

## Erweiterung des Integrierten Taktfahrplans

Dipl.-Ing. Stefan Walter

Seit es öffentliche Verkehrsmittel gibt, ist die Fahrplangestaltung ein wesentlicher Forschungsgegenstand. Die Optimierung und Verbesserung bestehender Angebote sowie die grundlegende Planung neuer Fahrpläne wurde dabei zunehmend verfeinert und systematisiert, wobei Taktfahrpläne die wirtschaftlichste und attraktivste Lösung der meisten Fahrplananforderungen sind.

Der Integrierte Taktfahrplan (ITF) als spezialisierte Form des (allgemeinen) Taktfahrplans zeichnet sich zunächst durch seine einfache Formulierung aus. Die relativ strengen Voraussetzungen an Fahrzeit, Infrastruktur und Bahnhofsgestaltung führen jedoch zu einer sehr rigiden Struktur, die nur wenig Raum für kurz- oder auch mittelfristige Änderungen des Fahrplangefüges oder der Angebotsstruktur lässt.

Seit der problemlosen Formulier- und Lösbarkeit auch komplexer Optimierungsansätze bilden sich, als generalisierte Form des Integrierten Taktfahrplans, mehr und mehr Fahrplanoptimierungsmethoden heraus. Diese streben weniger nach einer optimalen Gestaltung der Infrastruktur als nach einer möglichst guten Ausnutzung derselben bei gleichzeitiger Minimierung der Gesamtreisezeit aller Fahrgäste. Durch die deutlich entspannten formellen Anforderungen an allgemeine Taktfahrpläne lassen sich in diesem Bereich oft Lösungen finden, die bedeutend bessere Gesamtreisezeiten als vergleichbare ITF-Netze ermöglichen.

Beide genannten Forschungsansätze finden Anwendung in der Praxis: Derzeit werden die Prinzipien des Integrierten Taktfahrplanes in vielen Fern- und Regionalbahnnetzen Europas – aber mit unterschiedlichen Grundannahmen – eingesetzt, während in Stadtverkehrsnetzen in erster Linie Fahrplanoptimierungen erfolgen. Somit ergibt sich, dass viele Schnittstellen zwischen diesen Ansätzen entstehen, an denen eine Abstimmung derzeit nur händisch und unsystematisch erfolgen kann.

### 1 Bestehende Forschungsansätze

Obgleich es eine Reihe verschiedener Ansätze zur systematischen Fahrplangestaltung gibt, lassen sich die meisten Ansätze einer von zwei Forschungsansätzen zuordnen: Dem Integralen Taktfahrplan oder der Taktfahrplanoptimierung. Beide werden derzeit relativ unabhängig voneinander untersucht und weiterentwickelt.

### 1.1 Der Integrierte Taktfahrplan

Einen der ersten Ansätze zum Integrierten Taktfahrplan lieferte Lichtenegger im Jahr 1990 [1]. Durch die erstmalige graphentheoretische Herangehensweise an die Formulierung von Fahrzeiterfordernissen wurde es möglich, mit einigen wenigen Regeln auch große Netze zu planen:

**1. Kantenregel:**

*Die Fahrzeit zwischen zwei Taktknoten muss ein Vielfaches des halben Intervalls betragen.*

$$t_F = n \cdot \frac{T}{2}$$

mit  
 $t_F$  ... Fahrzeit zwischen zwei Knoten  
 $n \in \mathbb{N}$   
 $T$  ... Intervall

Bei einem Stundentakt bedeutet das also Fahrzeiten von 30, 60, 90, etc. Minuten. Diese Regel gewährleistet, dass Taktknoten dort zu liegen kommen, wo sich Züge begegnen.

**2. Maschenregel:**

*Die Fahrzeit von einem Taktknoten entlang einer beliebigen Kantenfolge zurück zum Ausgangsknoten muss dem ganzzahligen Vielfachen des Intervalls entsprechen.*

$$\sum t_F = n \cdot T$$

Es ist dabei ausreichend, wenn alle Elementarkreise der Maschenregel genügen, da damit automatisch die Maschenregel für das Gesamtnetz erfüllt ist.

