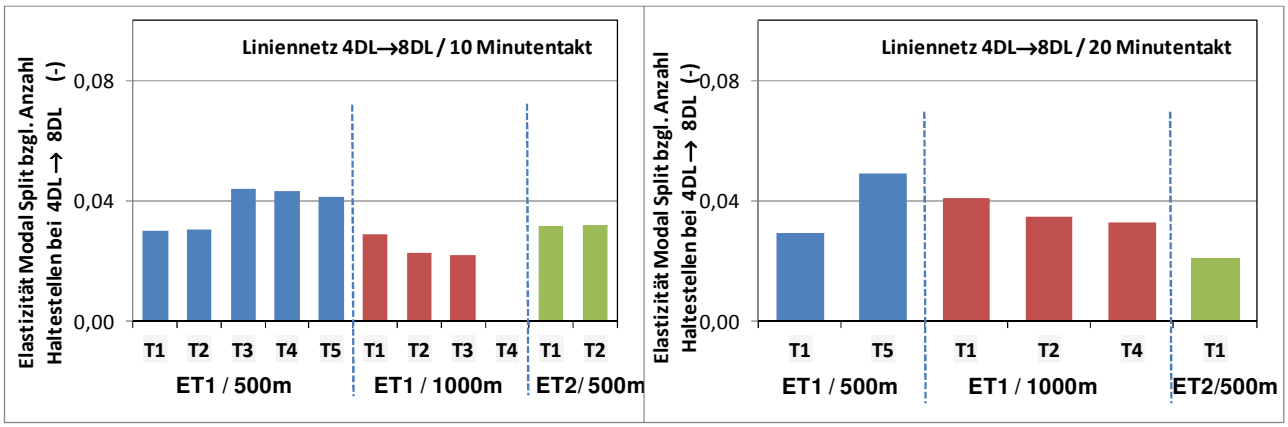


Abbildung 6-19: Elastizitäten für Netztyp T1 bei einer Taktverdichtung von 30 auf 10 Minuten.

6.5.2 Modal Split und Haltestellendichte

Beim Vergleich verschiedener Netze stellt sich auch die Frage nach der Bewertung der ÖV Leistung bezogen auf ein Flächen- oder Dichtemaß. Auch hierfür werden nachfolgend Elastizitäten berechnet. Die ÖV Nachfrage wird erneut ausgedrückt durch den Modal Split. Als Dichtemaß wird die Anzahl der Haltestelle des jeweiligen Netzes herangezogen. Dies ist zulässig, denn die Fläche des Untersuchungsraums ist für alle Fälle identisch. Die Berechnung der Elastizitätswerte erfolgt nach der obigen Gleichung (6-1).[13]

Zunächst wird als Ausgangsliniennetz ein Netz mit 4 Durchmesserlinien gewählt. Diese wird auf ein zweites Liniennetz mit 8 Durchmesserlinien erweitert. Abbildung 6-20 zeigt die berechneten Elastizitäten für den 10 (links) und 20 Minutentakt (rechts). In allen Fällen sind die Elastizitäten durchweg kleiner gleich 0,05 und damit sehr gering. Sie lassen sich nicht bezüglich Netztyp, Erwerbstätigenverteilung oder Haltestellenabstand differenzieren.



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt

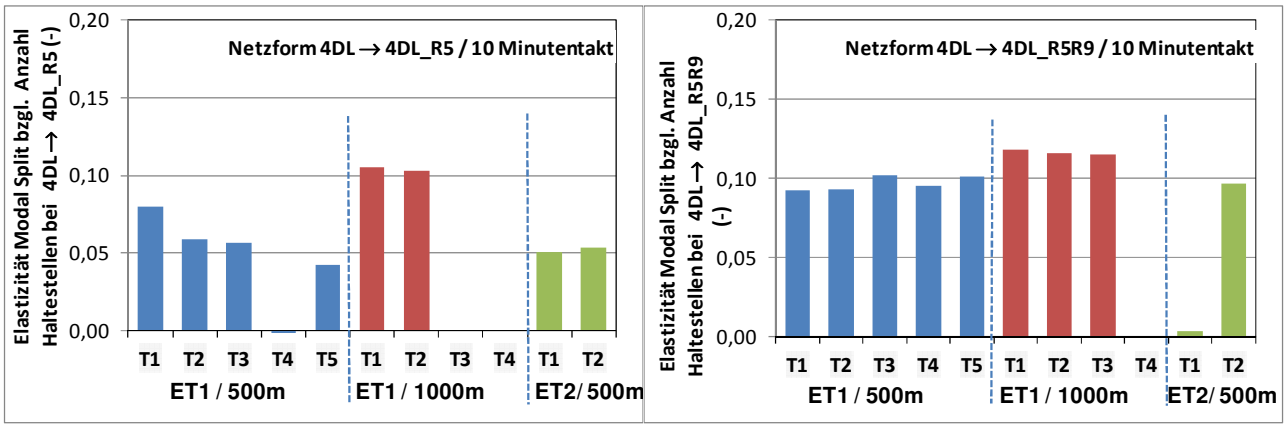
Abbildung 6-20: Elastizitäten des Modal Split bezgl. Netzerweiterung bzw. Anzahl der Haltestellen von 4 auf 8 DL. a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt.

[13] Statt der Anzahl der Haltestellen wurden Elastizitäten auch mit der gesamten Linienlänge der jeweiligen Netzformen berechnet. Diese Werte sind sehr ähnlich zu den hier vorgestellten. Aus diesem Grund wird hier nicht weiter auf diese Berechnungen eingegangen.

Wird dieselbe Betrachtung für den Übergang von 4 Durchmesserlinien auf 4 Durchmesserlinien mit 1 bzw. 2 Tangentiallinien durchgeführt, ergeben sich die Elastizitäten entsprechend Abbildung 6-21 für einen 10 Minutentakt. Die berechneten Werte sind in erster Näherung immer noch für alle Netztypen vergleichbar. Allerdings spielt nunmehr die insbesondere der Haltestellenabstand eine Rolle: Bei einem größeren Haltestellenabstand von 1000 m ist bei einer Erweiterung um eine Tangentiallinie R5 die Elastizität des Modal Splits mit ca. 0,1 etwa doppelt so hoch wie mit 500 m Haltestellenabstand (Elastizität ca. 0,05). Bei der weiteren Erweiterung um die zweite Linie R9 nähern sich wiederum alle Netztypen, Netzformen und Halteständeabstände bezüglich ihrer Elastizitäten an.

Dieselben Empfindlichkeiten zeigen sich für Ausgangsnetze mit 8 Durchmesserlinien, die um eine bis drei Radiallinien erweitert werden. Auch hier ist die Elastizität bei Erweiterung um R5 für Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand etwa doppelt so groß wie für entsprechende Netze mit 500 m mittlerem Haltestellenabstand. Diese Ergebnisse sind zusammen mit entsprechende Werte für einen 20 Minutentakt im Anhang dargestellt.

Zusammenfassend wirkt sich für Netze mit einem mit einem mittleren Haltestellenabstand von 1000 m und ausschließlich Durchmesserlinien die Einführung einer ersten Tangentiallinie R5 bezüglich des Modal Splits wesentlich effektiver aus als die Erweiterung um zusätzliche Durchmesserlinien: Für Netze mit 500 m Haltestellenabstand sind dagegen in beiden Fällen ET1 und ET2 die Elastizitäten sehr ähnlich (ca. 0.05). Würde anstelle einer Radiallinie R5 eine Radiallinie R9 eingeführt, so sind vergleichbare Ergebnisse zu erwarten, da die Werte für den Modal Split annähernd für Liniennetze mit einer Tangentiallinie R5 oder R9 nahezu identisch sind, wie im Ergebnisteil gezeigt wurde.



a) Erweiterung von 4DL auf 4DL_R5 b)Erweiterung von 4DL auf 4DL_R5R9

Abbildung 6-21: Elastizitäten des Modal Split bezüglich einer Netzerweiterung von 4 Durchmesserlinien um 1 oder 2 Tangentiallinien für einen 10 Minutentakt. a) 1 Tangentiallinie R5 und b) 2 Tangentiallinien R5 und R9.

6.5.3 Modal Split und MIV Geschwindigkeitsreduktion

Für Netztyp T3 wurde die MIV Geschwindigkeit im unbelasteten Netz um 25% gegenüber Referenztyp T1 verringert. Die Elastizität des Modal Split-Wertes bezüglich der MIV Geschwindigkeit ist wiederum unterschiedlich für jede Erwerbstätigenverteilung und für die verschiedenen mittleren Haltestellenabstände. Berechnet nach Gleichung 6-1beträgt sie für einen 10 Minutentakt und 500 m Haltestellenabstand: Für Verteilung ET1 nur etwa 0,2 gegenüber annähernd 0,6 für ET2. Für den größeren Haltestellenabstand steigt sie auch für ET1 auf vergleichbaren Wert von 0,53, Abbildung 6-22. Die Balkenlängen sind in Abbildung 6-22 für diese drei Fälle für alle ihre betrachteten Liniennetze recht ähnlich. Damit ist diese Elastizität keine Funktion des Liniennetzes.

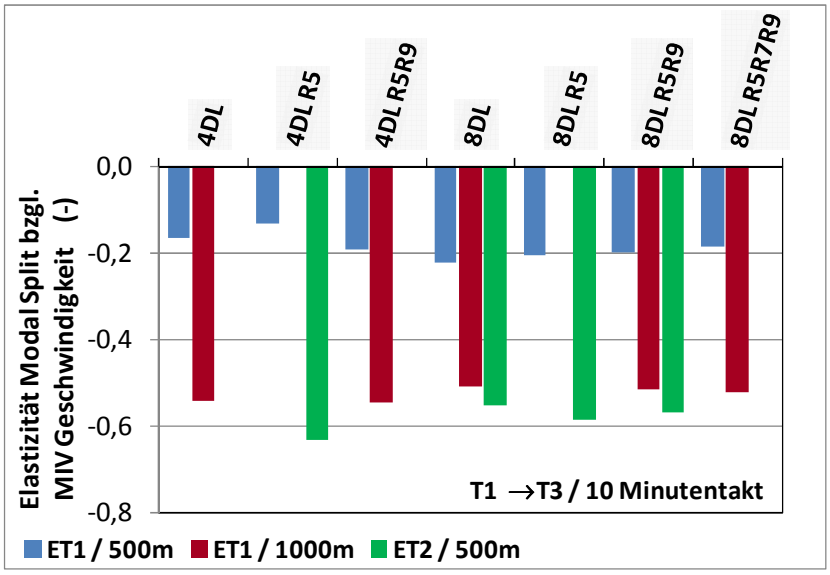


Abbildung 6-22: Elastizitäten des Modal Split bezüglich einer MIV Geschwindigkeitsreduktion von 25%. Verteilungen ET1 und ET2, 500 und 1000 m mittlerer Haltestellenabstand.

