

HSR Hochschule für Technik Rapperswil

ZUKUNFT DES TAKTFAHRPLANS

Ein Vergleich mit Datennetzen

Prof. Beat Stettler

20. August 2019

Gründung	■ 1972
Trägerkantone	■ St. Gallen, Schwyz, Glarus
Ausbildung	■ Rund 1450 Studierende
Weiterbildung	■ Über 500 Studierende/Kursteilnehmende
Mitarbeitende	■ Rund 550 Voll- und Teilzeitmitarbeitende
Dozierende	■ Davon ca. 70 Professoren, 170 Dozenten
Umsatz	■ 86.6 Mio.

- **Elektrotechnik**
- **Erneuerbare Energien und Umwelttechnik**
- **Informatik**
- **Maschinentechnik | Innovation**
- **NEU: Wirtschaftsingenieurwesen**
- **Bauingenieurwesen**
- **Landschaftsarchitektur**
- **Raumplanung**

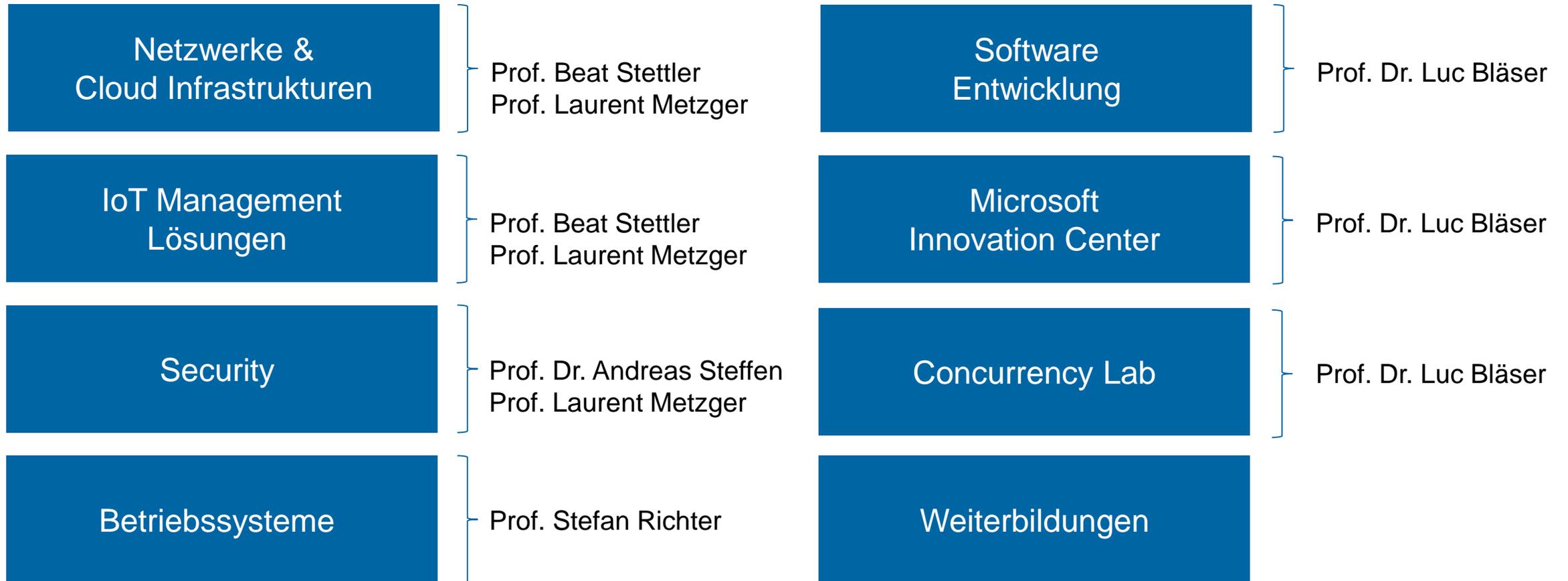


- **Anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung, kurz: aF&E**
- **Entwicklung von praxisorientierten Lösungen in allen Fachbereichen**
- **Zusammenarbeit mit Projektpartnern**
- **Über 200 festangestellte Mitarbeitende (ohne Studierende)**
- **Umsatz aus Industrieprojekten pro Jahr: ca. CHF 30 Mio.**
- **Neues Wissen fließt automatisch in die Lehre**



