

# Taktverdichtung im Bahnverkehr der Schweiz unter Berücksichtigung des Knotenprinzips

Der Fernverkehr der Schweiz ist vom Knotensystem geprägt, welches durch abgestimmte Fahrplanzeiten optimale Anschlüsse und damit netzweite Reiseketten ermöglicht. Im Zusammenhang mit einer künftigen weiteren Verdichtung des Angebots auf 15-Minuten-Takte und dichter zeigt die vorliegende Forschungsarbeit auf, welches die Auswirkungen einer teilweisen oder vollständigen Auflösung von Anschlussspinnen u.a. auf die netzweiten Reisezeiten und die Kapazitätsnutzung der Infrastruktur sind.



## 1. Gegenstand

Heute und in den mittelfristig vorgesehenen Ausbausritten des Programms STEP (Strategisches Entwicklungsprogramm Bahninfrastruktur) ist das Angebot des Eisenbahn-Fernverkehrs in der Schweiz vom Knotensystem geprägt. Dieses ermöglicht in Knotenbahnhöfen kurze Anschlüsse zwischen den untereinander abgestimmten Stunden- und Halbstunden-Takten, so dass netzweite stündliche resp. halbstündliche

Reiseketten mit optimalen Reisezeiten entstehen (siehe Bild 1).

Dieser Forschungsarbeit des SVI (Schweizerische Vereinigung der Verkehringenieure und Verkehrsexperten) zu Grunde liegt die Hypothese, dass bei einer weiteren Verdichtung des Angebots auf 15-Minuten-Takte oder dichter diese sogenannten Anschlussspinnen an Bedeutung verlieren und sich auflösen lassen. Dabei verändern sich die netzweiten Reisezeiten einerseits durch kürzere Standzeiten der



**MSc ETH Michael Frei**

Fachexperte,  
SMA und Partner AG, Zürich  
m.frei@sma-partner.com



**MSc ETH Raphael Karrer**

Projektleiter,  
Marktverantwortlicher,  
SMA und Partner AG, Zürich  
r.karrer@sma-partner.com



1: Fernverkehrszüge in der Anschlusspinne in Zürich HB

durchgebundenen Züge und Entfall der gestaffelten Ein- und Ausfahrt von Zügen in den Knotenbahnhöfen, andererseits können für gewisse Anschlüsse verlängerte Umsteigezeiten entstehen. Weitere mutmassliche Wirkungen sind eine reduzierte Spitzenbelastung der Gleis- und Publikumsanlagen in den Knotenbahnhöfen und demzufolge ein geringerer Infrastruktur-Ausbaubedarf bzw. erhöhte Freiheitsgrade bei der Fahrplangestaltung sowie eine verbesserte Betriebsstabilität (Entfall des Zwangs, Anschlüsse abzuwarten). Demgegenüber könnte die Auflösung von Anschlussspinnen bei noch nicht genügend hoher Taktfrequenz negative Auswirkungen mit verlängerten Umstei-

gezeiten und entsprechend höheren netzweiten Reisezeiten, insbesondere auch in Randstunden, haben. Zudem sind Nachteile bezüglich Qualität des Güterverkehrs denkbar.

**2. Methode und Vorgehen**

Auf Basis der beschafften Grundlagen hat SMA und Partner AG zuerst in einem empirischen resp. theoretischen Teil Fallbeispiele bzw. ein theoretisches Knotenmodell bezüglich der Einflussgrößen und Wirkungszusammenhänge untersucht und daraus Schlussfolgerungen abgeleitet. Die anschliessende konkrete Anwendung auf das Bahnnetz der Schweiz erfolgte in Szenarien, auf Basis derer sich die Wirkungen analysieren liessen. Schliesslich wurden die Szenarien und deren Wirkungen evaluiert und daraus die Schlussfolgerungen abgeleitet.

Die bezüglich der Forschungsfrage relevanten Einflussgrößen umfassen die angebotsseitige Knotenausgestaltung: Vollknoten, Richtungsknoten, Korrespondenz, Fließband (siehe Bild 2) oder aufgelöster Knoten und den Knotentakt (sofern der Knoten nicht aufgelöst ist).