Mit dieser Regel ist gewährleistet, dass Taktknoten, die prinzipiell zu jedem halben Intervallschritt stattfinden können, aus allen Richtungen zur gleichen Zeit und nicht um ein halbes Intervall versetzt angefahren werden.

Diese Regeln besitzen heute allgemeine Gültigkeit [2] und werden zur Konzeption von Liniennetzen und umfangreichen Infrastrukturvorhaben herangezogen [3, 4]. Das Grundprinzip des Integralen Taktfahrplans weist aber bis heute eine Reihe von Defiziten auf, die eine vollständig konsistente Planung von ITF-Netzen erschweren [1, 5]:

1. Netze mit unzureichender Infrastruktur können nur mit hohem manuellem Aufwand geplant werden.
2. Linien unterschiedlicher Intervalle können nur begrenzt gemeinsam geplant werden.
3. Intervallhalbierungen zwischen verschiedenen Linien können nur eingeschränkt berücksichtigt werden.

4. Linien mit mehreren Zugsystemen unterschiedlicher Fahrzeiten können implizit nur in zwei Fällen berücksichtigt werden: wenn sie (a) halb bzw. doppelt so schnell wie das Referenzsystem sind oder (b) doppelt so oft verkehren *und* um ein halbes Intervall langsamer bzw. schneller sind.
5. Linien, die aus verschiedenen Gründen einen Taktknoten nicht bedienen, können nur indirekt berücksichtigt werden.
6. Linien, deren Intervall die gleiche Größenordnung wie die Spreizung der Fahrzeit-spinne eines Taktknotens (z. B. 20 oder 15 Minuten) hat, können nicht berücksichtigt werden.

Dies führt dazu, dass der Regional- und besonders der S-Bahn-Verkehr der meisten ITF-konformen Liniennetze wiederum manuell geplant wird.

Dem Themenfeld des Integrierten Taktfahrplans können auch die Ansätze von Weis [3], Uttenthaler [4], Hesse et al. [6] sowie Kormányos et al. [7] zugeordnet werden.

## 1.2 Taktfahrplanoptimierung

Reiht man verschiedene Fahrplanmodelle nach ihrer Restriktivität, erlangt man folgende Reihenfolge, wobei Fahrpläne mit steigender Restriktivität jeweils eine Spezialisierung der vorigen sind [5]:

1. Individuelle Fahrten
2. Taktfahrpläne
3. Symmetrische Taktfahrpläne
4. Integrierte Taktfahrpläne

Liebchen (2006) nahm die Defizite des ITF zum Anlass, Fahrplanoptimierung auf einem bedeutend geringeren Spezialisierungsgrad aufzubauen und grundsätzlich die Fahrplanoptimierung von (allgemeinen) Taktfahrplänen durchzuführen. Dabei sind prinzipiell auch symmetrische und sogar integrierte Taktfahrpläne konstruierbar, doch setzt eine Definition von Taktknoten und Fahrplansymmetrie einen sehr hohen manuellen Aufwand voraus, der den Ansprüchen einer Fahrplanoptimierung zuwiderläuft.

Die Formulierung der Fahrplanoptimierung als *Periodic Event Scheduling Problem* (PESP) ermöglicht dabei eine sehr feingliedrige Modellierung auch komplexer eisenbahnspezifischer Restriktionen, sodass im Jahr 2005 der Fahrplan der Berliner U-Bahn nach den Methoden von Liebchen umgestaltet wurde und auf diese Weise bis heute erfolgreich betrieben wird [5].