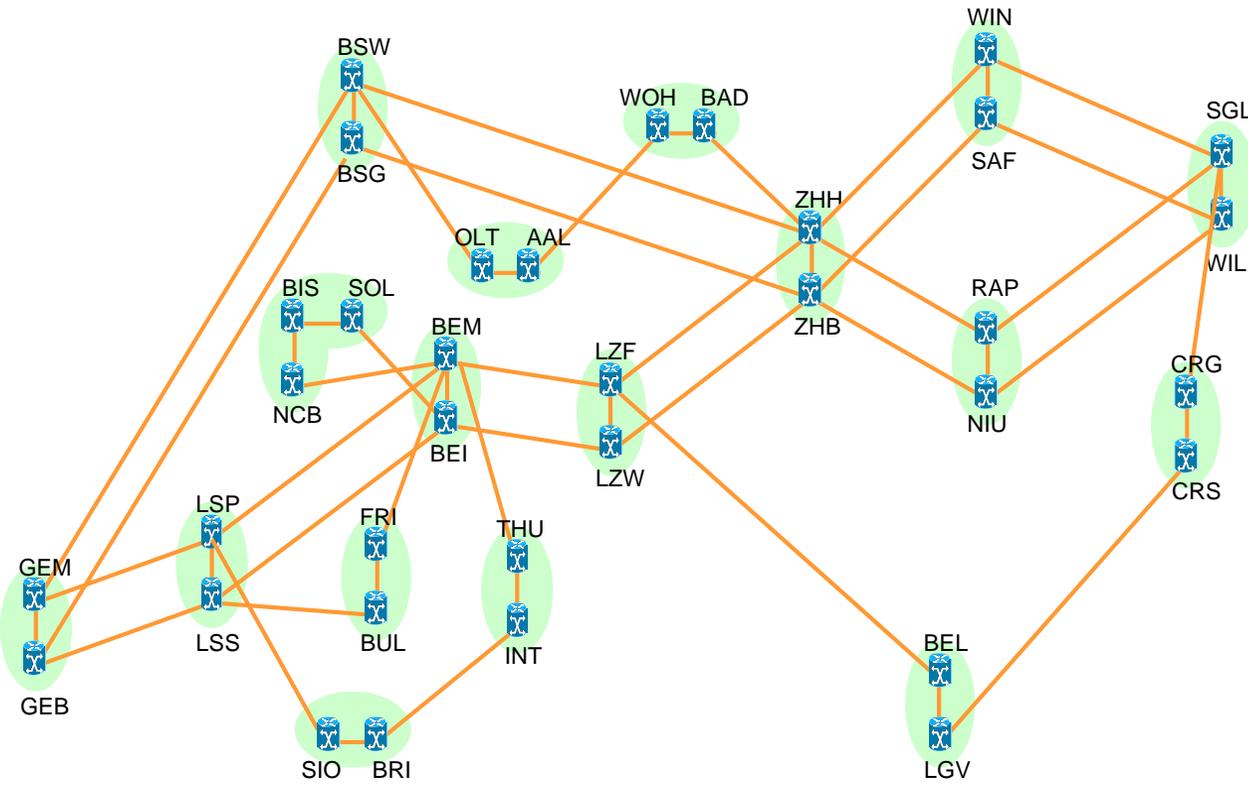
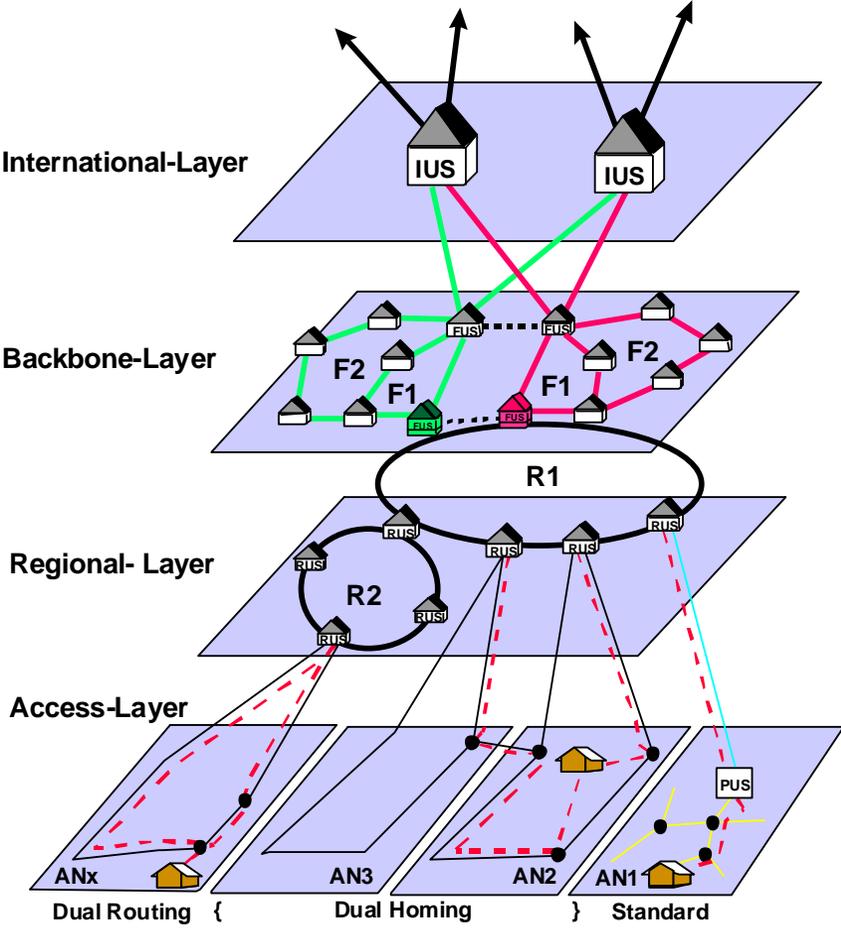
Das INS Kompetenzzentrum im Überblick