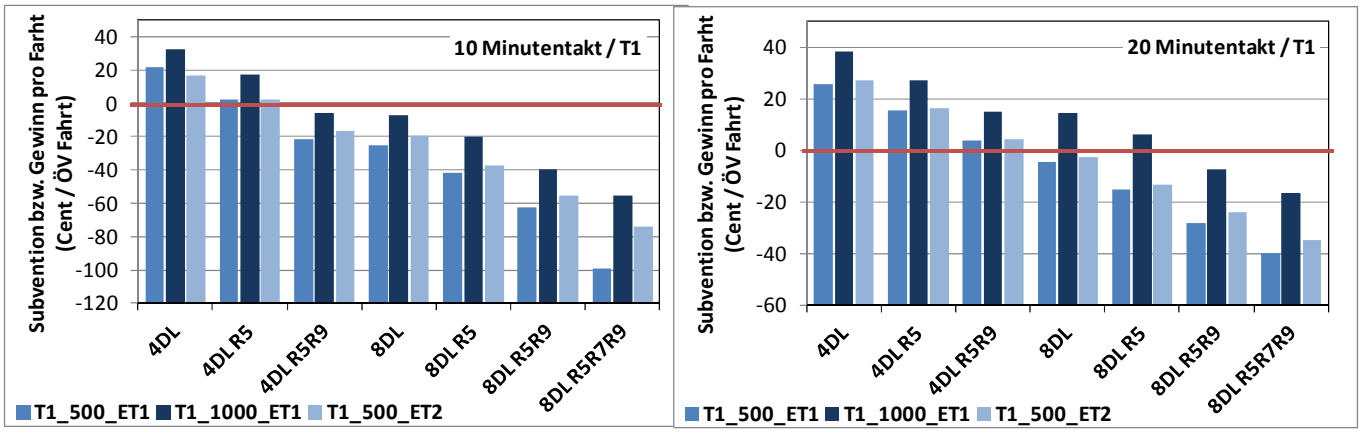
6.6 Subventionen oder Gewinn pro ÖV Fahrt

Statt einer Betrachtung des Betriebsergebnisses kann auch die notwendige Subvention oder der mit einer ÖV Fahrt erzielte Gewinn berechnet werden. Zur Ermittlung wurde aus den Erlösen zunächst der Verlust bzw. Gewinn pro (Gesamtzahl der) Erwerbstätigen berechnet. Dieses Zwischenergebnis geteilt durch die Anzahl der ÖV Fahrten ergibt dann die gesuchte Kenngröße für die dieser Arbeit zugrunde liegende Personengruppe und Wegekette.

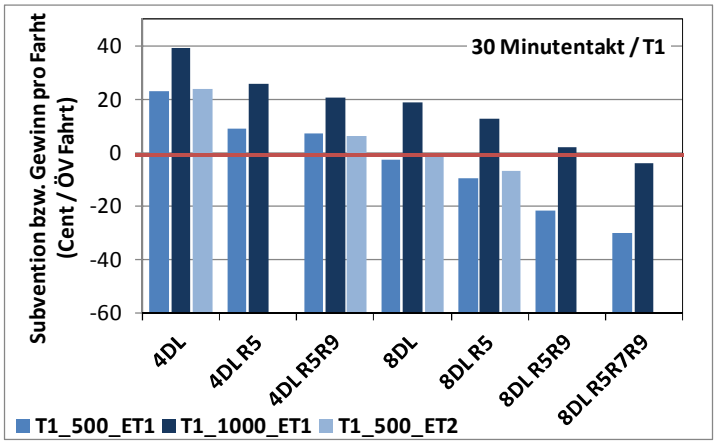
Abbildung 6-23 vergleicht die Ergebnisse für den Referenznetztyp T1 für beide Erwerbstätigenverteilungen und 500 oder 1000 m mittleren Haltestellenabstand, jeweils für einen 10, 20 und 30 Minutentakt. Nicht überraschend erweisen sich die Ergebnisse für den größeren Haltestellenabstand als der Zustand mit dem geringsten Subventionsbedarf pro ÖV Fahrt. Für einen 20 oder 30 Minutentakt ergibt sich abgesehen von den beiden komplexesten Netzen 8DL_R5R9 und 8DL_R5R7R9 durchaus ein vergleichbarer Subventionsbedarf. Somit ist die Taktzeit zwar von Wichtigkeit, aber eine zu lange Fahrzeugfolgezeit verringert den Subventionsbedarf pro Fahrt nicht signifikant. Dagegen können bei einem 10 Minutentakt Subventionen in Höhe von bis zu 100% des durchschnittlichen Erlöses notwendig werden. Ist der Haltestellenabstand größer, verringert sich dieser maximale Subventionsanteil drastisch auf etwa 55%. Dieser Subventionsanteil entspricht ziemlich genau dem Durchschnitt von 51%, der 2012 für Deutschland ermittelt wurde. Laut der Vereinigung deutscher Verkehrsunternehmen (VDV) beträgt der durchschnittliche Erlös pro Fahrt 0,76 € und die durchschnittlichen Kosten aller Fahrten 1,55 € (VDV, 2012).

Einen Vergleich der für die verschiedenen Netztypen notwendigen Subventionen bzw. der gegebenenfalls anfallenden Gewinne zeigt Abbildung 6-24. Alle Werte gelten für die Verteilung ET1 und für einen mittleren Haltestellenabstand von 500 m. Sehr eindeutig kann unter Randbedingungen die den ÖV begünstigen, wie sie Netztyp T5 zugrunde liegen, ein annähernd rundum positives Betriebsergebnis erzielt werden, jedenfalls nach der Definition des Betriebsergebnisses, die dieser Arbeit zugrunde liegt.

Dies gilt für alle hier betrachteten Netzformen im Falle eines 20 Minutentaktes und bis für die komplexeste Netzform auch für den 10 Minutentakt. Bei der Erörterung der Ergebnisse im vorangehenden Kapitel zeigte sich, dass der wichtigste Parameter hierfür eine deutliche Reduktion der Anbindungszeit an eine ÖV Bedienung war, um die höheren ÖV Fahrgastzahlen für diesen Netztyp zu ermöglichen.

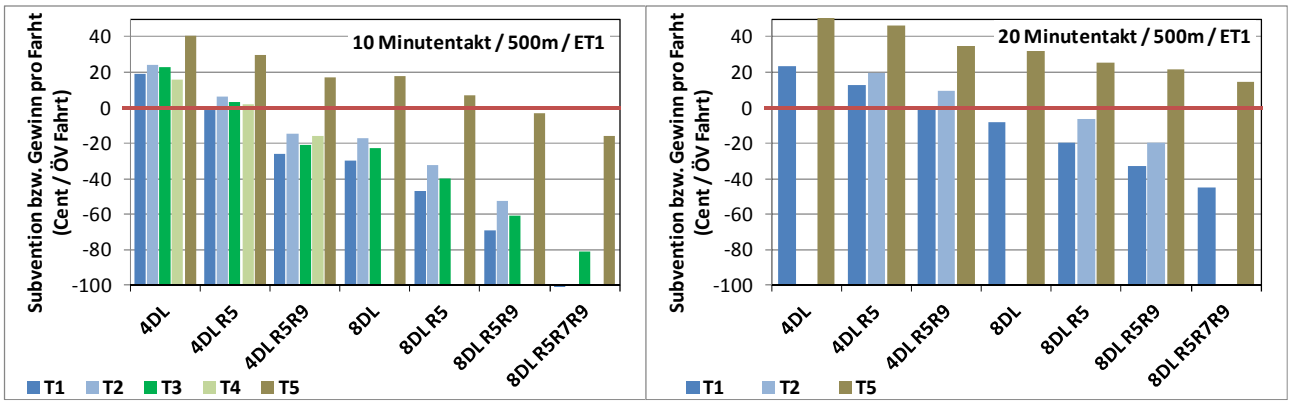


a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt



c) 30 Minutentakt

Abbildung 6-22: Gewinn (>0) bzw. Subvention pro ÖV Fahrt für Verteilung. ET1/ET2 u. Haltestellenabstände. Netztyp T1 für a) 10 b) 20 und c) 30 Minutentakt.



a) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt

Abbildung 6-23: Gewinn (>0) bzw. Subvention pro ÖV Fahrt für verschiedene Netztypen. Verteilung ET1 und 500 m Haltestellenabstand.

7. Zusammenfassung

Diese theoretische Arbeit untersucht die Fragestellung, wie viel öffentlicher Verkehr in einer Modellstadt unter der Annahme finanzierbar ist, dass die Erlöse die Fahrzeugkosten und die variablen Betriebskosten zu decken haben. Der Erlös pro Fahrt wurde mit 0,80 € angenommen, was den gegenwärtigen durchschnittlichen Einnahmen des ÖV in Deutschland entspricht.

Die Modellstadt wurde kreisförmig mit einem Zentrum modelliert. Zwei verschiedene Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilungen und ein ÖV Liniennetz mit maximal 8 Durchmesserlinien und 3 Tangentiallinien um das Zentrum wurden untersucht. Zum Einsatz kommen Busse verschiedener Kapazitäten. Die Nutzenfunktion der Verkehrsumlegung betrachtet nur Reise- und Wartezeiten bzw. Umsteigevorgänge, jedoch nicht Reisekosten.

Bei der Bewertung der Verkehrsnachfrage zeigt sich erwartungsgemäß, dass durch eine Verkürzung der Fahrzeugfolgezeiten von 30 über 20 auf 10 Minuten und in der Hauptverkehrszeit auf 5 Minuten der Modal Split deutlich gesteigert werden kann. Wie im Vergleich zu einem Referenzfall die Nachfrage nach ÖV gesteigert werden kann, wurde anhand verschiedener Netzparametern untersucht: Durch eine Reduktion der MIV Durchschnittsgeschwindigkeiten im unbelasteten Netz um 25% steigt der die ÖV Modal Split um ca. 0.5%. Werden Parksuchzeiten für den MIV im Innenstadtbereich von 5 bis 20 Minuten berücksichtigt, so ist für alle Liniennetze und Fahrzeugfolgezeiten eine Zunahme des ÖV Modal Splits von ca. 1% zu beobachten. Die deutlichste Steigerung konnte jedoch erzielt werden, wenn eine gute Erreichbarkeit der Haltestellen gegeben ist. Hier konnte gegenüber dem Referenzfall teilweise nahezu eine Verdopplung des Modal Split ermittelt werden.

Wird die Zugangszeit zu einer ÖV Haltestelle auf 4 Minuten begrenzt, die MIV Durchschnittsgeschwindigkeit auf 30 km/h auf den Hauptstraßen und auf 22,5 km/h in den Nebenstraßen beschränkt und im Innenstadtbereich Parksuchzeiten modelliert, wird die Forderung nach Deckung der Betriebskosten weitgehend erreicht: Der Betrieb mit einer Fahrzeugfolgezeit von 10 Minuten erfolgt kostendeckend auf Netzen mit 8 Durchmesserlinien und einer Tangentiallinie, bei 20 oder 30 Minuten sogar auf einem Liniennetz mit 8 Durchmesserlinien und 3 Tangentiallinien. Für den Referenzfall, d.h. nur geringe Parksuchzeiten, hohe MIV Geschwindigkeiten von 40 bzw. 30 km/h und Zugangszeiten bis 7 Minuten, ist dagegen ein positives Betriebsergebnis nur für ein reduziertes Liniennetz mit maximal 4 Durchmesserlinien und 1 Tangentiallinie möglich.

Wird das betriebliche Ergebnis oder seine Umrechnung in Gewinn oder Subvention pro Fahrt und Fahrzeugfolgezeit betrachtet zeigt sich, dass eine Reduktion von 10 auf 20 Minuten die kostenmäßig beste Lösung darstellt. Eine weitere Takterweiterung auf 30 Minuten verbessert die betriebswirtschaftlichen Kennzahlen dagegen kaum.

Eine Taktverdichtung auf den Durchmesserlinien während der Hauptverkehrszeit auf 5 Minuten erhöht zwar den Anteil des ÖV gegenüber dem 10 Minutentakt weiter, doch können für untersuchten Netzeinstellungen die zusätzlichen Kosten nur zu maximal 70% gedeckt werden. Aus Kostengesichtspunkten sollten Verkehrsspitzen daher durch größere Fahrzeuge oder zusätzliche Einzelfahrten aufgefangen werden.

Ein wichtiger Parameter bezüglich kosteneffizienter Liniennetze ist der Haltestellenabstand. Eine Reduktion der Haltestellenanzahl verringert die Haltezeit pro Servicefahrt und erhöht die Reisegeschwindigkeit. Im betrachteten Modellnetz erreichte ein mittlerer Haltestellenabstand von 1000 m die höchsten ÖV Verkehrsanteile und damit günstigsten Betriebsergebnisse im Vergleich zu noch größeren Abstand oder 500 m. Der Einfluss des Haltestellenabstands auf das Betriebsergebnis ist für längere Fahrzeugfolgezeiten von 20 oder 30 Minuten stärker als für 10 Minuten.