Dennoch bestehen auch bei der Taktfahrplanoptimierung Einschränkungen im Vergleich zum Integralen Taktfahrplan, die in den meisten Fällen bei der Fahrplangestaltung unerwünscht sind:

1. Die Ausbildung von Taktknoten ist einerseits aufwändig zu modellieren und kann andererseits nur so starr erfolgen, dass die Optimierungsmöglichkeiten drastisch eingeschränkt sind.
2. Durch die Optimierung auf Basis eines Bestandsnetzes sind Fahrzeitziele nicht formulierbar.
3. Eine Erstellung von Grundfahrplänen, deren Intervall durch Verstärkungszüge verdichtet wird, ist nicht möglich.
4. Eine Modellierung überlagerter Linien, deren Intervalle sich *nicht* exakt halbieren, ist nicht möglich.
5. Eine kombinierte Linien- und Fahrplanplanung ist nicht möglich.

Diese Mängel führen dazu, dass nur in der Form an ITF-Netze angeknüpft werden kann, dass deren Fahrpläne als fix vorgegeben werden; eine gemeinsame Optimierung oder Verschachtelung der Ansätze auf gemeinsamen Strecken oder Knoten ist prinzipbedingt unmöglich.

Anmerkung: Grundsätzlich ist es in der Planungspraxis erwünscht, ein Liniennetz hierarchisch zu planen und damit den Fernverkehr als invariante Rahmenbedingung für die Planung des Regionalverkehrs und diesen wiederum als Randbedingung für den Vorortverkehr zu betrachten. Da aber der Regional- und der Vorortverkehr große gegenseitige Abhängigkeiten und insbesondere gemeinsam bediente Strecken aufweisen, beide aber in der Regel aus unterschiedlichen Richtungen geplant werden, kann an dieser Stelle keine hierarchische Planung erfolgen.

Die Vielzahl an Forschungsansätzen in diese Richtung ist mittlerweile nur noch schwer überschaubar; diesem Themenfeld können, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, die Ansätze von Peeters [8], Kroon et al. [9], Schröder und Schüle [10] sowie Marauli [11] zugeordnet werden.

### 1.3 Praxisanwendungen

Beide vorgestellten Forschungsansätze sind im Praxisgebrauch. Der Integrierte Taktfahrplan ist die Planungsbasis für die nationalen Eisenbahnfahrpläne der Schweiz, von Österreich, Tschechien und Ungarn, für das Hochgeschwindigkeitsnetz Frankreichs sowie die Regionalbahnnetze von Nordostbayern und Rheinland-Pfalz, aber auch das Busliniennetz im Vorarlberger Bregenzerwald wurde nach diesen Prinzipien gestaltet [12, 13, 14]. Eine Taktfahrplanoptimierung wurde, wie erwähnt, im U-Bahn-Netz Berlins und zum Teil im deutschen ICE-Netz umgesetzt [5].

## 2 Forschungsfragen

### 2.1 Mängel bestehender Forschungsansätze

Die eingangs erwähnten Mängel der beiden Forschungsansätze sind natürlich hauptsächlich auf die extrem komplexen Zusammenhänge des Verkehrssystems ÖV zurückzuführen. Dennoch zeigen sich vor allem im Vergleich der beiden Ansätze zwei Parallelen, die derzeit noch unzufriedenstellend gelöst sind:

1. Linien unterschiedlicher Geschwindigkeiten und/oder Intervalle sind nicht gemeinsam modellierbar.
2. Eine Bedienung eines Knotens sowohl als Taktknoten als auch als Durchgangsbahnhof ist nicht möglich.

Diese beiden Mängel führen dazu, dass gerade an Schnittstellen zwischen unterschiedlichen Planungsprinzipien eine systematische Problemlösung nicht möglich ist, wiewohl diese Schnittstellen in der Praxis sehr häufig sind.

### 2.2 Definition der Schnittstellen

Die erwähnte Schnittstellenproblematik tritt an mehreren Stellen in unterschiedlichen Ausprägungen auf, die jedoch als Gemeinsamkeit eine mangelhafte Definitionsmöglichkeit für Verträglichkeitsbedingungen aufweisen.