■ INS Institutsleiter: Prof. Dr. Andreas Steffen



- **Vergleich der Topologien**
- **Kapazität und Leistungsfähigkeit**
- **Auslastung**
- **Fahrplan vs. Scheduling**
- **Switches vs. Bahnhöfe**
- **Steuerung / Intelligenz**
- **Conclusions**

Netzhierarchien



Der Eisenbahn "Backbone"

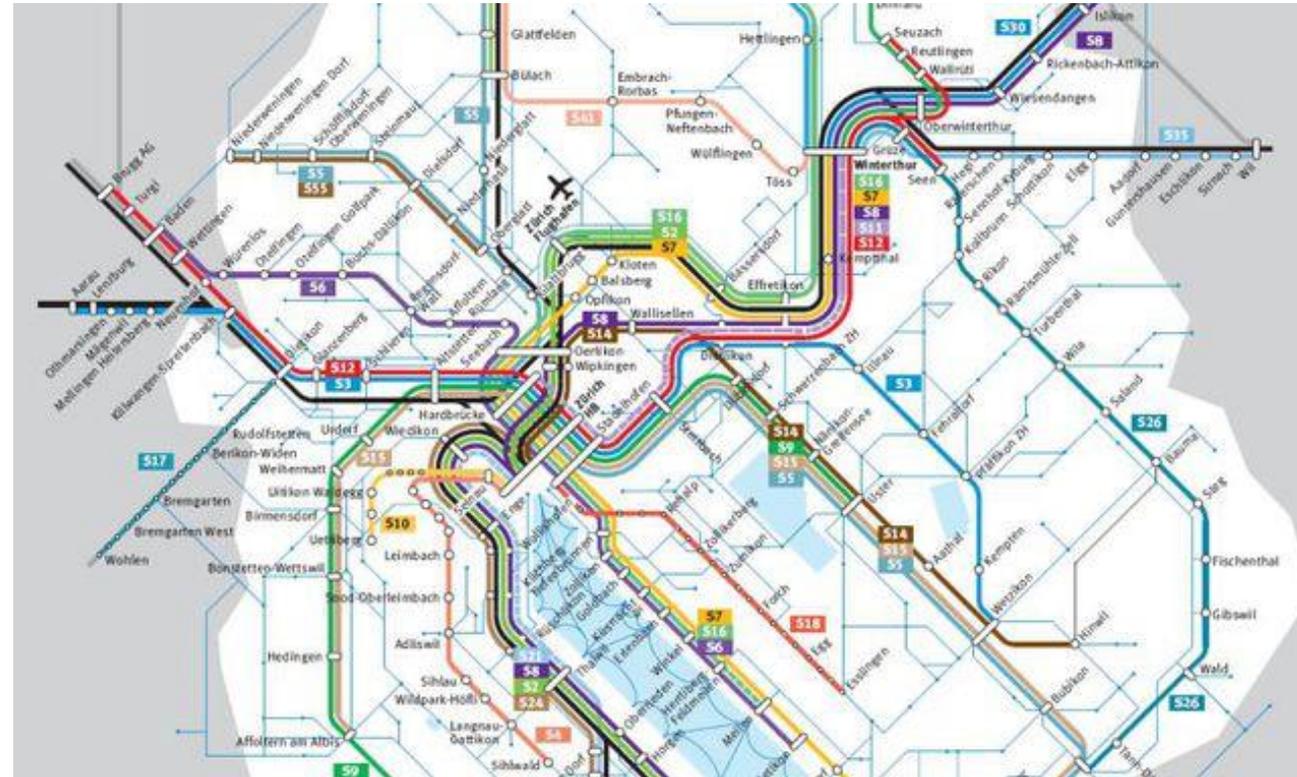
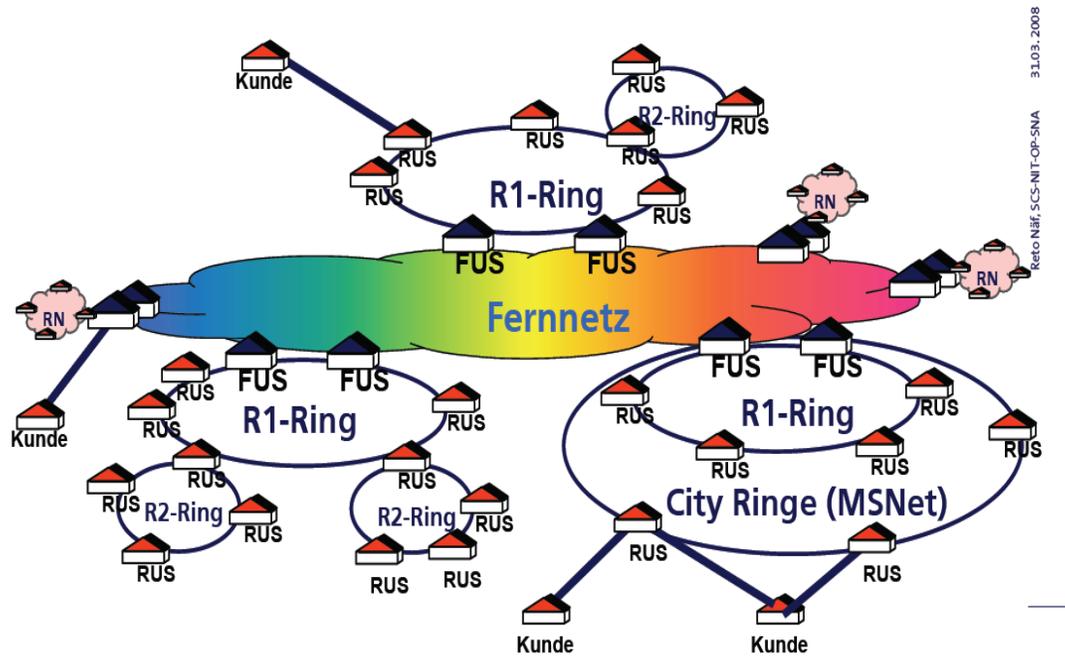
Ein starker SBB Fernverkehr für die Schweiz

Der nationale Fernverkehr auf einen Blick.

Ab 2018 sorgt die Nummerierung der Fernverkehrslinien für zusätzliche Orientierung.



Vergleich Distribution und Access

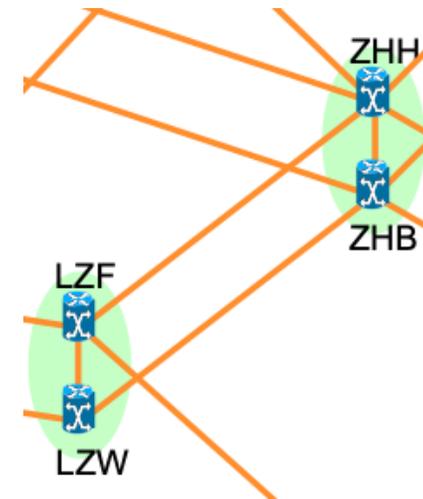


Zürich-Luzern by Train



- Mehrere Verzweigungen
- Fern, Regional und S-Bahnverkehr auf dem gleichen Gleis
- Unterschiedliche Geschwindigkeiten