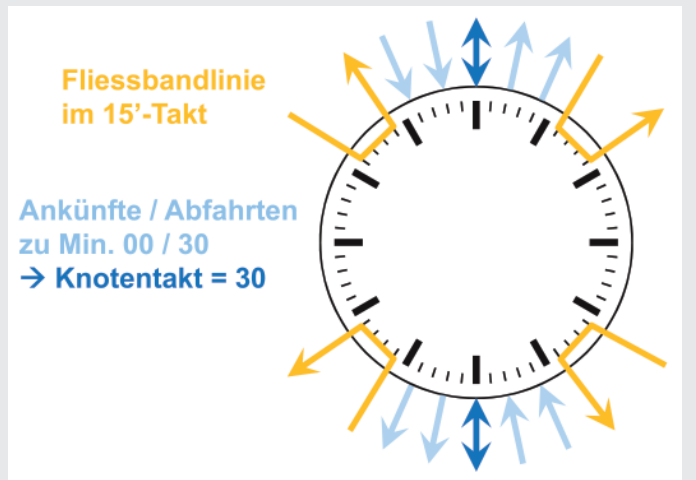
Bezüglich der im Knoten verkehrenden Linien sind insbesondere die Takte relevant (vgl. Tabelle 1). Disruptive Ansätze, wie das Brechen eines Grossteils der durchgebundenen Linien im Knotenbahnhof oder eine Reduktion der Anzahl Produktkategorien im Personenverkehr, wurden in einer Frühphase des Projekts mit den Experten und der Begleitkommission diskutiert, deren Aufnahme in das Variantenspektrum jedoch verworfen, um eine Vergleichbarkeit mit STEP Ausbauschnitt (AS) 2035 sicherzustellen.

Die Wirkung auf das Gesamtsystem Bahn lässt sich anhand von 11 Indikatoren messen bzw. bewerten, welche sich aus den übergeordneten Zielen – in Form der strategischen Leitsätze aus der Strategie 2019 des Bundesamtes für Verkehr – ableiten (vgl. Bild 9).

**3. Fallbeispiele**

Es bestehen international zahlreiche Beispiele von Knotensystemen mit 30- und 60-Minuten-Takten, jedoch keines, bei welchem der Fernverkehr überwiegend in 15-Minuten-Takten verkehrt und gleichzeitig ausgeprägte Taktknoten bestehen. Aus den Niederlanden liegt ein Beispiel vor, bei welchem man mit der Verdichtung von Expresslinien auf bis zu 10-Minuten-Takte (im

**2:** Fließbandprinzip und Takt eines Knotens (Knotentakt)



Wesentlichen durch Überlagerung von Linien im Kernnetz) vorher bestandene Taktknoten teilweise oder ganz auflöste, was eine Maximierung der Verbindungsdichte und der Anzahl direkter Verbindungen ermöglichte.

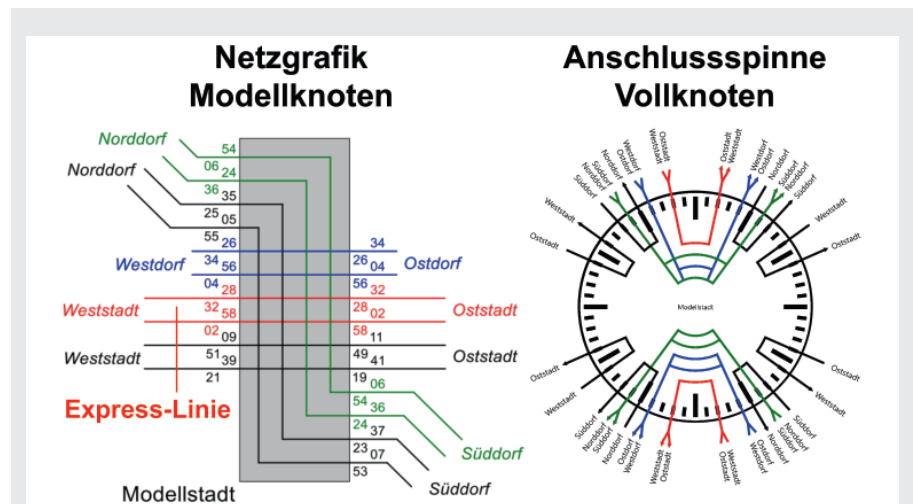
**4. Theoretische Analyse Modellknoten**

Aus der Analyse von idealisierten theoretischen Modellknoten, welche repräsentativ