#### Internationaler Fernverkehr

Wenn nationale Fern- und Nahverkehrsnetze zur Gänze geplant werden, wie das in einigen Staaten der Fall ist, sind diese in sich bereits gut abgestimmt. An den Grenzen zu entsprechend ähnlich geplanten Liniennetzen treten jedoch Probleme auf, wenn diese nicht bereits im Vorfeld berücksichtigt werden. Die internationale Verknüpfung nationaler Taktfahrpläne ist per se von derselben Komplexität wie die Planung jeglichen Liniennetzes. Bereits minimale Unterschiede in den Planungsprämissen können jedoch dazu führen, dass eine systematische internationale Verknüpfung erheblich erschwert, nur mit großem Aufwand durchführbar oder gänzlich verunmöglicht wird: etwa wenn unterschiedliche, aber unmittelbar benachbarte Orte als Taktknoten ausgewählt werden oder aber dieselben Orte mit um 30 Minuten zeitversetzter Taktzeit. In [12] werden Planungsprämissen und Lösungsansätze für eine systematische Verknüpfung unterschiedlicher Netze präsentiert, doch sind diese in erster Linie mit großem manuellem Aufwand verbunden.

### Fernverkehrs-Taktknoten und Vorortverkehr

Größere Städte sind in der Regel als ITF-Taktknoten prädestiniert. Zumeist findet sich in diesen Städten ausgeprägter Vorortverkehr, der deutlich dichtere Intervalle als der Fernverkehr aufweist. Bei klassischer Konfiguration des Bahnhofs als Taktknoten ergibt sich eine Knotenspreizung, die von der Anzahl der Züge und der Mindestzugfolgezeit abhängt. Bei zwei Linien, einer Mindestaufenthaltszeit von 4 Minuten und einer Zugfolgezeit von 3 Minuten ergibt sich bereits eine Knotenspreizung (Zeit zwischen Ankunft des ersten und Abfahrt des letzten Zuges im Taktknoten) von 10 Minuten. Die minimale Aufenthaltsdauer von S-Bahn-Zügen, die voll in den Taktknoten eingebunden sind, beträgt damit 16 Minuten (siehe Abbildung 1a). Das bedeutet, dass bei einem Halbstundentakt eine halbe, bei einem 20-Minuten-Takt annähernd eine ganze Intervalllänge Aufenthaltszeit entsteht (siehe Abbildung 1b und c) und somit die Reisezeit für durchfahrende Fahrgäste in S-Bahn-Zügen unattraktiv wird. Dichtere Intervalle als 20 Minuten sind damit prinzipbedingt nicht möglich, da sich ansonsten die Aufenthalte zweier Folgezüge im Bahnhof überschneiden würden.

Eine Verdichtung des Angebotes ist folglich nur dann möglich, wenn die Bedienung des Taktknotens aufgegeben wird und die S-Bahnen knapp außerhalb der Knotenspreizung des Fernverkehrsknotens ankommen *und* abfahren (siehe Abbildung 1d). Der Vorteil ist zudem, dass zwei Bahnsteigkanten weniger benötigt werden. Damit allerdings sind die Fahrzeiten des Vorortverkehrs nicht mehr mit den herkömmlichen Methoden des Integrierten Taktfahrplans beherrschbar, womit entweder manuelle Anpassungsarbeit geleistet werden muss oder Optimierungsmethoden ohne Eingriffsmöglichkeiten in die Knotengestaltung zur Anwendung kommen.