Die Netzeffizienz kann als Quotient der Umlegungsergebnisse von nachgefragten Personenkilometer zu angebotenen Servicekilometer ausgedrückt werden. Ein Wert von 20 wird als Grenze für die Wirtschaftlichkeit bei einem mittleren Haltestellenabstand von 1000 m berechnet. Für 500 m Abstand erhöht sich dieser Grenzwert auf 23. Die zweite Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzverteilung benötigt einen Quotienten von 25, um wirtschaftlich betrieben zu werden. Bei dieser ist aufgrund der geänderten örtlichen Verteilung von Quellen und Ziele die Nachfrage auf zwei von vier Quadranten der Kreisfläche der Modellstadt konzentriert. Dadurch sind die ÖV Linien in den anderen beiden Quadranten erheblich schwächer ausgelastet, was die gesamte Linieneffizient reduziert und den höheren Grenzwert erklärt.

Für die berechneten Werte des ÖV Modal Split wurden Elastizitäten betrachtet: Bezüglich der Fahrzeugfolgezeit beträgt die Elastizität für eine Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten (betragsmäßig) bis zu -0,9 und für eine Taktverdichtung von 30 auf 10 Minuten (betragsmäßig) bis zu -1,3. Außer für dem Netztyp, für den die sehr hohen Modal Split Werte erzielt wurde (vierter Abschnitt oben), gelten diese Werte unabhängig von der Erwerbstätigenverteilung, dem Haltestellenabstand und dem Liniennetz. Die Elastizität des Modal Split bezüglich der Haltestellendichte ist dagegen vergleichsweise mit 0,1 gering und die Elastizitäten des Modal Split bezüglich einer 25% Reduktion der MIV Geschwindigkeit beträgt -0,6. Diese beiden Elastizitäten sind unabhängig vom ÖV Liniennetz.

8. Literatur

Anderhub, G., Dorbritz, R., Weidmann, U. (200(8): *Leistungsfähigkeitsbestimmung öffentlicher Verkehrssysteme*, Institutsbericht, Schriftenreihe 139, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich.

Bartosch, R. (2007): *Augsburg - Modellstadt für Erdgasfahrzeuge: Stand der Umsetzung*. Vortrag Grazer Energieagentur, 2. Oktober 2007. http://www.grazer-ea.at/cms/upload/geg/v2/20071002_gasbetriebene_fahrzeuge_bartosch.pdf

Daganzo, C. (2010: *Structure of competitive transit networks*, Transportation Research Part B 44, S. 434–446

Dmochowski, F. (2012): Rhein-Neckar-Verkehr GmbH, persönliche Kommunikation

Dmochowski, F. (2013): Rhein-Neckar GmbH, persönliche Kommunikation

Frank, P., Friedrich, M., Schlaich, J. (2008): *Betriebskosten von Busverkehren schnell und genau ermitteln*, Der Nahverkehr, Heft 11, Alba Fachverlag, Düsseldorf

Friedrich, M. (2012): Skriptum zur Vorlesung *Verkehrsnachfragemodellierung*, DAS Verkehrsingenieurwesen, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Friedrich, M. (2013): Vorlesungsunterlagen *Verkehrsaufkommen in Neubaugebieten*, Universität Stuttgart, Institut für Straßen- und Verkehrswesen

Justen, Andreas (2006) *Aufbau eines Personenverkehrsmodells für Berlin unter Berücksichtigung aktueller Tendenzen im Mobilitätsverhalten.* Diplomarbeit, HU Berlin, TU Berlin

PTV AG (2012): *VISUM 12.5 – Benutzerhandbuch*, PTV AG, Karlsruhe, Stand 28. Juni 2012

Tahmasseby, S. van Nes, R., Bovy, P.H.L. (2008): *Public Transport Network Design addressing Service Reliability*, Delft University of Technology

Vallée, D. (2010): *Bus oder Bahn – Konzepte und Chancen zur Lösung urbaner Verkehrs- und Umweltprobleme*, IFS Kolloquium am 14. Dezember 2010, RWTH Aachen, Institut für Schienenfahrzeuge und Fördertechnik

Van Nes, R. (2002): *Design of multimodal transport networks - A hierarchical approach*, TRAIL-Thesis Series T2002/5, The Netherlands TRAIL Research School, Delft University Press, ISBN: 90-407-2314-1.

VDV (2012): *Statistik des öffentlichen Verkehrs in Deutschland für 2012*; Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, www.vdv.de/schriften---veröffentlichungen.aspx, Dokument: Statistik-2012.pdf

Vuchic, V. (2005): *Urban Transit: Operations, Planning and Economics*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Weidmann, U. (2012): Skriptum zur Vorlesung *Entwurf und Betrieb öffentlicher Verkehrssysteme*, DAS Verkehrsingenieurwesen, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, ETH Zürich.

9. Anhang

9.1 Kapitel 4 – Strukturdaten und Kostenrechnung

9.1.1 Berechnung der Fahrzeugkosten

Annahmen:

- Förderung bei Anschaffung: keine
- Zinssatz für 10 Jahre Abschreibungszeitraum: 5%
- Betriebstage / Jahr : 320
- Berechnung Kapitaldienst pro Jahr: $= \frac{K \times (1+Z))^N \times Z}{(1+Z)^N - 1} + R \times Z$
  - K = Kreditkosten = Fahrzeugkosten – Restwert R nach 10 Jahren
  - Z = Zinssatz
  - N = Nutzungsdauer in Jahren, hier 10 Jahre

Berechnung der Fahrzeugkosten pro Tag:

Fahrzeug		Standardbus	Gelenkbus
Fahrzeuganschaffungskosten	€	280.000	380.000
Nutzungsdauer	Jahre	10	10
Kreditkosten Betreiber	€	252.000	352.000
Restwert nach 10 Jahren	€	28.000	38.000
Kapitaldienst	€/Jahr	34.035	47.486
Fixkosten (Versicherung etc.)	€	2.500	3.000
Reservefahrzeuge	%	15%	15%
Gesamtfixkosten Fzg	€/Jahr	42.015	58.058
Gesamtfixkosten Fzg incl. Re	€/Tag	**131,3**	**181,4**
Gesamtkosten Fzg inkl.weiterer Nebenkosten	€/Tag	**150**	**200**

in Modellierung verwendet

9.1.2 Berechnung variabler Kosten

Annahmen:

- Ein- und Aussetzweite pro Fahrzeugumlauf: 14km (7 km einfache Fahrt)
- Ein- und Aussetzzeit pro Fahrzeugumlauf: 1 Stunde
- Faktor zur Berücksichtigung von Pausen und Wendezeiten: 17%

9.1.3 Bezirke der Modellstadt

Bezirk Nr.	Code	Name	Stadt außen	EW	ET	ZP	EW/ha	AP/ha	Beschreibung
1	Z_1	B_Zentrum_Ring1		6.283,2	3.455,8	45.000,0	20	200	Kerngebiet Innenstadt
2	A_0	B_A_0	40.000,0	30.000,0	16.500,0	11.550,0			außen liegende Gemeinde
3	A_90	B_A_90	20.000,0	15.000,0	8.250,0	5.775,0			außen liegende Gemeinde
4	A_180	B_A_180	20.000,0	15.000,0	8.250,0	5.775,0			außen liegende Gemeinde
5	R4_11	B_11_R4		343,6	189,0	6.013,2	10	175	Gewerbegebiet
6	R5_11	B_11_R5		4.417,9	2.429,8	662,7	100	15	allgemeines Wohngebiet
7	R6_11	B_11_R6		3.779,7	2.078,9	809,9	70	15	allgemeines Wohngebiet
8	R7_11	B_11_R7		4.467,0	2.456,8	191,4	70	3	reines Wohngebiet
9	R8_11	B_11_R8		2.945,2	1.619,9	294,5	40	4	reines Wohngebiet
10	R9_11	B_11_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet
11	R10_11	B_11_R10		1.865,3	1.025,9	93,3	20	1	reines Wohngebiet
12	R4_33	B_33_R4		2.748,9	1.511,9	1.030,8	80	30	Mischgebiet
13	R5_33	B_33_R5		3.534,3	1.943,9	1.325,4	80	30	Mischgebiet
14	R6_33	B_33_R6		4.319,7	2.375,8	1.619,9	80	30	Mischgebiet
15	R7_33	B_33_R7		4.467,0	2.456,8	191,4	70	3	reines Wohngebiet
16	R8_33	B_33_R8		7.363,1	4.049,7	736,3	100	10	allgemeines Wohngebiet
17	R9_33	B_33_R9		834,5	459,0	12.517,3	10	150	Gewerbegebiet
18	R10_33	B_33_R10		932,7	513,0	13.989,9	10	150	Gewerbegebiet
19	R4_56	B_56_R4		343,6	189,0	5.154,2	10	150	Dienstleistung/Industrie
20	R5_56	B_56_R5		3.092,5	1.700,9	132,5	70	3	reines Wohngebiet
21	R6_56	B_56_R6		3.779,7	2.078,9	162,0	70	3	reines Wohngebiet
22	R7_56	B_56_R7		5.105,1	2.807,8	1.914,4	80	30	Mischgebiet
23	R8_56	B_56_R8		5.890,5	3.239,8	2.208,9	80	30	Mischgebiet
24	R9_56	B_56_R9		6.675,9	3.671,7	2.503,5	80	30	Mischgebiet
25	R10_56	B_56_R10		3.730,6	2.051,9	373,1	40	4	reines Wohngebiet
26	R4_78	B_78_R4		343,6	189,0	5.154,2	10	150	Gewerbegebiet
27	R5_78	B_78_R5		4.417,9	2.429,8	441,8	100	10	allgemeines Wohngebiet
28	R6_78	B_78_R6		3.779,7	2.078,9	540,0	70	10	allgemeines Wohngebiet
29	R7_78	B_78_R7		4.467,0	2.456,8	191,4	70	3	reines Wohngebiet
30	R8_78	B_78_R8		2.945,2	1.619,9	294,5	40	4	reines Wohngebiet
31	R9_78	B_78_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet
32	R10_78	B_78_R10		3.730,6	2.051,9	373,1	40	4	reines Wohngebiet
33	A_270	B_A_270	20.000,0	15.000,0	8.250,0	5.775,0			außen liegende Gemeinde
34	A_45	B_A_45	10.000,0	6.000,0	3.300,0	2.310,0			außen liegende Gemeinde
35	A_135	B_A_135	10.000,0	6.000,0	3.300,0	2.310,0			außen liegende Gemeinde
36	A_225	B_A_225	10.000,0	6.000,0	3.300,0	2.310,0			außen liegende Gemeinde
37	R4_101	B_101_R4		343,6	189,0	6.013,2	10	175	Gewerbegebiet
38	R5_101	B_101_R5		4.417,9	2.429,8	662,7	100	15	allgemeines Wohngebiet
39	R6_101	B_101_R6		3.779,7	2.078,9	809,9	70	15	allgemeines Wohngebiet
40	R7_101	B_101_R7		4.467,0	2.456,8	191,4	70	3	reines Wohngebiet
41	R8_101	B_101_R8		2.945,2	1.619,9	294,5	40	4	reines Wohngebiet
42	R9_101	B_101_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet
43	R10_101	B_101_R10		1.865,3	1.025,9	93,3	20	1	reines Wohngebiet
44	R4_124	B_124_R4		2.748,9	1.511,9	1.030,8	80	30	Mischgebiet
45	R5_124	B_124_R5		3.534,3	1.943,9	1.325,4	80	30	Mischgebiet
46	R6_124	B_124_R6		4.319,7	2.375,8	1.619,9	80	30	Mischgebiet
47	R7_124	B_124_R7		4.467,0	2.456,8	191,4	70	3	reines Wohngebiet
48	R8_124	B_124_R8		7.363,1	4.049,7	736,3	100	10	allgemeines Wohngebiet
49	R9_124	B_124_R9		834,5	459,0	12.517,3	10	150	Gewerbegebiet
50	R10_124	B_124_R10		932,7	513,0	13.989,9	10	150	Gewerbegebiet
51	R4_146	B_146_R4		343,6	189,0	5.154,2	10	150	Dienstleistung/Industrie
52	R5_146	B_146_R5		3.092,5	1.700,9	132,5	70	3	reines Wohngebiet
53	R6_146	B_146_R6		3.779,7	2.078,9	162,0	70	3	reines Wohngebiet
54	R7_146	B_146_R7		5.105,1	2.807,8	1.914,4	80	30	Mischgebiet
55	R8_146	B_146_R8		5.890,5	3.239,8	2.208,9	80	30	Mischgebiet
56	R9_146	B_146_R9		6.675,9	3.671,7	2.503,5	80	30	Mischgebiet
57	R10_146	B_146_R10		3.730,6	2.051,9	373,1	40	4	reines Wohngebiet
58	R4_169	B_169_R4		343,6	189,0	5.154,2	10	150	Gewerbegebiet
59	R5_169	B_169_R5		4.417,9	2.429,8	441,8	100	10	allgemeines Wohngebiet
60	R6_169	B_169_R6		3.779,7	2.078,9	540,0	70	10	allgemeines Wohngebiet