Zürich-Luzern by Datanet



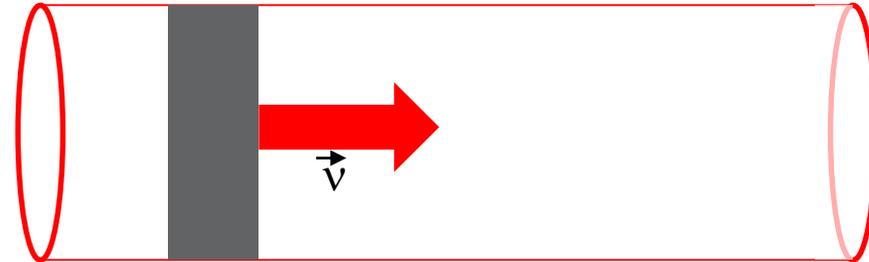
- "4 Gleisige" Leitung (2 x Full-Duplex)
- Ein Eingang / Ein Ausgang
- Alle Pakete fahren gleich schnell

Kapazität = Speichermenge



- Wieviele Datenpakete (Züge) passen in das Rohr?
- Abhängig von der Grösse der Datenpakete (Züge) und den Abständen dazwischen

Leistungsfähigkeit

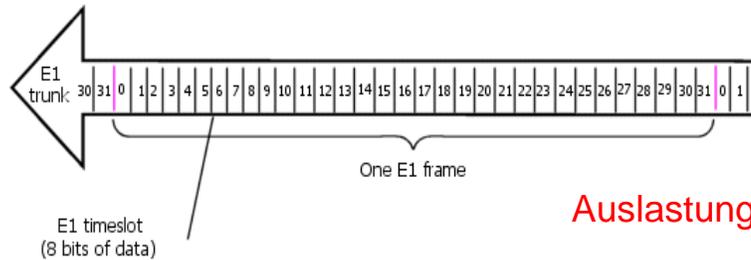


- Wieviele Daten (Passagiere/Güter) werden von A nach B transportiert
- Abhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Daten (Züge) übertragen werden und der Anzahl Bits/Baud (Passagiere/Güter pro Zug)

Vergleich der Kapazität

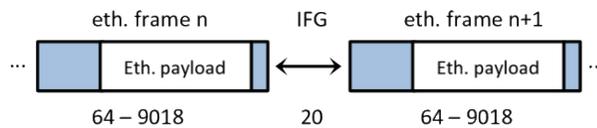
Datennetze

Beispiel (alte ISDN) Telefonie:



Auslastung: 100%

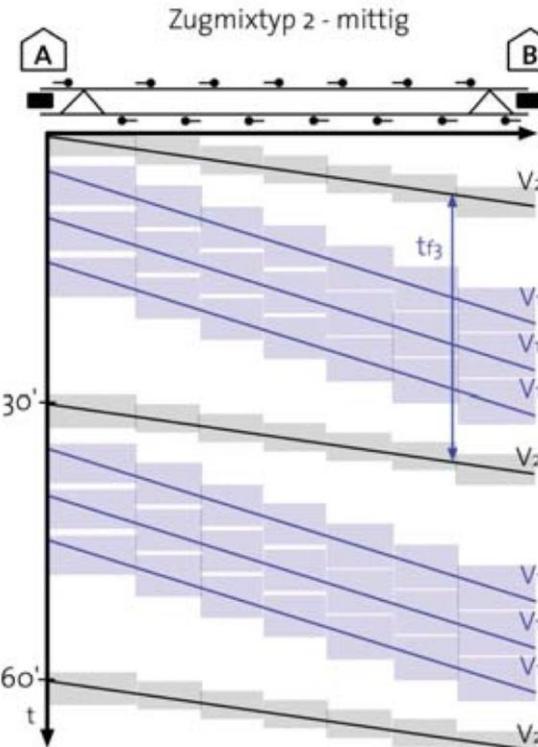
Beispiel Daten (Ethernet):



Auslastung: 68.8% - 99.8%

Kapazität abhängig von der Länge der Datenpakete und dem Abstand dazwischen

Eisenbahnnetze



Auslastung: wenige %

Quellen:
 (Zitate zu deren Lenkung
 ETH Zürich)