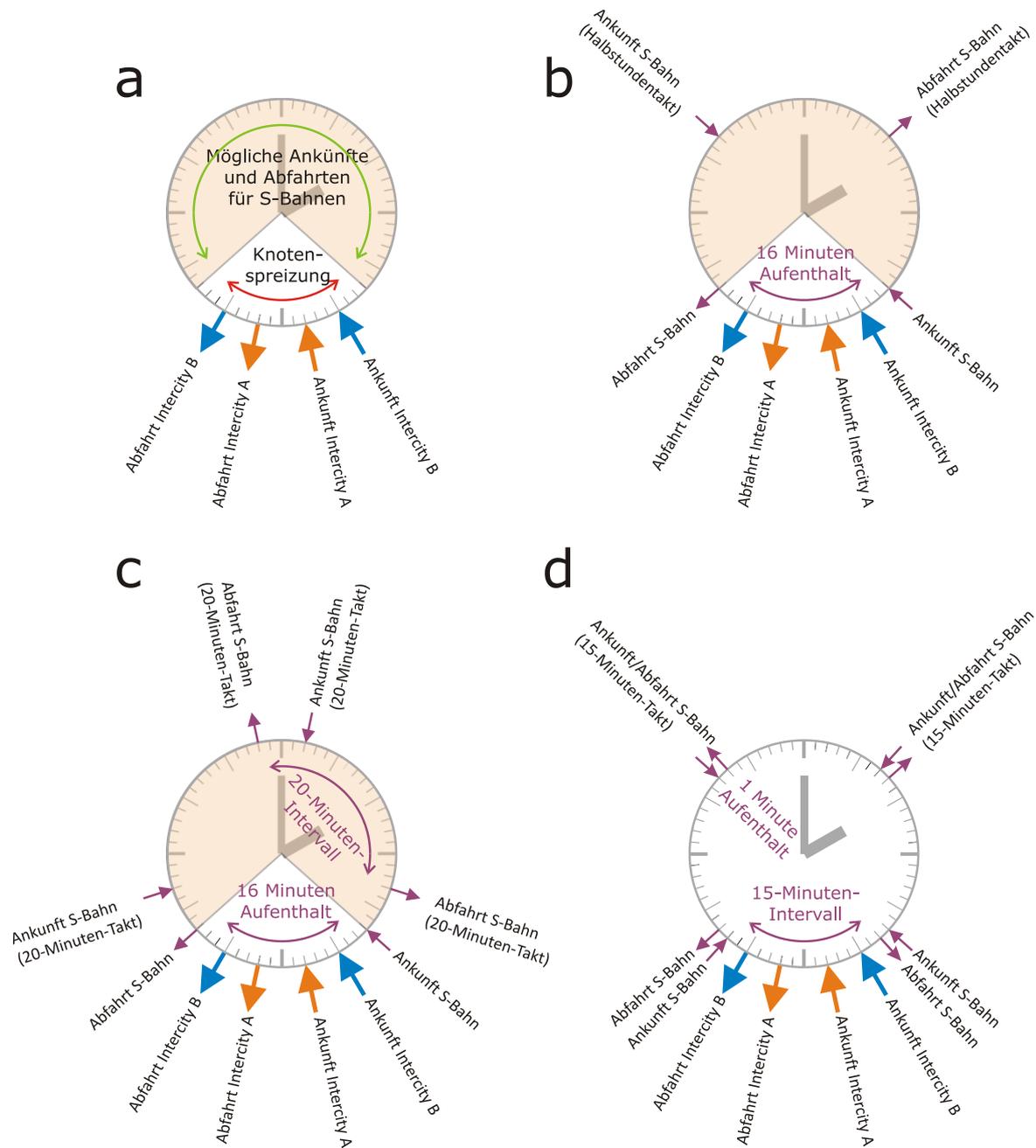


Abbildung 1 Verknüpfung zwischen einem Taktknoten und dichtem Nahverkehr:  
 (a) Knotenspreizung  
 (b, c) klassische Bedienung des Taktknotens, 20- und 30-min-Takt  
 (d) Taktknotenunabhängige Bedienung, 15-min-Takt