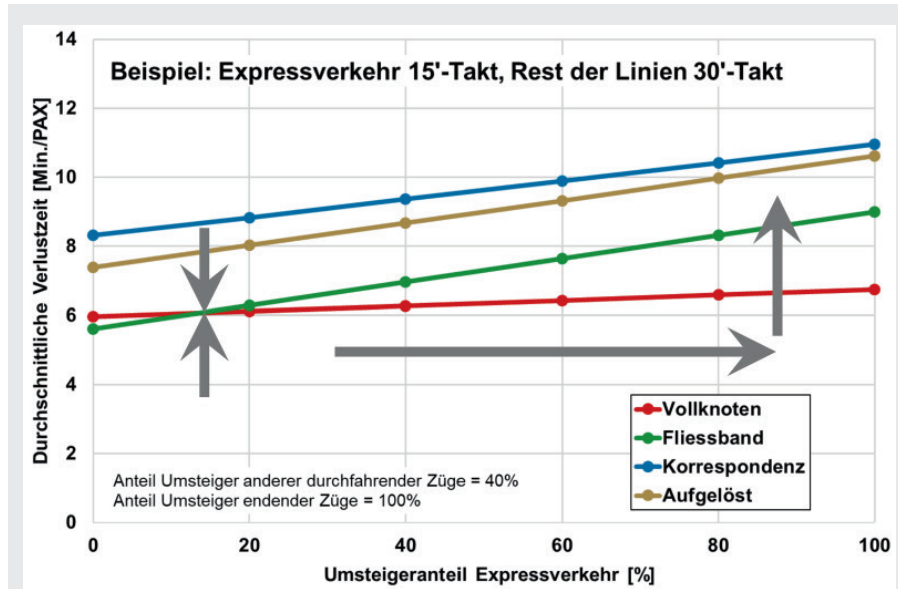
für mittelgrosse Knotenbahnhöfe in der Schweiz sein können, liessen sich die Auswirkungen unterschiedlicher Takte von 60 bis 7.5 Minuten und von variablen Anteilen der Umsteiger u.a. auf die Verlustzeiten der Reisenden im Knoten sowie die Anzahl erforderlicher Perrongleise in Abhängigkeit der Knotenausgestaltung ermitteln (siehe Tabelle 1 mit Überblick der untersuchten, grün markierten Fälle und Bild 3 mit Beispiel des idealisierten Vollknotens).

| Einflussparameter           | mögliche Ausprägungen je Einflussparameter |                 |               |           |           |     |   |
|-----------------------------|--|-----------------|---------------|-----------|-----------|-----|---|
| Ausgestaltung Knoten        | Vollknoten                                 | Richtungsknoten | Korrespondenz | Fließband | aufgelöst |     |   |
| Knotentakt                  | 60   | 30              | 20            | 15        | 10        | 7.5 | 5 |
| kompatible Takte von Linien | 60   | 30              | 20            | 15        | 10        | 7.5 | 5 |

**Tabelle 1:** Einflussparameter



**3:** Beispiel Netzgrafik und Anschlusspinne Modellknoten



4: Beispiel Ergebnis Analyse Modellknoten

In Bild 4 ist beispielhaft ein Ergebnis der Analysen an einem Modellknoten dargestellt: Bei wachsendem Anteil Umsteiger der im 15-Minuten-Takt unterstellten Express-Linie<sup>1)</sup> steigt die durchschnittliche Verlustzeit pro Passagier im Knoten. Der Anstieg ist beim Vollknoten relativ gering, währenddem bei allen anderen Knotenausprägungen eine mässige bis ausgeprägte Zunahme der Verlustzeiten mit zunehmendem Umsteigeranteil zu beobachten ist.

1) Mit dem neutralen Begriff „Expressverkehr“ sind im Rahmen dieser Arbeit die Produkte IC, EC, IR sowie ICE/TGV/RJX zusammengefasst.

Bei einem tiefen Anteil Umsteiger der Express-Linie weist das Fliessbandprinzip die tiefsten Verlustzeiten auf. Lässt sich mit Herausnahme der Express-Linie aus der Anschlussspinne deren Spreizung reduzieren, so ist das Fliessband – resp. auch der aufgelöste Knoten – sogar bis zu Umsteigeranteilen von 30 bis 40% eine prüfungswerte Option.

Grundsätzlich lässt sich aus den Analysen an den Modellknoten die Schlussfolgerung ziehen, dass – bei Takten grösser oder gleich 15 Minuten – der Vollknoten die besten Werte erzielt. Je dichter jedoch der Takt ist, desto enger liegen die Resultate der verschiedenen Knotentypen zusammen. So sind im Bereich von Takten kleiner oder