Bezirk Nr.	Code	Name	Stadt außen	EW	ET
61	R7_169	B_169_R7		4.467,0	2.456,8
62	R8_169	B_169_R8		2.945,2	1.619,9
63	R9_169	B_169_R9		1.669,0	917,9
64	R10_169	B_169_R10		3.730,6	2.051,9
65	R4_191	B_191_R4		343,6	189,0
66	R5_191	B_191_R5		4.417,9	2.429,8
67	R6_191	B_191_R6		3.779,7	2.078,9
68	R7_191	B_191_R7		4.467,0	2.456,8
69	R8_191	B_191_R8		2.945,2	1.619,9
70	R9_191	B_191_R9		1.669,0	917,9
71	R10_191	B_191_R10		1.865,3	1.025,9
72	R4_214	B_214_R4		2.748,9	1.511,9
73	R5_214	B_214_R5		3.534,3	1.943,9
74	R6_214	B_214_R6		4.319,7	2.375,8
75	R7_214	B_214_R7		4.467,0	2.456,8
76	R8_214	B_214_R8		7.363,1	4.049,7
77	R9_214	B_214_R9		834,5	459,0
78	R10_214	B_214_R10		932,7	513,0
79	R4_237	B_237_R4		343,6	189,0
80	R5_237	B_237_R5		3.092,5	1.700,9
81	R6_237	B_237_R6		3.779,7	2.078,9
82	R7_237	B_237_R7		5.105,1	2.807,8
83	R8_237	B_237_R8		5.890,5	3.239,8
84	R9_237	B_237_R9		6.675,9	3.671,7
85	R10_237	B_237_R10		3.730,6	2.051,9
86	R4_259	B_259_R4		343,6	189,0
87	R5_259	B_259_R5		4.417,9	2.429,8
88	R6_259	B_259_R6		3.779,7	2.078,9
89	R7_259	B_259_R7		4.467,0	2.456,8
90	R8_259	B_259_R8		2.945,2	1.619,9
91	R9_259	B_259_R9		1.669,0	917,9
92	R10_259	B_259_R10		3.730,6	2.051,9
93	R4_281	B_281_R4		343,6	189,0
94	R5_281	B_281_R5		4.417,9	2.429,8
95	R6_281	B_281_R6		3.779,7	2.078,9
96	R7_281	B_281_R7		4.467,0	2.456,8
97	R8_281	B_281_R8		2.945,2	1.619,9
98	R9_281	B_281_R9		1.669,0	917,9
99	R10_281	B_281_R10		1.865,3	1.025,9
100	R4_304	B_304_R4		2.748,9	1.511,9
101	R5_304	B_304_R5		3.534,3	1.943,9
102	R6_304	B_304_R6		4.319,7	2.375,8
103	R7_304	B_304_R7		4.467,0	2.456,8
104	R8_304	B_304_R8		7.363,1	4.049,7
105	R9_304	B_304_R9		834,5	459,0
106	R10_304	B_304_R10		932,7	513,0
107	R4_326	B_326_R4		343,6	189,0
108	R5_326	B_326_R5		3.092,5	1.700,9
109	R6_326	B_326_R6		3.779,7	2.078,9
110	R7_326	B_326_R7		5.105,1	2.807,8
111	R8_326	B_326_R8		5.890,5	3.239,8
112	R9_326	B_326_R9		6.675,9	3.671,7
113	R10_326	B_326_R10		3.730,6	2.051,9
114	R4_349	B_349_R4		343,6	189,0
115	R5_349	B_349_R5		4.417,9	2.429,8
116	R6_349	B_349_R6		3.779,7	2.078,9
117	R7_349	B_349_R7		4.467,0	2.456,8
118	R8_349	B_349_R8		2.945,2	1.619,9
119	R9_349	B_349_R9		1.669,0	917,9
120	R10_349	B_349_R10		3.730,6	2.051,9
121	A_135	B_A_135	10.000,0	6.000,0	3.300,0

a) Werte für Verteilung ET1

Tabelle A-1a: Bezirke mit Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzanzahl bzw. Einwohner- und Arbeitsplatzdichten.

Bezirk Nr.	Code	Name	Stadt außen	EW	ET	ZP	EW/ha	AP/ha	Beschreibung	Bezirk Nr.	Code	Name	Stadt außen	EW	ET
1	Z_1	B_Zentrum_Ring1		6.283,2	3.455,8	35.000,0	20	200	Kerngebiet Innenstadt	62	R8_169	B_169_R8		2.945,2	1.619,9
2	A_0	B_A_0	40.000,0	30.000,0	16.500,0	4.950,0			Außengemeinde	63	R9_169	B_169_R9		1.669,0	917,9
3	A_90	B_A_90	20.000,0	15.000,0	8.250,0	2.475,0			Außengemeinde	64	R10_169	B_169_R10		1.865,3	1.025,9
4	A_180	B_A_180	20.000,0	15.000,0	8.250,0	2.475,0			Außengemeinde	65	R4_191	B_191_R4		5.154,2	2.834,8
5	R4_11	B_11_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	66	R5_191	B_191_R5		6.626,8	3.644,7
6	R5_11	B_11_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	67	R6_191	B_191_R6		8.099,4	4.454,7
7	R6_11	B_11_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	68	R7_191	B_191_R7		9.572,0	5.264,6
8	R7_11	B_11_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet	69	R8_191	B_191_R8		368,2	202,5
9	R8_11	B_11_R8		73,6	40,5	7.363,1	1	100	Gewerbegebiet	70	R9_191	B_191_R9		417,2	229,5
10	R9_11	B_11_R9		83,4	45,9	8.344,9	1	100	Gewerbegebiet	71	R10_191	B_191_R10		466,3	256,5
11	R10_11	B_11_R10		93,3	51,3	9.326,6	1	100	Gewerbegebiet	72	R4_214	B_214_R4		5.154,2	2.834,8
12	R4_33	B_33_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	73	R5_214	B_214_R5		6.626,8	3.644,7
13	R5_33	B_33_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	74	R6_214	B_214_R6		8.099,4	4.454,7
14	R6_33	B_33_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	75	R7_214	B_214_R7		2.552,5	1.403,9
15	R7_33	B_33_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet	76	R8_214	B_214_R8		73,6	40,5
16	R8_33	B_33_R8		73,6	40,5	7.363,1	1	100	Gewerbegebiet	77	R9_214	B_214_R9		83,4	45,9
17	R9_33	B_33_R9		83,4	45,9	8.344,9	1	100	Gewerbegebiet	78	R10_214	B_214_R10		93,3	51,3
18	R10_33	B_33_R10		93,3	51,3	9.326,6	1	100	Gewerbegebiet	79	R4_237	B_237_R4		5.154,2	2.834,8
19	R4_56	B_56_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	80	R5_237	B_237_R5		6.626,8	3.644,7
20	R5_56	B_56_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	81	R6_237	B_237_R6		8.099,4	4.454,7
21	R6_56	B_56_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	82	R7_237	B_237_R7		9.572,0	5.264,6
22	R7_56	B_56_R7		9.572,0	5.264,6	191,4	150	3	reines Wohngebiet	83	R8_237	B_237_R8		368,2	202,5
23	R8_56	B_56_R8		368,2	202,5	7.363,1	5	100	Gewerbegebiet	84	R9_237	B_237_R9		417,2	229,5
24	R9_56	B_56_R9		417,2	229,5	8.344,9	5	100	Gewerbegebiet	85	R10_237	B_237_R10		466,3	256,5
25	R10_56	B_56_R10		466,3	256,5	9.326,6	5	100	Gewerbegebiet	86	R4_259	B_259_R4		5.154,2	2.834,8
26	R4_78	B_78_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	87	R5_259	B_259_R5		6.626,8	3.644,7
27	R5_78	B_78_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	88	R6_259	B_259_R6		8.099,4	4.454,7
28	R6_78	B_78_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	89	R7_259	B_259_R7		9.572,0	5.264,6
29	R7_78	B_78_R7		9.572,0	5.264,6	191,4	150	3	reines Wohngebiet	90	R8_259	B_259_R8		73,6	40,5
30	R8_78	B_78_R8		73,6	40,5	7.363,1	1	100	Gewerbegebiet	91	R9_259	B_259_R9		83,4	45,9
31	R9_78	B_78_R9		83,4	45,9	8.344,9	1	100	Gewerbegebiet	92	R10_259	B_259_R10		93,3	51,3
32	R10_78	B_78_R10		93,3	51,3	9.326,6	1	100	Gewerbegebiet	93	R4_281	B_281_R4		343,6	189,0
33	A_270	B_A_270	20.000,0	15.000,0	8.250,0	2.475,0			Außengemeinde	94	R5_281	B_281_R5		2.208,9	1.214,9
34	A_45	B_A_45	10.000,0	6.000,0	3.300,0	990,0			Außengemeinde	95	R6_281	B_281_R6		2.699,8	1.484,9
35	A_135	B_A_135	10.000,0	6.000,0	3.300,0	990,0			Außengemeinde	96	R7_281	B_281_R7		4.467,0	2.456,8
36	A_225	B_A_225	10.000,0	6.000,0	3.300,0	990,0			Außengemeinde	97	R8_281	B_281_R8		3.681,6	2.024,9
37	R4_101	B_101_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	98	R9_281	B_281_R9		4.172,4	2.294,8
38	R5_101	B_101_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	99	R10_281	B_281_R10		4.663,3	2.564,8
39	R6_101	B_101_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	100	R4_304	B_304_R4		2.748,9	1.511,9
40	R7_101	B_101_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet	101	R5_304	B_304_R5		3.534,3	1.943,9
41	R8_101	B_101_R8		2.945,2	1.619,9	220,9	40	3	reines Wohngebiet	102	R6_304	B_304_R6		4.319,7	2.375,8
42	R9_101	B_101_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet	103	R7_304	B_304_R7		3.190,7	1.754,9
43	R10_101	B_101_R10		1.865,3	1.025,9	93,3	20	1	reines Wohngebiet	104	R8_304	B_304_R8		3.681,6	2.024,9
44	R4_124	B_124_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	105	R9_304	B_304_R9		0,0	0,0
45	R5_124	B_124_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	106	R10_304	B_304_R10		0,0	0,0
46	R6_124	B_124_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	107	R4_326	B_326_R4		0,0	0,0
47	R7_124	B_124_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet	108	R5_326	B_326_R5		3.092,5	1.700,9
48	R8_124	B_124_R8		2.945,2	1.619,9	220,9	40	3	reines Wohngebiet	109	R6_326	B_326_R6		3.779,7	2.078,9
49	R9_124	B_124_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet	110	R7_326	B_326_R7		5.105,1	2.807,8
50	R10_124	B_124_R10		1.865,3	1.025,9	93,3	20	1	reines Wohngebiet	111	R8_326	B_326_R8		5.890,5	3.239,8
51	R4_146	B_146_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	112	R9_326	B_326_R9		6.675,9	3.671,7
52	R5_146	B_146_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	113	R10_326	B_326_R10		3.730,6	2.051,9
53	R6_146	B_146_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	114	R4_349	B_349_R4		687,2	378,0
54	R7_146	B_146_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet	115	R5_349	B_349_R5		2.208,9	1.214,9
55	R8_146	B_146_R8		2.945,2	1.619,9	220,9	40	3	reines Wohngebiet	116	R6_349	B_349_R6		2.699,8	1.484,9
56	R9_146	B_146_R9		1.669,0	917,9	83,4	20	1	reines Wohngebiet	117	R7_349	B_349_R7		3.190,7	1.754,9
57	R10_146	B_146_R10		1.865,3	1.025,9	93,3	20	1	reines Wohngebiet	118	R8_349	B_349_R8		3.681,6	2.024,9
58	R4_169	B_169_R4		5.154,2	2.834,8	171,8	150	5	reines Wohngebiet	119	R9_349	B_349_R9		4.172,4	2.294,8
59	R5_169	B_169_R5		6.626,8	3.644,7	220,9	150	5	reines Wohngebiet	120	R10_349	B_349_R10		4.663,3	2.564,8
60	R6_169	B_169_R6		8.099,4	4.454,7	270,0	150	5	reines Wohngebiet	121	A_135	B_A_135	10.000,0	6.000,0	3.300,0
61	R7_169	B_169_R7		2.552,5	1.403,9	191,4	40	3	reines Wohngebiet						