Eine problematischere Situation ergibt sich, wenn der Taktknoten bereits a priori keine Gleise für separaten S-Bahn-Verkehr hat, wie das beispielsweise bei Durchmesserlinien mit Mischverkehr (siehe Zürich, Antwerpen oder Leipzig) der Fall ist: dann bedeutet die Einrichtung eines Taktknotens, dass während der Knotenspreizung überhaupt kein S-Bahn-Verkehr möglich ist. Die dichtestmögliche Zugfolge sinkt dann im günstigsten Fall (Annahme: Zwei Fernverkehrslinien, 2 Minuten Mindestzugfolgezeit) auf 11 Minuten. Das

bedeutet, dass bei einem S-Bahn-Takt von 15 Minuten nur maximal drei S-Bahn-Linien, diese jedoch innerhalb von 6 Minuten verkehren können. Damit ergibt sich eine äußerst inhomogene Fahrtenfolge im gemeinsam bedienten Abschnitt sowie ein um 15 Minuten versetztes, erneutes Auftreten der elfminütigen Bedienungslücke. Zumindest letztere kann immerhin durch einen gezielten Einsatz von Verstärkungszügen oder aber eine Abkehr vom starren Viertelstundentakt gefüllt werden; ersteres bleibt ein immanentes Problem des Zusammentreffens unterschiedlicher Planungsprinzipien.

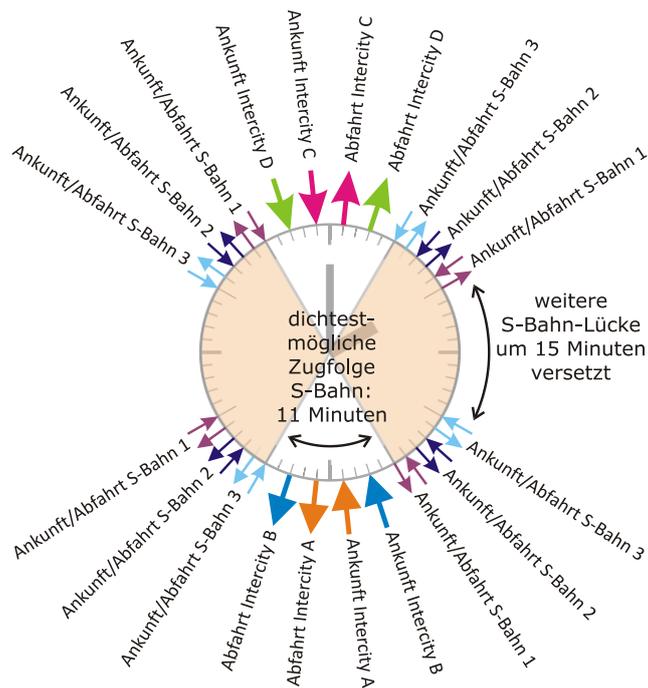


Abbildung 2 Taktknoten mit dichtem S-Bahn-Verkehr, Beispiel Durchmesserlinie

### Regional- und Stadtverkehr

Abstimmungsprobleme bestehen weiters auch, wenn Linien des Regionalverkehrs, beispielsweise Regionalbuslinien, mit Linien des Stadtverkehrs verknüpft oder verschachtelt werden müssen. Dieses Phänomen tritt besonders im suburbanen Verkehr auf, wenn Regionalbuslinien zusammen mit Stadtbuslinien gemeinsam ein dichteres Intervall im Anschluss an Straßenbahn- oder Stadtbahnlinien bereitstellen. Während im unmittelbaren Bereich dieser Linienüberlagerung für gewöhnlich keine außergewöhnlichen Probleme einer Abstimmung mit dem Kernnetz des Stadtverkehrs bestehen, treten diese dann auf, wenn die betroffenen Regionalbuslinien im Umland Anschluss an andere Regionalverkehrsmittel (z. B. Regionalbahnen) haben, die nach ITF-Prinzipien geplant wurden. Ein

Stadtverkehrsnetz, dessen Fahrplan ohne Beachtung einer kompatiblen Symmetriezeit optimiert wurde (dies ist in allen hier vorgestellten Taktfahrplan-Optimierungsansätzen der Fall), kann nur durch Zufall dieselbe Symmetriezeit wie ein ITF-Netz aufweisen. Zudem ermöglicht eine asymmetrische Verknüpfung der Umläufe an der Endstation des suburbanen Verkehrs einen günstigeren Fahrzeugeinsatz. Damit ist ein attraktiver Anschluss des Regionalbusses an den Taktknoten nur in seltenen Fällen möglich, in jedem Fall aber nicht implizit planbar (siehe Abbildung 3a). Umgekehrt führt eine Anpassung des Regionalverkehrs an den Taktknoten zu einem erhöhten Fahrzeugbedarf und nur bei zufällig gleicher Symmetrieminute zu einem in beide Richtungen attraktiven Anschluss.