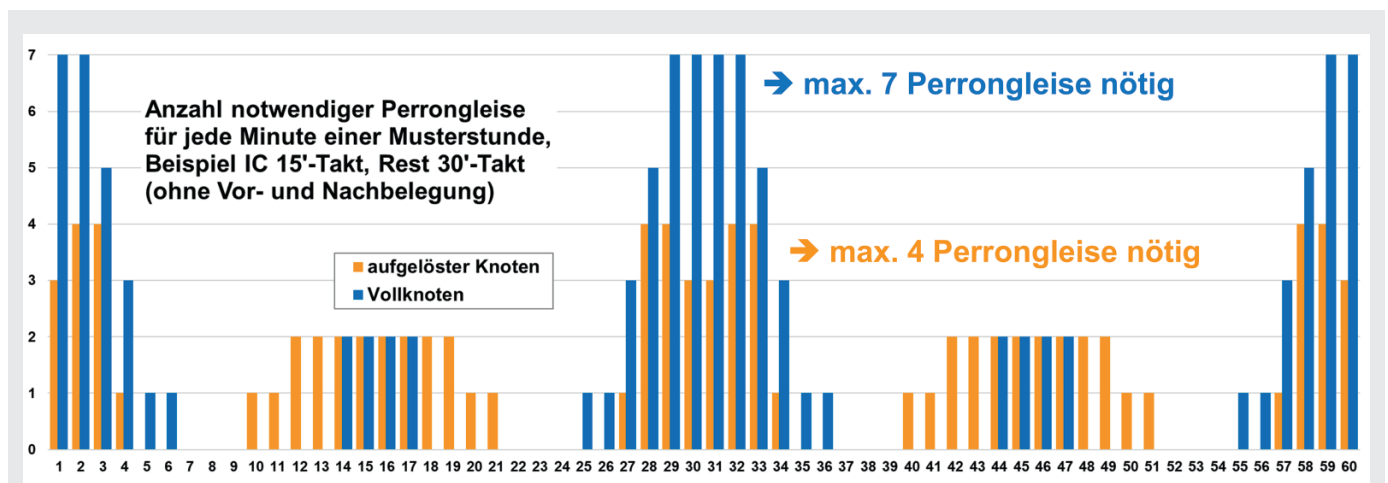
gleich 10 Minuten – d.h. der Frequenz von städtischen Verkehrsmitteln – kaum mehr Unterschiede feststellbar.

Der Bedarf an Perrongleisen ist bei Korrespondenz und aufgelöstem Knoten am geringsten, wohingegen beim Vollknoten die höchsten Werte zu beobachten sind (vgl. Bild 5).

Umgekehrt ergeben sich jedoch bei Vollknoten und Fliessband – als Ergebnis einer Abschätzung – die grössten freien Trassenfenster für die potenzielle Durchführbarkeit von Güterzug-Trassen durch den Knotenbahnhof.

### 5. Szenarien-Entwicklung Knotensystem Schweiz

SMA und Partner AG hat die Erkenntnisse aus der Analyse der theoretischen Modellknoten anhand eines konkreten Anwendungsbeispiels überprüft. Das möglichst repräsentative Musternetz war so zu wählen, dass mindestens ein Grossknoten und mehrere regionale Knotenbahnhöfe enthalten sind. Es sollten Strecken mit realistischer längerfristiger Taktverdichtung enthalten sein (insbesondere der Korridor Zürich – Bern – Lausanne – Genf), welche dabei zudem repräsentative Netzcharakteristiken aufweisen (z. B. auch eingleisige Strecken). Dazu wurde das Normalspurnetz der Grossregion Bern ausgewählt und darin Angebotskonzepte für sechs Szenarien im gesamten Personen- und Güterverkehr ausgeplant. Die Szenarien unterscheiden sich bei der Taktichte des Expressverkehrs (30- resp. 15-Minuten-Takte aller Linien) und bei der Ausgestaltung des Knotenbahnhofs Bern als Voll-



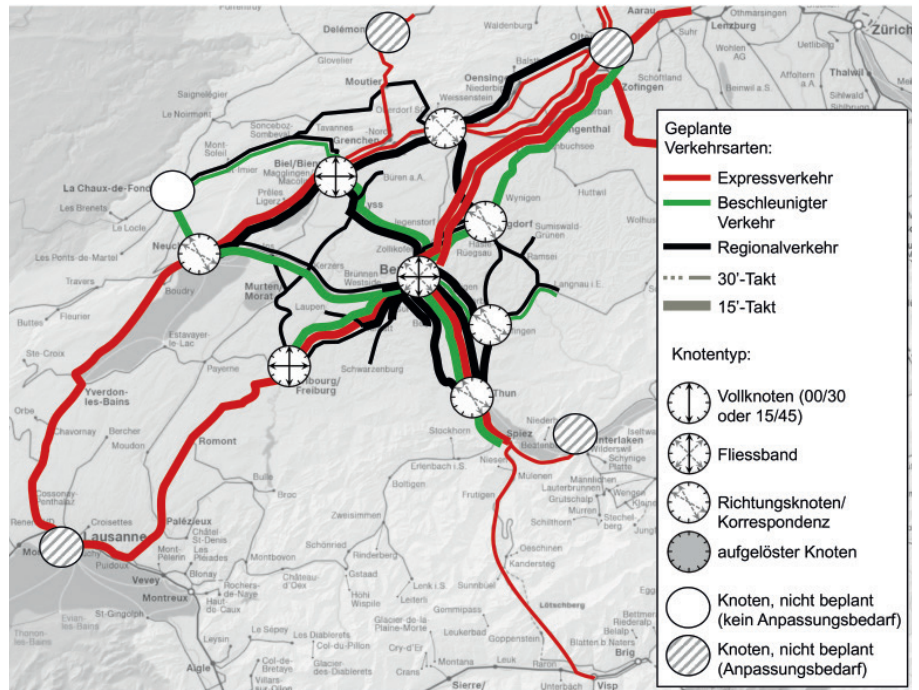
5: Vergleich Bedarf an Perrongleisen



knoten (VK), Knoten mit Fliessband-Linien (FB) und aufgelöster Knoten (AG) als die drei aussagekräftigsten Knotentypen. Die Szenarien bauen auf dem Angebotskonzept zum AS 2035 auf.