b) Werte für Verteilung ET2

Tabelle A-1b: Bezirke mit Erwerbstätigen- und Arbeitsplatzanzahl bzw. Einwohner- und Arbeitsplatzdichten.

9.2 Kapitel 5 - Ergebnisse

9.2.1 Kapitel 5.2 - ÖV Systeme mit 500 m mittleren Haltestellenabstand

Netz	T1				T2		T3		T4		T5			
Takt >	5 / 10	10	20	30	10	20	5 / 10	10	5 / 10	10	5 / 10	10	20	30
2DL	9,4%	8,0%	6,2%	5,2%										
4DL	12,2%	9,9%	6,8%	5,0%	11,1%		13,7%	10,3%	15,2%	11,6%	14,3%	17,6%	13,7%	
4DL R4	12,2%	10,2%	7,2%	5,5%	11,3%	8,1%	13,8%	10,5%	15,3%	10,5%	14,4%	17,8%	14,2%	
4DL R4R9	12,5%	10,6%	7,6%	5,8%	11,9%	8,5%		11,1%	15,6%	12,4%	14,7%	18,9%	15,1%	
8DL		10,2%	7,0%	5,3%	11,4%			10,8%		12,1%	14,4%	18,3%	14,4%	
8DL R5		10,5%	7,3%	5,6%	11,7%	8,3%		11,0%				18,5%	14,7%	12,2%
8DL R4R9		11,0%	7,7%	5,9%	12,2%	8,7%		11,5%		12,9%		19,6%	15,6%	
8DL R4R7R9		11,2%	8,1%	6,3%				11,7%			15,2%	19,9%	16,0%	13,3%
Mittelwert		10,2%	7,2%	5,6%	11,6%	8,4%	13,8%	11,0%	15,4%	11,9%	14,6%	18,6%	14,8%	12,7%

Tabelle A-2: Modal Split des ÖV für untersuchte Netztypen, 500 m mittleren Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

mittlerer Haltest.-abstand	Netzform	Zunahme der Einnahmen Kosten (€)	T5 (€)	T3 (€)	T1 (€)	zus. Einahmen / Kosten T5 (-)	T3 (-)	T1 (-)
500m	4DL	17.461	- 9.518	13.002	9.315	- 0,55	0,74	0,53
	4DL_R5		- 11.778	12.621	8.841	- 0,67	0,72	0,51
	4DL_R5R9		- 16.003		7.446	- 0,92		0,43
1000m	4DL	14.678			7.572			0,52
	4DL_R5				6.637			0,45
	4DL_R5R9				6.018			0,41

Tabelle A-3: Zunahmen der Kosten und Einnahmen bei einer Taktverdichtung in der HVZ auf 5 Minuten für die Durchmesserlinien. 500 m und 1000 m mittlere Haltestellenabstände und Verteilung ET1.

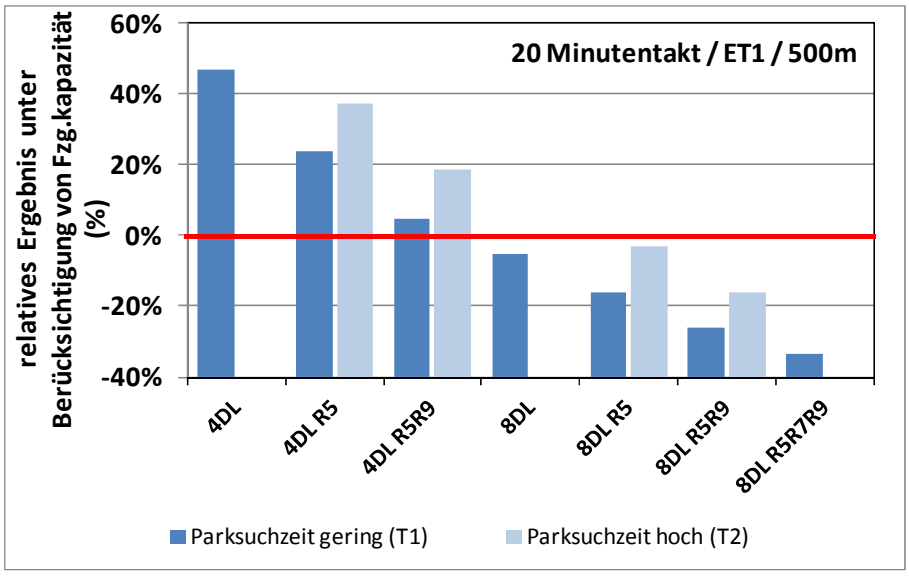


Abbildung A-1: Einfluss verlängerter Parksuchzeiten für Netztyp T2 gegenüber T1 und einen 20 Minutentakt. 500m mittlerem Haltestellenabstand, Verteilung ET1.

9.2.2 Kapitel 5.3 - ÖV Systeme mit 1000m mittleren Haltestellenabstand

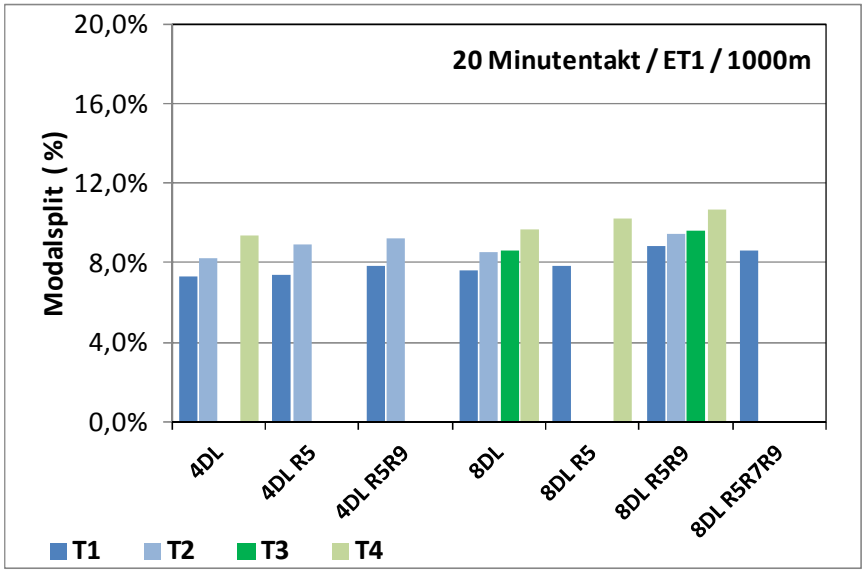


Abbildung A-2: Modal Split für 20 Minutentakt für die Netztypen T1, T2, T3 und T4 für ÖV Liniennetze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Netz	T1				T2		T3		T4	
Takt >	5 / 10	10	20	30	10	20	10	20	10	20
2DL	9,7%	8,4%	6,5%	5,6%						
4DL	12,3%	10,4%	7,3%	5,5%	11,6%	8,2%	11,8%		13,1%	9,4%
4DL R5	12,3%	10,7%	7,4%	5,6%	12,0%	8,9%				
4DL R5R9	12,6%	11,2%	7,8%	6,0%	12,5%	9,2%	12,7%		14,1%	
8DL		10,7%	7,6%	5,8%	11,9%	8,5%	12,1%	8,6%	13,4%	9,7%
8DL R5		11,0%	7,8%	6,2%	12,3%				13,9%	10,2%
8DL R5R9		11,5%	8,8%	6,5%	12,8%	9,4%	13,0%	9,6%	14,4%	10,7%
8DL R5R7R9		11,8%	8,6%	6,9%	13,1%		13,3%		14,7%	
Mittelwert		11,0%	7,9%	6,1%	12,3%	8,9%	12,6%	9,1%	13,9%	10,0%

Tabelle A-4: Werte für Modal Split für den ÖV. Netztypen T1 bis T4 mit 1000 m mittleren Haltestellenabstand und Verteilung ET1.

Netz	T1				T2		T3		T4	
Takt >	5 / 10	10	20	30	10	20	10	20	10	20
2DL	26%	65%	85%							
4DL	15%	61%	85%	89%	61%	103%	71%		81%	130%
4DL R5	-4%	22%	45%	42%	38%	76%				
4DL R5R9	-23%	-11%	18%	29%	0%	34%	1%		13%	
8DL		-12%	17%	25%	-1%	31%	-1%	30%	11%	48%
8DL R5		-23%	3%	14%	-13%				-3%	35%
8DL R5R9		-36%	-12%	-2%	-28%	2%	-28%	3%	-19%	14%
8DL R5R7R9		-43%	-21%	-9%	-37%		-36%		-29%	

Tabelle A-5: Relative Betriebsergebnisse für ÖV Netze mit 1000 m mittlerem Haltestellenabstand. Gelb unterlegt sind Netze, die mit Gelenkbusse betrieben werden. Verteilung ET1.

Netztyp →	T2 - 1000m		T2 - 1000plus		T2 - 500m	
Takt →	10	20	10	20	10	20
2DL						
4DL	67%	111%			49%	
4DL R5	45%	83%			13%	37%
4DL R5R9	5%	40%	-7,3%		-12%	19%
8DL	3%	37%	-21,5%	3,9%	-14%	
8DL R5	-10%				-26%	-3%
8DL R5R9	-25%	7%	-35,4%		-37%	-16%
8DL R5R7R9	-34%					

Tabelle A-6: Relativen Ergebnisse für verschiedene mittlere Haltestellenabstände 500 m, 1000 m und „1000 m plus“.