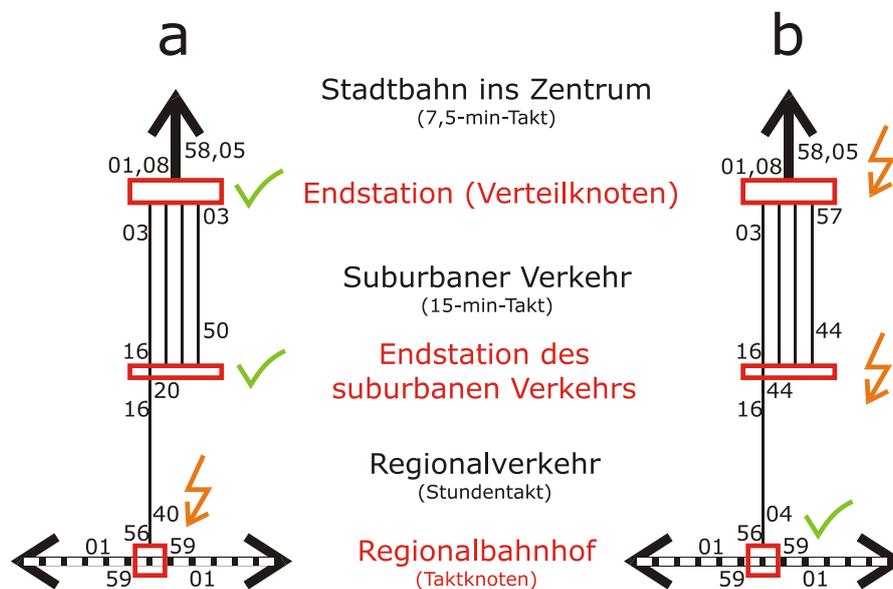


Abbildung 3 Verknüpfung zwischen Stadt- und Regionalverkehrsnetzen:  
 (a) Optimierter Anschluss an den Stadtverkehr  
 (b) Optimierter Anschluss an den Taktknoten

### 2.3 Formulierung der Forschungsfragen

Aus den genannten Mängeln und den auftretenden Schnittstellen lassen sich folgende Forschungsfragen formulieren:

1. Welche Verträglichkeitsbedingungen müssen formuliert werden, um separat geplante Integrierte Taktfahrpläne kompatibel zu machen bzw. zu halten?
2. Welche Parameter müssen definiert werden, um eine – zumindest iterative – gemeinsame Planung von ITF-Netzen und Netzen mit optimiertem Taktfahrplan zu ermöglichen?
3. Welche Ansätze der Taktfahrplanoptimierung können in die Formulierung des Integrierten Taktfahrplans übernommen werden, um eine integrierte Planung von Nahverkehrsnetzen zu ermöglichen?

### 3 Ausblick

Der nächste Schritt ist eine deutlich vertiefte Untersuchung der Ansätze der Taktfahrplanoptimierung. Dazu sind die Ansätze zu katalogisieren und deren Anwendbarkeit zu untersuchen. Dabei ist insbesondere die Möglichkeit einer Formulierung von Verträglichkeitsbedingungen von Interesse.