Das Zugs-Mengengerüst im Personenverkehr sowie die Ausgestaltung der Knoten im Musternetz sind beispielhaft für das Szenario 15/15-FB aus Bild 6 ersichtlich. Der Expressverkehr ist in diesem Perimeter vollständig abgebildet, der beschleunigte Verkehr und der Regionalverkehr (grösstenteils im 15-Minuten-Takt verkehrend) jedoch nur im Kernbereich des Netzes. Die Anzahl langlaufender Güterverkehrs-Trassen ist gemäss dem vorgegebenen Mengengerüst aus AS 2035 enthalten.

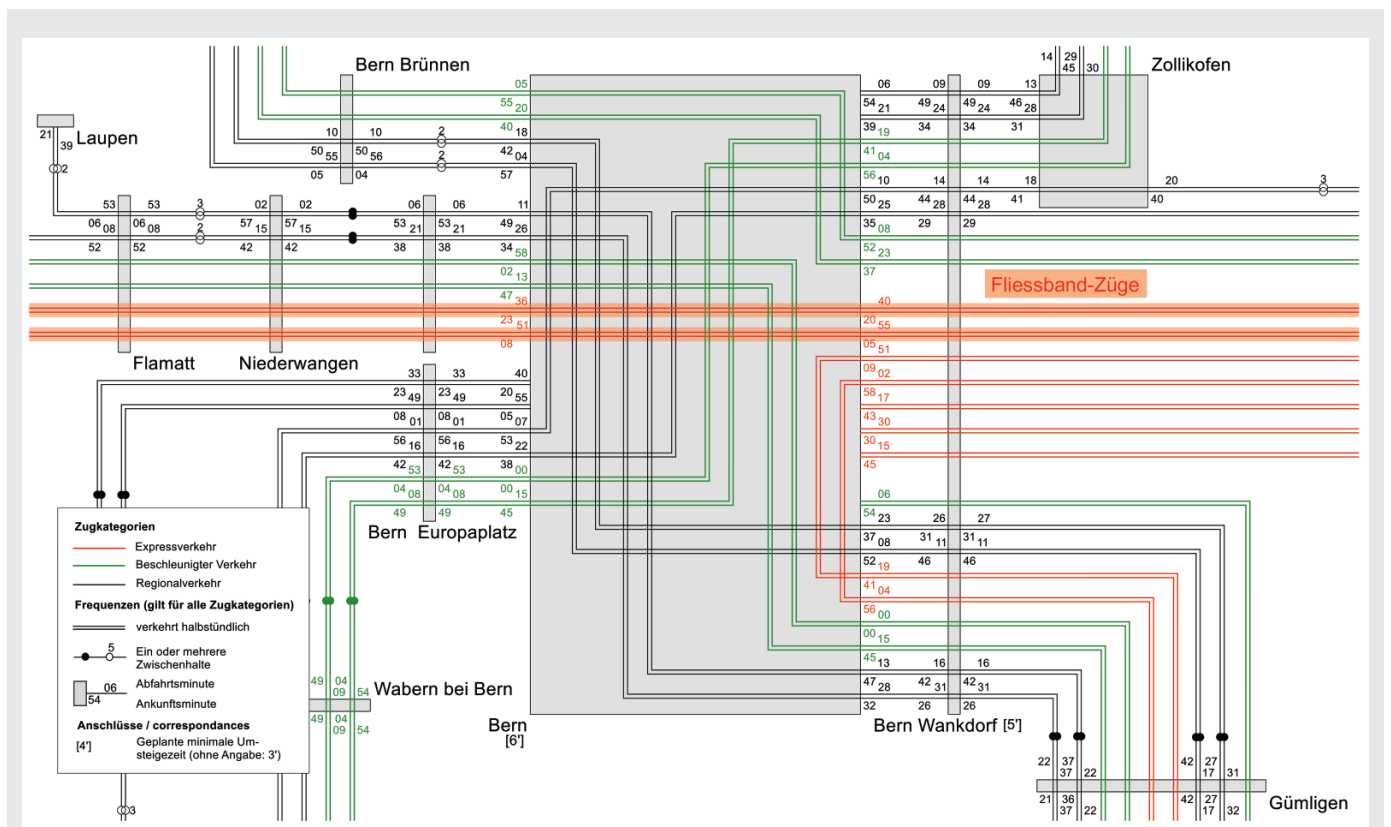
Eine der viertelstündlich verkehrenden Linien des Expressverkehrs im Knoten Bern verkehrt in diesem Beispiel im Fliessband-Prinzip. D.h. diese Linie verkehrt in der Achtel-Lage mit minimaler Aufenthaltszeit, jedoch verlängerten Umsteigezeiten von/nach den übrigen Linien, welche wie in einem Vollknoten in der viertelstündlichen Anschlussspinne verkehren. Die Konzeption erfolgte in einer Gesamtoptimierung der Angebotsqualität (u.a. Anschlüsse und Durchbin-