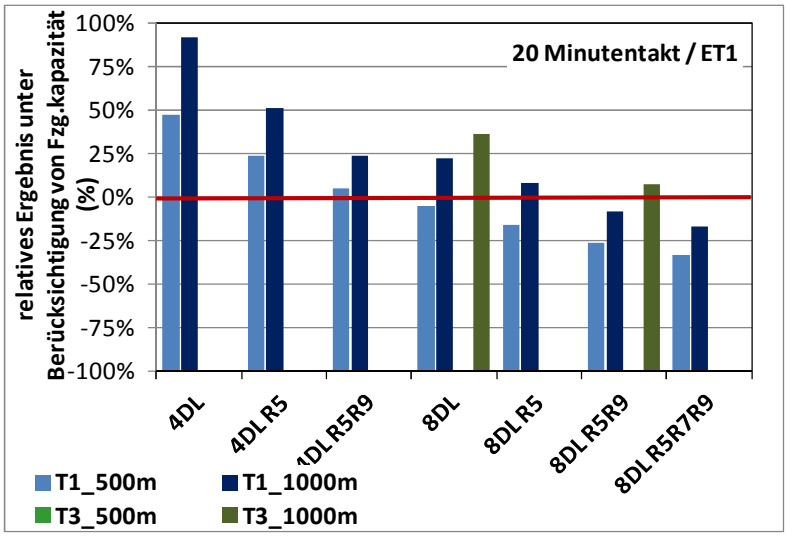


Abbildung A-3: Relative Betriebsergebnisse für Netztypen T1 und T3, jeweils mit 500 m und 1000 m mittlerem Haltestellenabstand, 20 Minutentakt, Verteilung ET1.

9.2.3 Kapitel 5-4 - Einfluss der Verteilung der Erwerbstätigen und Arbeitsplätze

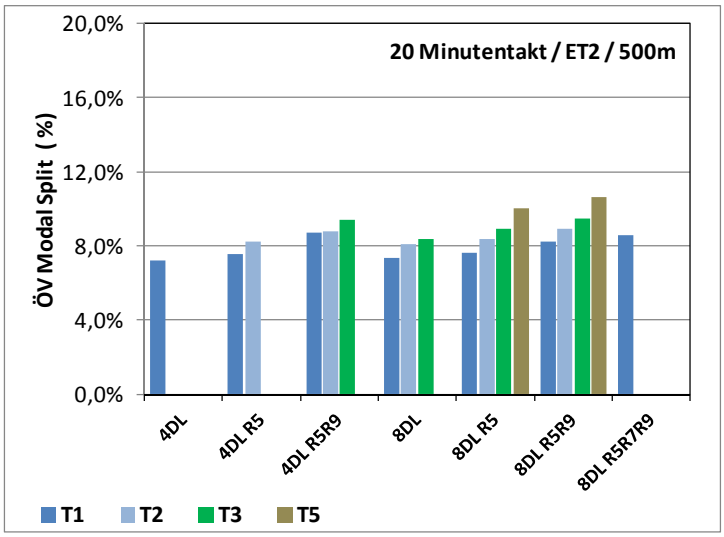


Abbildung A-4: ÖV Modal Split für Netztypen T1, T2, T3, und T5.
500 m mittlerer Haltestellenabstand, 20 Minutentakt und Verteilung ET2.

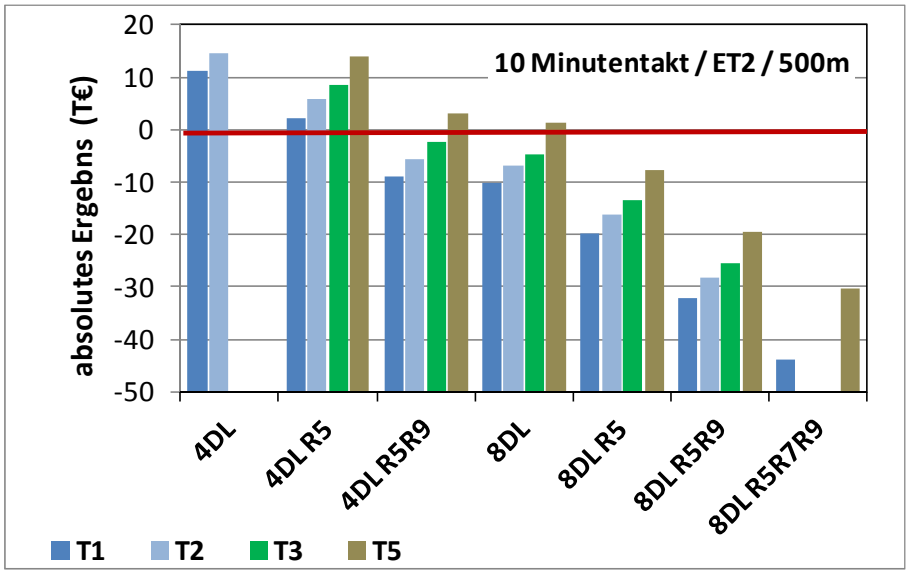


Abbildung A-5: Absolutes Ergebnis für Netztypen T1, T2, T3, und T5.
500 m mittlerer Haltestellenabstand, 10 Minutentakt und Verteilung ET2.

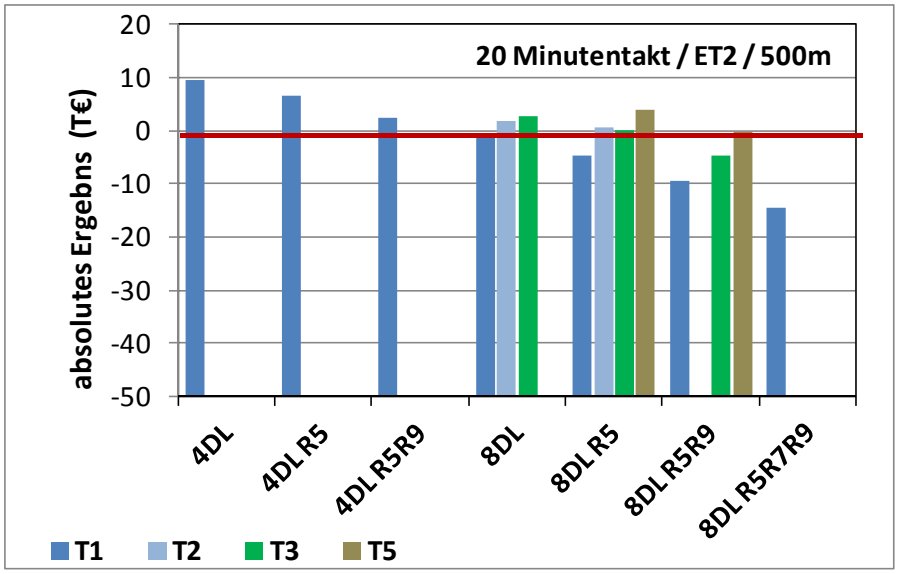


Abbildung A-6: Absolutes Ergebnis für Netztypen T1, T2, T3, und T5.
500 m mittlerer Haltestellenabstand, 20 Minutentakt und Verteilung ET2.

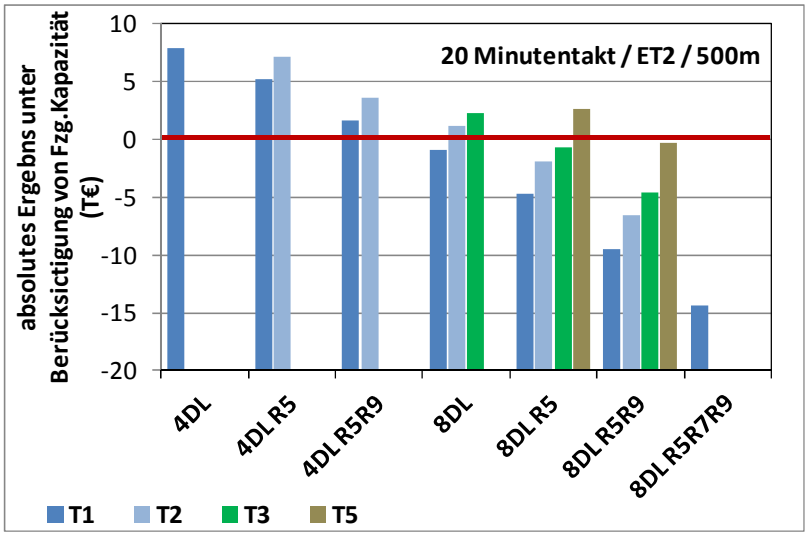


Abbildung A-7: Relatives Ergebnis für Netztypen T1, T2, T3, und T5.
500 m mittlerer Haltestellenabstand, 20 Minutentakt und Verteilung ET2.

9.2.4 Kapitel 5.5- Mittlere Reisegeschwindigkeiten und Reisezeit

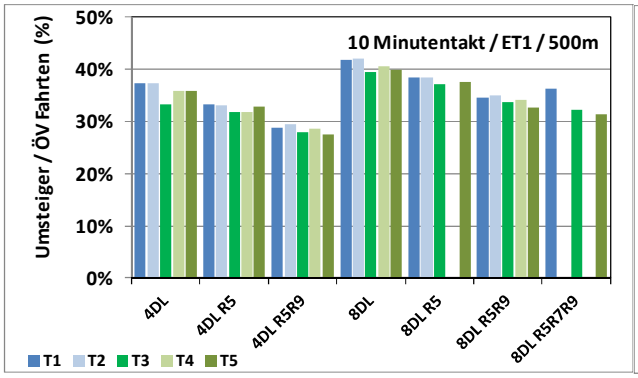
Verteilung	Netz	T1				T2			T3		T4			T5			
Abstand	Takt >	5 / 10	10	20	30	10	20	30	10	20	5 / 10	10	20	5 / 10	10	20	30
ET1	2DL																
500m	4DL					10,23			13,43			13,45		13,38	23,40	23,43	
	4DL R5					10,23			13,43		13,48	13,45		13,37	23,37		
	4DL R5R9								13,43		13,03			13,38	20,35	20,42	
	8DL													13,37			
	8DL R5								13,43						23,35	23,42	23,48
	8DL R5R9								20,42			20,43			23,41	23,24	
	8DL R5R7R9								13,43					13,37		23,40	23,43
ET1	2DL																
1000m	4DL					10,23			13,42			13,48					
	4DL R5																
	4DL R5R9						10,23			13,40							
	8DL					10,28	10,28		13,41	13,40			13,45				
	8DL R5					10,21				13,45		13,37					
	8DL R5R9					10,25			13,40			13,43					
	8DL R5R7R9								13,40	13,45		13,37	13,43				
ET2	2DL																
500m	4DL					10,48											
	4DL R5					10,45	10,52		13,62	13,50							
	4DL R5R9						10,52		13,67	13,75					13,65		
	8DL					10,45	10,53	10,58	13,67	13,77							
	8DL R5				10,58	10,45	10,53	10,53	13,67	13,73					13,67		
	8DL R5R9						10,52		13,63	13,73					13,65	13,75	
	8DL R5R7R9								13,58								

Tabelle A-7: Mittlere MIV Reisezeit für Erwerbstätigenverteilungen ET1 und ET2.
Grau unterlegt vergleichbare Zellen mit und ohne verlängerte Parksuchzeit.