Die schrittweise Annäherung an eine vollständige Verknüpfung der beiden Planungsansätze wird dann durch die Anwendung unterschiedlicher Ansätze auf ähnliche Probleme unterstützt. Dabei wird zunächst die integrierte Linien- und Fahrplanplanung nach Prinzipien des ITF auf ein großes regionales Liniennetz angewendet, weiters erfolgt eine Optimierung eines bestehenden Eisenbahnliniennetzes unter Anwendung von Optimierungsalgorithmen.

Als erster Praxisansatz konnte für eine stark belastete Eisenbahnstrecke gezeigt werden, dass eine Abkehr von der Vorgabe, einen strikten, ITF-konformen Taktknoten für den Nahverkehr einzurichten, eine Verbesserung der Fahrplanqualität ohne nennenswerte Verschlechterung der Umsteigesituation ergeben kann [15]. Durch diese Abkehr treten zudem Optimierungsmöglichkeiten auf, wie sie im System des integrierten Taktfahrplans nicht bestehen, insbesondere im Bereich der Taktknotengestaltung und des Bahnhof- und Zufahrtsgleisplans.

## Literaturverzeichnis

- [1] Lichtenegger, M.: *Der Taktfahrplan. Abbildung und Konstruktion mit Hilfe der Graphentheorie. Minimierung der Realisierungskosten*, Dissertation an der TU Graz, 1990
- [2] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: *Merkblatt zum Integralen Taktfahrplan*, Bergisch Gladbach 2001
- [3] Weis, P.: *Konstruktionsprinzip eines Taktfahrplans. Eine Strategie für den Eisenbahnverkehr der Staaten Kroatien, Ungarn, Slowenien und Österreich*, Diplomarbeit an der TU Graz, 2005
- [4] Uttenthaler, H.: *Grundlagen eines auf einem integrierten Taktfahrplan basierenden Eisenbahninfrastrukturausbaues am Beispiel Zentraleuropa*, Diplomarbeit an der TU Graz, 2010
- [5] Liebchen, C.: *Periodic Timetable Optimisation in Public Transport*, Dissertation an der TU Berlin, 2006
- [6] Hesse, W.; Baudyš, K.; Janoš, V.; Pospíšil, J.; Guckert, M.: *Landesweiter Integraler Taktfahrplan für Tschechien – eine Studie*, Eisenbahn-Revue International 11/2010
- [7] Kormányos L.; Vincze B.: *Introduction of the periodic timetable on the Hungarian railway network, etappe 1*, ŽEL 2007, Žilina 2007
- [8] Peeters, L.: *Cyclic Railway Timetable Optimization*, Dissertation an der Erasmus-Universität Rotterdam, 2003
- [9] Kroon, L.; Dekker, R.; Vromans, M.: *Cyclic Railway Timetabling: A Stochastic Optimization Approach*, Geraets, F. et al.: *Railway Optimization 2004*, Heidelberg 2007
- [10] Schröder, M.; Schüle, I.: *Interaktive mehrkriterielle Optimierung für die regionale Fahrplan-abstimmung in Verkehrsverbänden*, Straßenverkehrstechnik 6/2008, Köln 2008
- [11] Marauli, A.: *Verkehrsbetreiberübergreifende nachfrageorientierte Fahrplanoptimierung*, Dissertation an der TU Graz (unveröffentlicht), Abschluss voraussichtlich Ende 2012

- [12] Walter, S.: *Integrated Periodic Timetabling – Towards an Integrated Timetable Across Central Europe*, Lakušić, Š.: Road and Rail Infrastructure II. Zagreb 2012
- [13] Montanaro G.; Cosandey E.; Stähli L.: *Rhin-Rhone HSL sparks 2012 timetable revolution in France*, EURAILmag Business&Technology 21/2011
- [14] Verkehrsverbund Vorarlberg: *Landbus Bregenzerwald*.  
<http://www.vmobil.at/index.php/375#3>, Zuletzt betrachtet am 7. Juni 2012
- [15] Walter, S.; Bach, H.; Veit, P.: *Netzentwicklung Graz–Bruck/Mur. Untersuchung von Kapazität und Infrastrukturoptionen*, Projektbericht. Graz 2011