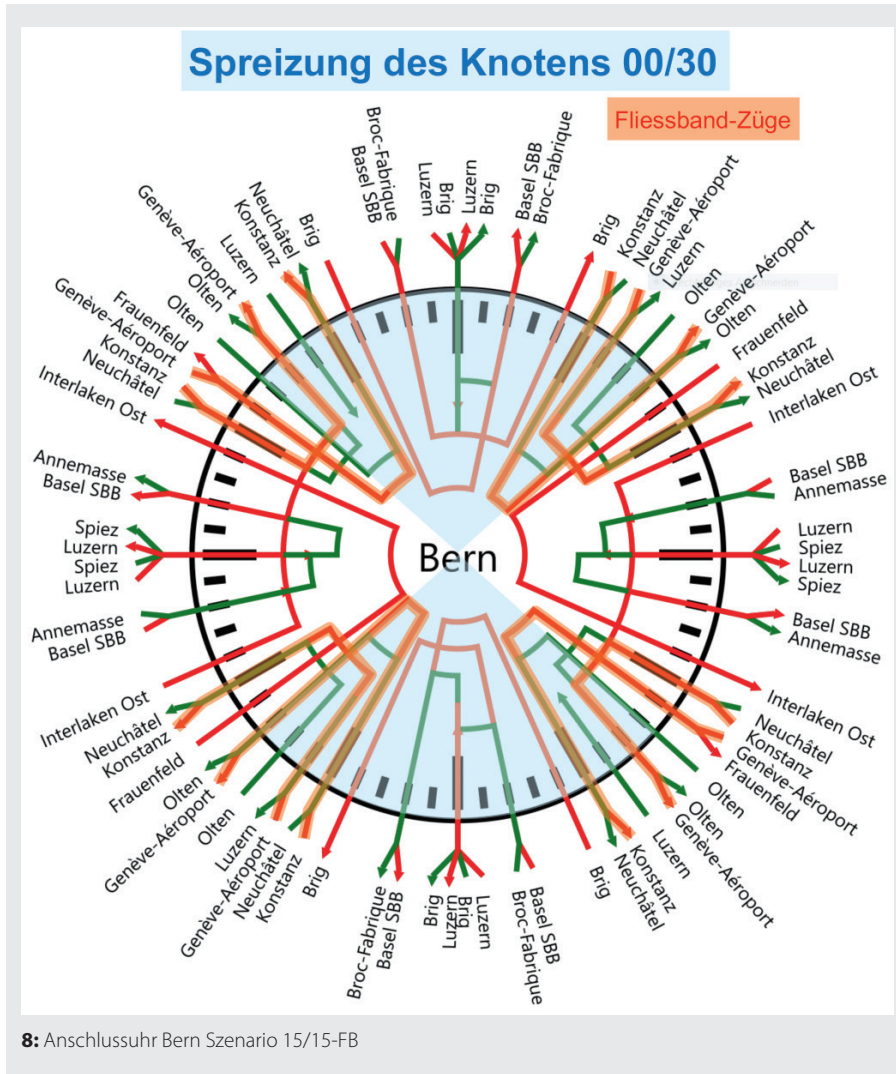
6: Perimeter und Taktichte Szenario 15/15-FB

dungen in den Knotenbahnhöfen) und des Infrastrukturbedarfs auf Strecken und in Knotenbahnhöfen. Dabei sind auch die

Trassen des Güterverkehrs resp. deren resultierende Qualität entsprechend berücksichtigt.