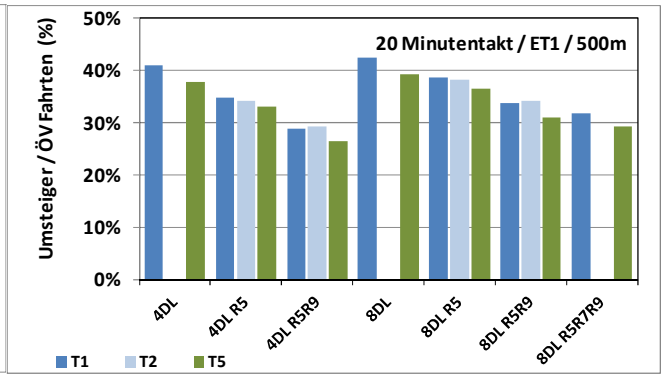
Verteilung	Netz	T1				T2			T3		T4			T5			
Abstand	Takt >	5 / 10	10	20	30	10	20	30	10	20	5 / 10	10	20	5 / 10	10	20	30
ET2	2DL																
500m	4DL		42,78			42,33											
	4DL R5		42,20	42,55		41,46	42,05		42,20	42,20							
	4DL R5R9		40,80	41,57		40,40	41,17		40,73	41,55					38,30		
	8DL		38,78	39,20		38,37	38,77	40,23	38,95	39,35							
	8DL R5		38,53	39,15	40,55	38,10	38,70	40,05	38,52	39,45					36,57		
	8DL R5R9		38,08	38,98		37,68	38,57		40,55						35,75	36,78	
	8DL R5R7R9																
ET1	2DL																
500m	4DL		42,12		42,32	41,70			41,78			41,37			40,20	40,38	
	4DL R5		41,38	41,88	42,28	40,90			40,95			41,03			40,17		38,37
	4DL R5R9		40,05	40,87	41,65	39,72	40,53		39,72			39,38			37,75	38,68	
	8DL		38,28	38,92	40,48	37,85			38,07						36,35	37,05	38,47
	8DL R5		41,38	38,80	40,27	37,50	38,53		37,55						36,10	36,98	
	8DL R5R9		37,47	38,52	39,78	37,08			37,13			36,75			35,28	36,37	
	8DL R5R7R9		37,33	38,66	40,10										35,12	36,40	37,80
ET1	2DL																
1000m	4DL		41,58	41,43	41,30				41,73			41,33					
	4DL R5		40,77	41,20	41,73												
	4DL R5R9		39,63	39,96	40,55				39,80			39,45					
	8DL		37,66	38,15	39,13	37,25			37,90	38,30		37,42	37,92				
	8DL R5		37,33	38,15	39,08							37,07	37,73				
	8DL R5R9		36,85	37,53	38,40				37,02	37,83	36,75	36,63	37,47				
	8DL R5R7R9		36,77	37,60	38,57												

Tabelle A-8: Mittlere ÖV Reisezeit für Erwerbstätigenverteilungen ET1 und ET2.

9.2.5 Umsteigen und Anteil Fußgänger

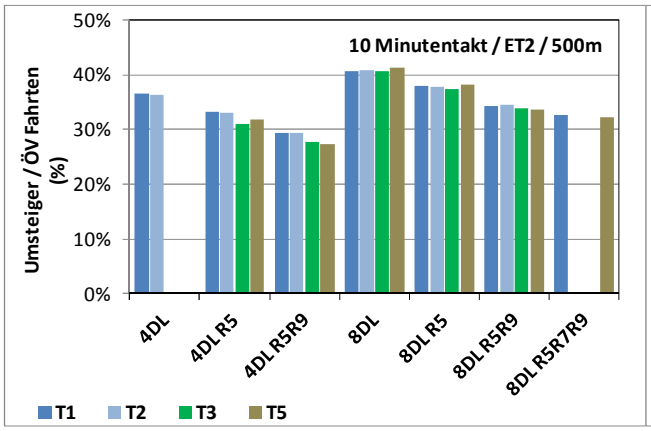


b) 10 Minutentakt

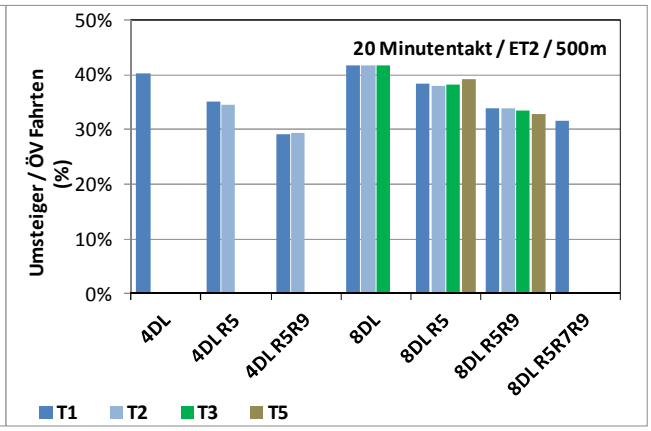


b) 20 Minutentakt

Abbildung A-8: Anteil der umsteigenden Personen für Netztypen T1, T2, T3, T4 und T5 a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt. Jeweils Verteilung ET1 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

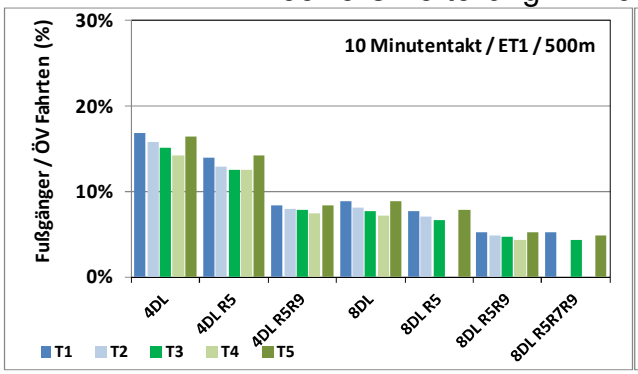


a) 10 Minutentakt

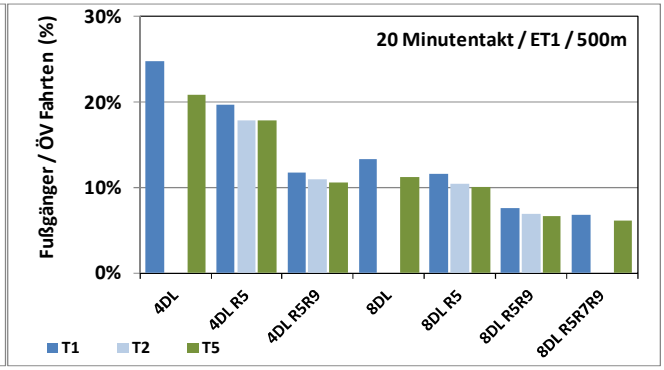


b) 20 Minutentakt

Abbildung A-9: Anteil der umsteigenden Personen für Netztypen T1, T2, T3 und T5 a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt. Jeweils Verteilung ET2 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

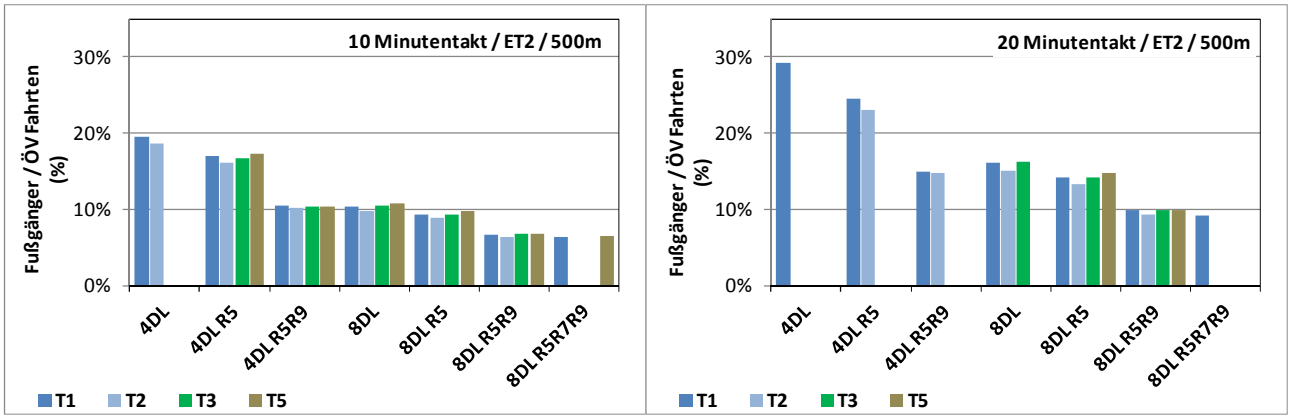


a) 10 Minutentakt



b) 20 Minutentakt

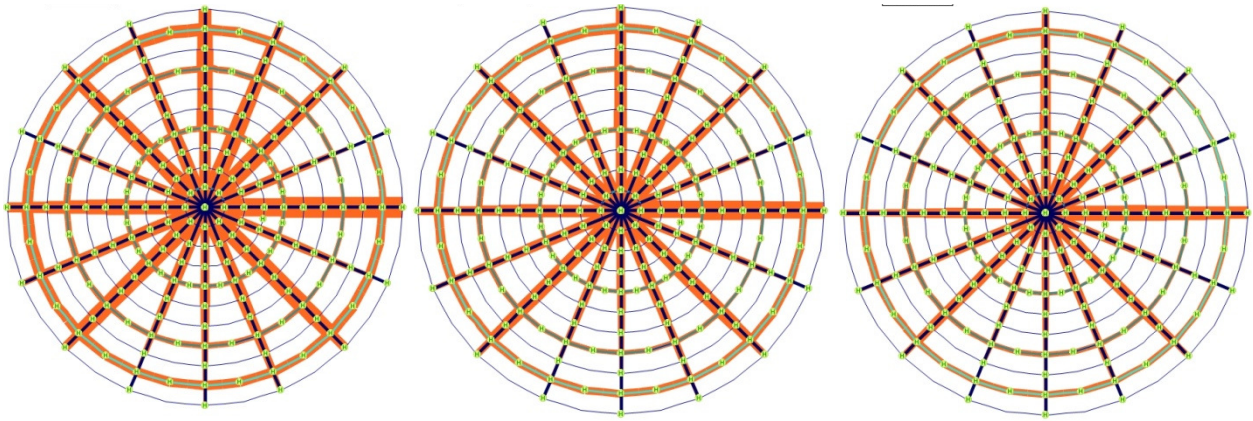
Abbildung A-10: Anteil der Fußgänger zu ÖV Fahrten für Netztypen T1, T2, T3 und T5 a) 10 Minutentakt und b) 20 Minutentakt. Jeweils Verteilung ET1 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.



b) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt

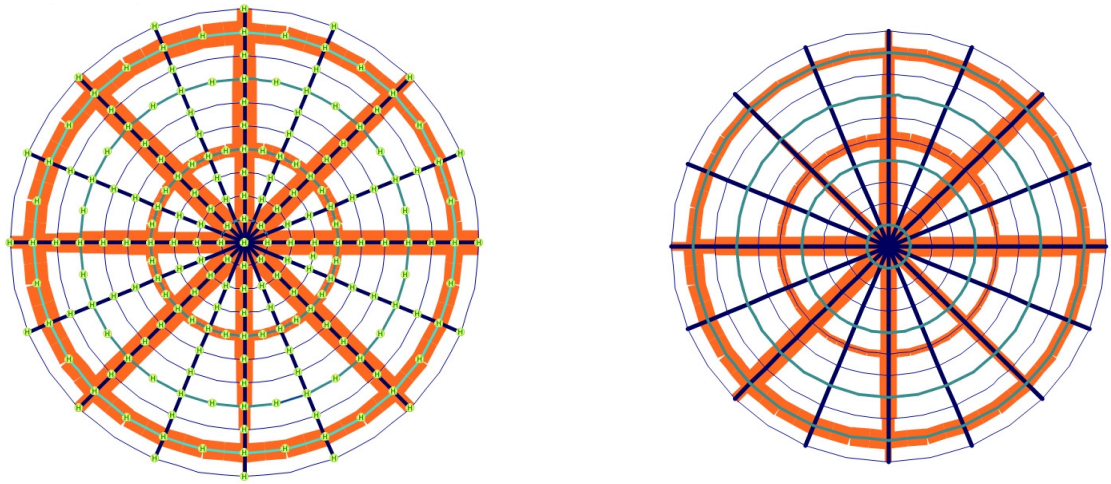
Abbildung A-11: Anteil der Fußgänger zu ÖV Fahrten für Netztypen T1, T2, T3 und T5 Jeweils Verteilung ET2 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand.