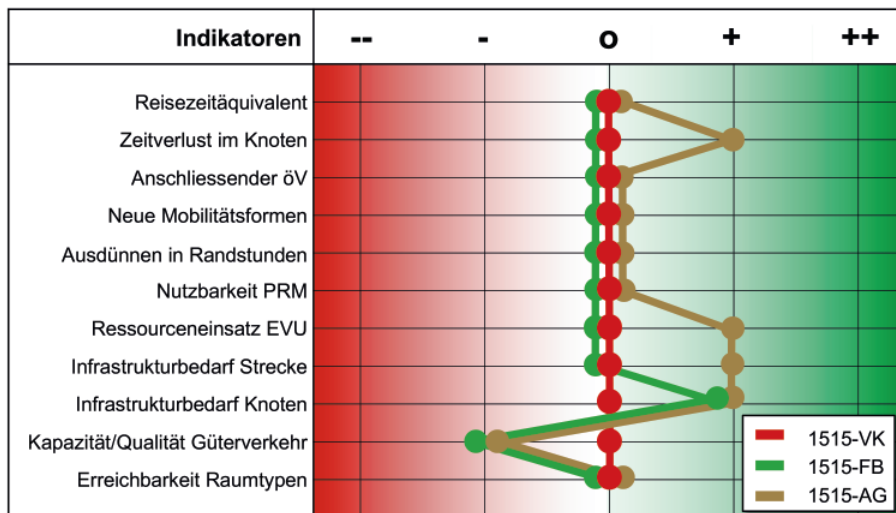


7: Ausschnitt Netzgrafik Szenario 15/15-FB



Ein Ausschnitt aus der Netzgrafik des beschriebenen Beispielszenarios ist in Bild 7 ersichtlich (eine Doppellinie entspricht einem Halbstundentakt), worin der

15-Minuten-Takt der Expresslinie als Fließband-Zug Zürich – Bern – Lausanne hervorgehoben ist.



9: Beurteilungsprofil der Indikatoren

In der entsprechenden Anschlussuhr des Knotens (siehe Bild 8, ohne Darstellung der Züge des Regionalverkehrs) ist die Spreizung der Anschlussspinne um die Minute null von Minute 52 bis Minute 08 (resp. analog in der halben Stunde) ersichtlich.

Auf Grund der nach wie vor grossen Zugzahl in der Anschlussspinne überlappen sich diese mit den Fließband-Zügen.

### 6. Wirkungsanalyse Szenarien

Die im Musternetz vertieft geplanten Szenarien waren im Anschluss auf ihre Wirkung zu überprüfen. Dazu diente ein Set von Indikatoren, welche quantitativ und vereinzelt qualitativ beurteilt wurden. Aus Bild 9 sind die Indikatoren sowie die Wertprofile für die drei Knotentypen (VK: Vollknoten / FB: Fließband / AG: Aufgelöst) bei 15-Minuten-Takten ersichtlich.

Zur Auswertung hat SMA und Partner AG eine mit der Nachfrage gewichtete Angebotsanalyse (Reisezeitäquivalente aus Reisezeit, Verbindungsdichte und Umsteigehäufigkeit) innerhalb des Musternetzes sowie von/nach relevanten Einzugsgebieten im Einflussperimeter durchgeführt. Die Angebotsanalyse wurde ebenso beigezogen für die Beurteilung der Ausdünnbarkeit in Randstunden (grundsätzliche vereinfachende Annahme: halbierte Angebotsdichte), mit einer verlängerten Umsteigezeit für die Einschätzung der Nutzbarkeit durch Personen mit eingeschränkter Mobilität (PRM) sowie für die Beurteilung der Wirkung auf die Erreichbarkeit verschiedener Raumtypen der Schweiz. Die Kompatibilität mit dem anschliessenden Angebot des öffentlichen Verkehrs und mit künftigen neuen Mobilitätsformen liess sich qualitativ beurteilen. Für den Ressourceneinsatz von Eisenbahn-Verkehrsunternehmen (EVU) diente der berechnete Rollmaterialbedarf des Systemangebots. Der Infrastrukturbedarf wurde anhand der Anzahl zusätzlicher Gleiskilometer und der Anzahl einfacher bis komplexer punktueller Massnahmen in den Knotenbahnhöfen verglichen. Die Qualität der Güterverkehrstrassen liess sich anhand ausgewählter Fahrzeiten beurteilen.

### 7. Ergebnisse Szenarien

Es zeigt sich – übereinstimmend sowohl bei den theoretischen Modellknoten als auch bei den Szenarien im Anwendungsbei-

spiel – ein Übergangsbereich des Anwendungsfeldes von Vollknoten zu weiteren Knotentypen bei einem 15-Minuten-Takt. Die Angebotsqualität ist bei dieser Taktichte mit einer Knotenauflösung etwa gleichwertig bis geringfügig besser als bei einem Vollknoten, wobei im Knoten durchgebundene Verbindungen von kürzeren Aufenthaltszeiten profitieren, einzelne Umsteigeverbindungen umgekehrt jedoch verlangsamt werden. Entsprechend sind die nachfragestärksten Verbindungen mit möglichst kurzen Standzeiten durchzubinden und weitere nachfragestarke Relationen dennoch weiterhin mit einem kurzen Anschluss zu planen. Weiter ist bei einer Knotenauflösung und bei Fließband-Konzepten ab einem 15-Minuten-Takt darauf zu achten, dass eine allfällige Ausdünnung des Angebots in Randstunden nicht zu einer globalen Verschlechterung der Transportketten führt.