9.3 Kapitel 6 – Diskussion



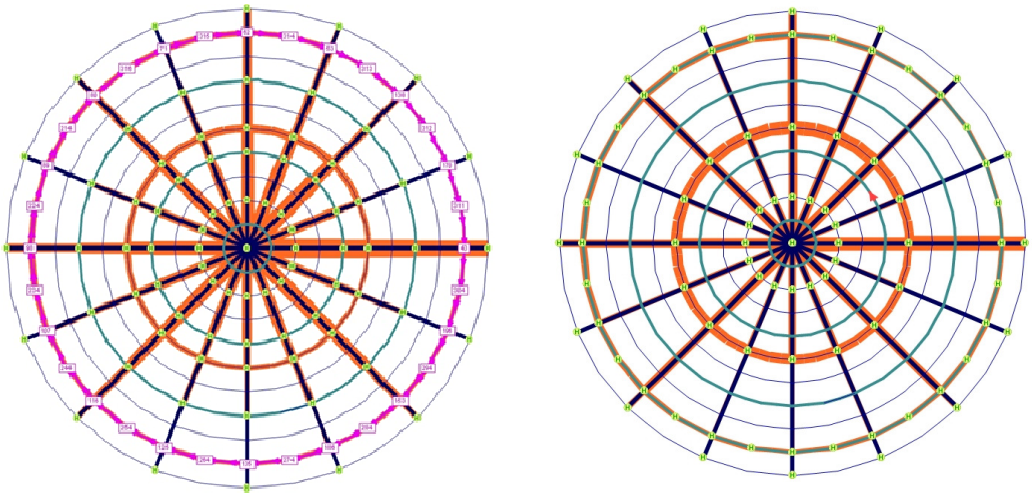
b) 10 Minutentakt b) 20 Minutentakt c) 30 Minutentakt

Abbildung A-12: Einfluss des Taktes auf Verkehrsmengen für Netz mit 8 Durchmesserlinien und 3 Tangentiallinien. Netztyp T5, Verteilung ET1 und 500 m mittlerer Haltestellenabstand: a) 10 min., b) 20 min und c) 30 min.



a) Verteilung ET1 b) Verteilung ET2

Abbildung A-13: Linienbelastung für Netze mit 4 Durchmesserlinien und 2 Tangentiallinien. Netztyp T5, 10 Minutentakt und 500 m mittlerer Haltestellenabstand: a) Verteilung ET1, b) Verteilung ET2.



a) 1000 m b) „1000m-plus“

Abbildung A-14: Mittleren Haltestellenabstand und Liniennetzbelastung 8 DL_2R5R9. Netztyp T2, Verteilung ET1, 10 Minutentakt: a) 1000 m, b) 1000m-plus.

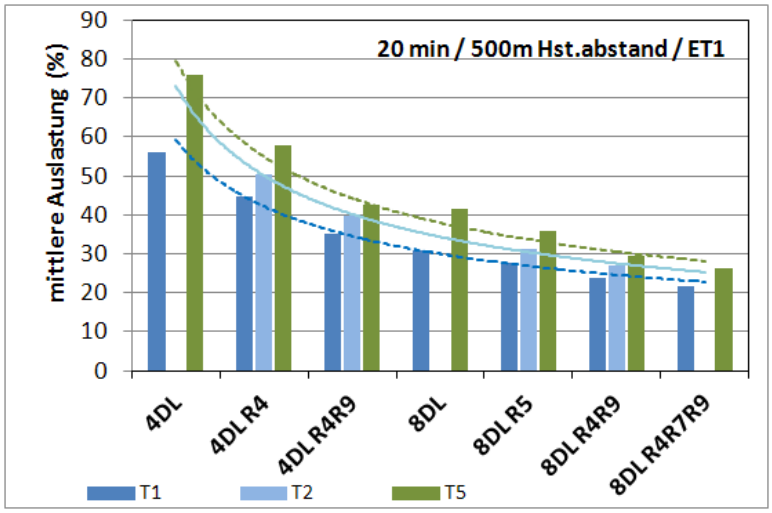


Abbildung A-15: Mittlere ÖV Linienauslastung für Netztypen T1, T2 und T5, sowie Potenznäherungskurven. ET1, 500 m mittl. Haltestellenabstand, 20 Minutentakt.

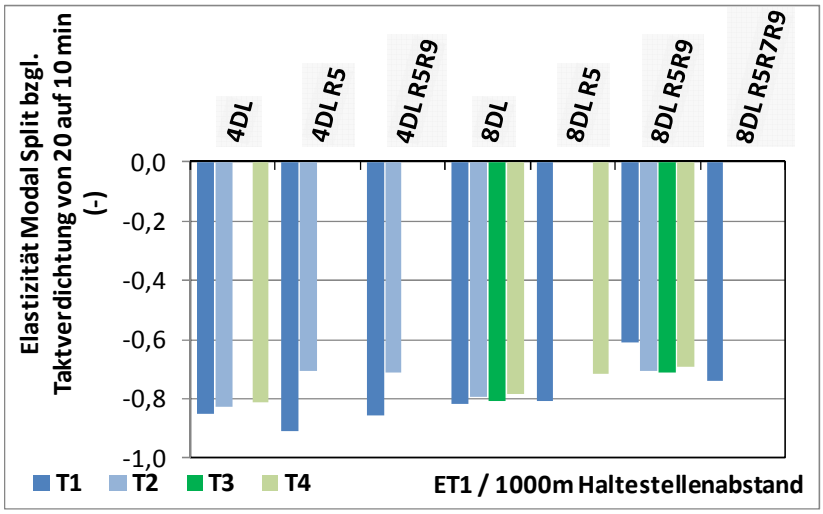


Abbildung A-16: Elastizität von Modal Split bzgl. einer Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten. Verteilung ET1, 1000 m mittlerer Haltestellenabstand.

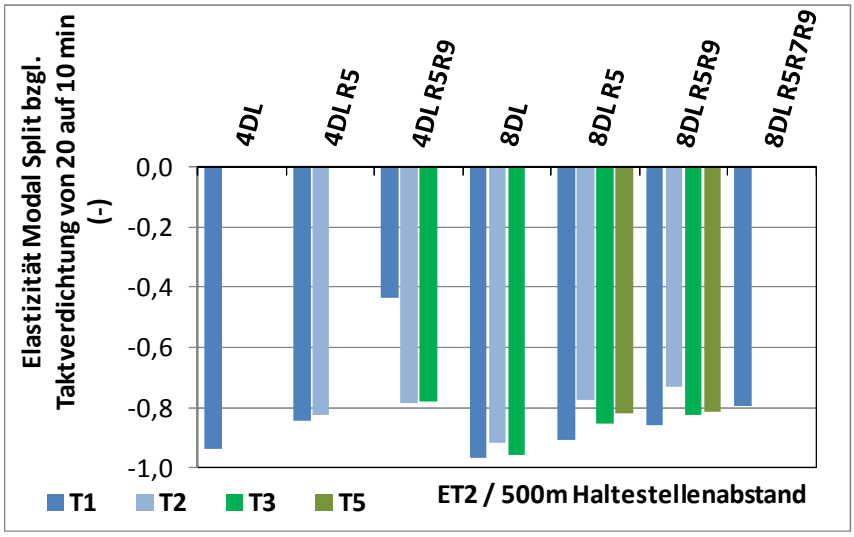
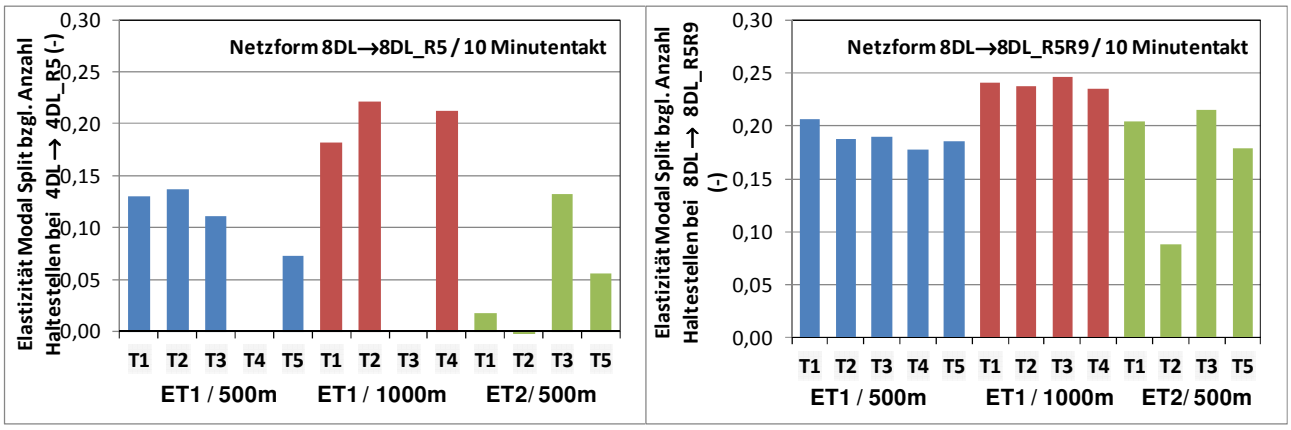
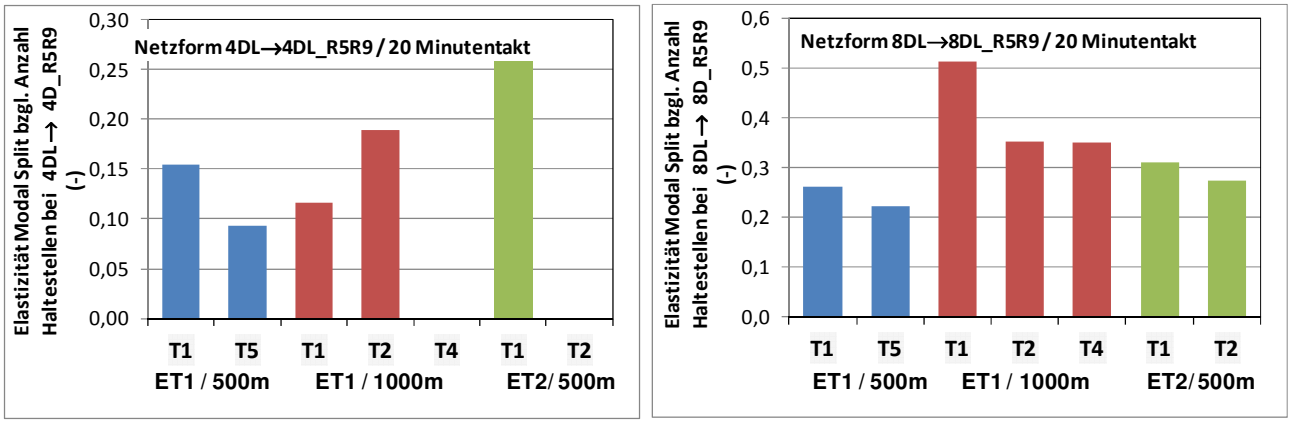


Abbildung A-17: Elastizität von Modal Split bzgl. einer Taktverdichtung von 20 auf 10 Minuten. Verteilung ET2, 500 m mittlerer Haltestellenabstand.



a) Erweiterung von 8DL auf 8DL_R5 b)Erweiterung von 8DL auf 8DL_R5R9

Abbildung A-18: Elastizitäten des Modal Split bezüglich einer Netzerweiterung von 8 Durchmesserlinien um 1 oder 2 Tangentiallinien für einen 10 Minutentakt. a) 1 Tangentiallinie R5 und b) 2 Tangentiallinien R5 und R9.



a) Erweiterung von 4DL auf 4DL_R5R9 b)Erweiterung von 8DL auf 8DL_R5R9

Abbildung A-19: Elastizitäten des Modal Split bezüglich einer Netzerweiterung von 4 oder 8 Durchmesserlinien um 2 Tangentiallinien für einen 20 Minutentakt. a) 4 Durchmesserlinien und b) 8 Durchmesserlinien.