Ein aufgelöster Knoten zeigt ab einem 15-Minuten-Takt ausserdem potenzielle Vorteile bezüglich effizienterer Kapazitätsnutzung der Infrastruktur resp. geringerem Infrastruktur-Ausbaubedarf sowie weniger ausgeprägt auch bezüglich des Ressourcenbedarfs für die Produktion. Potenziell reduzierter Infrastrukturbedarf entsteht in Knoten im Wesentlichen durch die kürzeren Standzeiten der Personenzüge, auf den Strecken durch die grösseren Freiheitsgrade bei der Trassenplanung. Nachteilig könnte sich ein Fließband-System oder eine Knotenauflösung auf Grund der regelmässigeren Verteilung der Trassen des Personenverkehrs hingegen auf die Trassierbarkeit des Güterverkehrs auswirken. Hier besteht die Gefahr, dass die Qualität der Güterverkehrs-Trassen insbesondere auf Mischverkehrsstrecken sinken könnte, resp. umgekehrt der Vorteil einer effizienteren Kapazitätsnutzung bei angemessener Priorisierung von Güterverkehrs-Trassen wieder verkleinert würde. Der höhere Freiheitsgrad bei der Trassenplanung ergibt jedoch auch das Potenzial – durch „Entbündelung“ der Trassen – eine erhöhte Priorität auf die Betriebsstabilität und -qualität zu legen.

## 8. Anwendungsbereich und Vertiefungsbedarf

Die im Rahmen der Forschungsarbeit von SMA und Partner AG gewonnenen Erkenntnisse basieren ressourcenbedingt auf einer Betrachtung eines singulären Knotens resp. auf einem Musternetz mit einem zentralen grösseren Knotenbahnhof. Eine Übertrag-

barkeit auf das gesamte nationale Netz der Schweiz ist mit einer entsprechenden Erweiterung des Betrachtungsperimeters zu überprüfen. Es empfiehlt sich zudem, eine Analyse alternativer konzeptioneller Ansätze wie z.B. eine Priorisierung des Güterverkehrs, eine weitergehende Angebotssystematisierung oder eine Reduktion der Anzahl Produktkategorien im Personenverkehr vorzunehmen. Weiterer Forschungsbedarf wurde ausserdem bezüglich der Wirkungsbeurteilung der Knotentypen auf die Betriebsstabilität sowie bezüglich zweckmässiger Ansätze für Randstundenangebote identifiziert.

## 9. Fazit

Aus den Erkenntnissen der Forschungsarbeit lässt sich die Schlussfolgerung ziehen, dass das Auflösen von Vollknoten des Fernverkehrs in grösseren Knoten bei 15-Minuten-Takten grundsätzlich prüfungswert ist. Die Angebotsqualität ist über alle Verbindungen gesehen gegenüber einem Vollknoten etwa gleichwertig. Es sind jedoch potenziell weniger Infrastrukturmassnahmen notwendig: sowohl im Knoten, im Wesentlichen durch die kürzeren Standzeiten, als auch auf den Strecken durch die grösseren Freiheitsgrade bei der Trassenplanung. Entsprechende Konzepte sind bezüglich Betriebsstabilität zu überprüfen.

Die Wirkung einer Knotenauflösung auf die Angebotsqualität lässt sich wie folgt differenzieren: Durchgebundene Verbindungen profitieren von kürzeren Aufenthaltszeiten, einzelne Umsteigeverbindungen können sich jedoch auch verlangsamen. Entsprechend sind die nachfragestärksten Verbindungen durchzubinden und weitere nachfragestarke Relationen weiterhin mit einem kurzen Anschluss zu planen.

Bei einer Knotenauflösung ist besonderes Augenmerk darauf zu legen, dass die Ausdünnung des Angebots in Randstunden nicht zu einer Verschlechterung der Transportketten führt, weshalb solche Konzepte bereits zu einem frühen Zeitpunkt mit zu planen sind. Zudem ist bei der Konzeption des Gesamtsystems auf die Qualität der Güterverkehrs-Trassen zu achten resp. diesen die entsprechende Priorität einzuräumen. •

Der gesamte Forschungsbericht wurde hier publiziert.  
<https://www.svi.ch/de/publikationen/svi-2018005-taktverdichtung-im-bahnverkehr-2e82/>

## Summary

### Increasing the frequency of rail transport in Switzerland, considering the junction principle

Long-distance transport in Switzerland is characterized by junctions which allows optimized connections and thus network-wide travel chains due to coordinated time tables. In relation to a further future densification of the offer to a 15 minutes-frequency and closer, the present scientific research shows what the effects of a partial or complete dissolution of connection spider webs are, among other things, on the networkwide travel times and the capacity utilization of the infrastructure.