- Kapazität abhängig von Zugmixtyp resp. den damit verbundenen unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Fahrplan



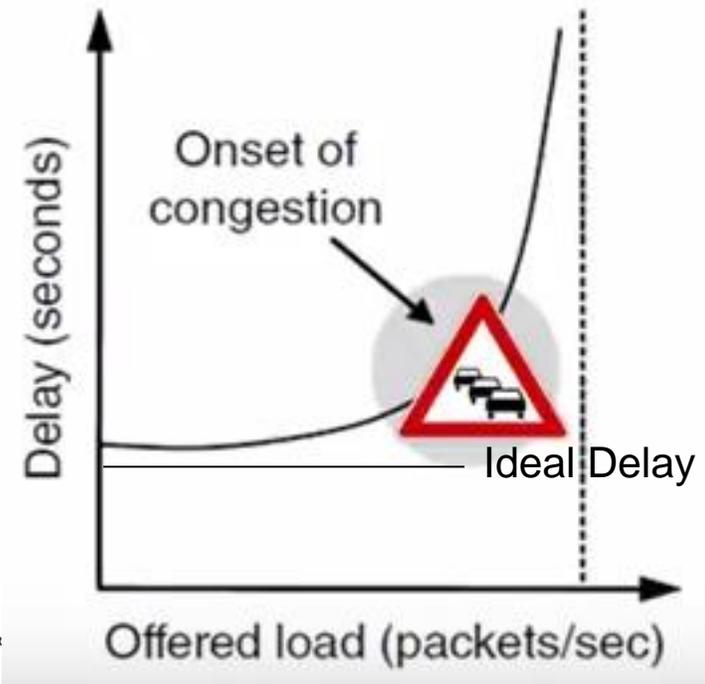
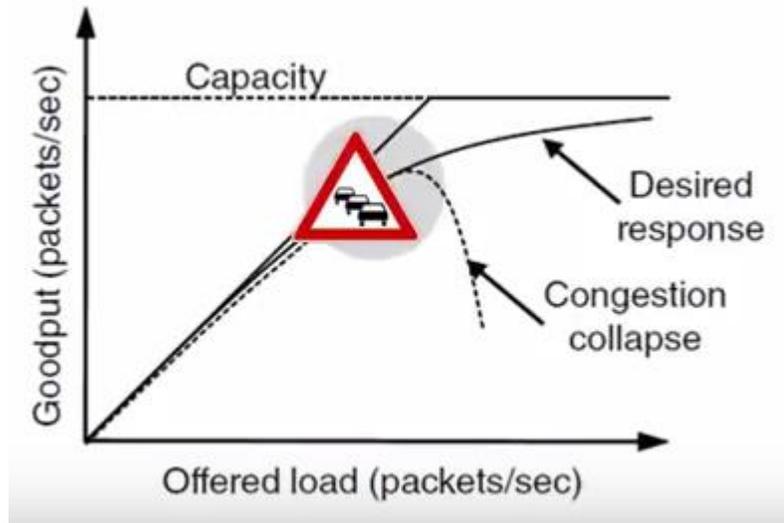
- Fixe Abfahrten zu genau festgelegten Zeitpunkten
- Eingeplante Pufferzeiten für Verspätungen
- Last = Angebotsgesteuert, dh. proaktive Planung notwendig

Scheduling



- Keine Regeln, wann Pakete “losfahren” dürfen
- Pakete dürfen kurz oder lang sein
- Last = Nachfragegesteuert, daher keine Planung (sondern nur Monitoring) nötig

Goodput vs. Throughput asynchroner Netze



■ Mit zunehmender Last (Packets/sec)

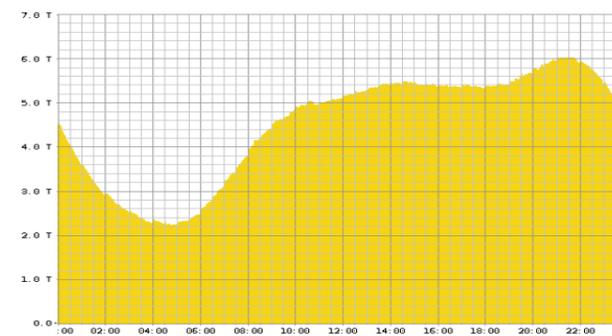
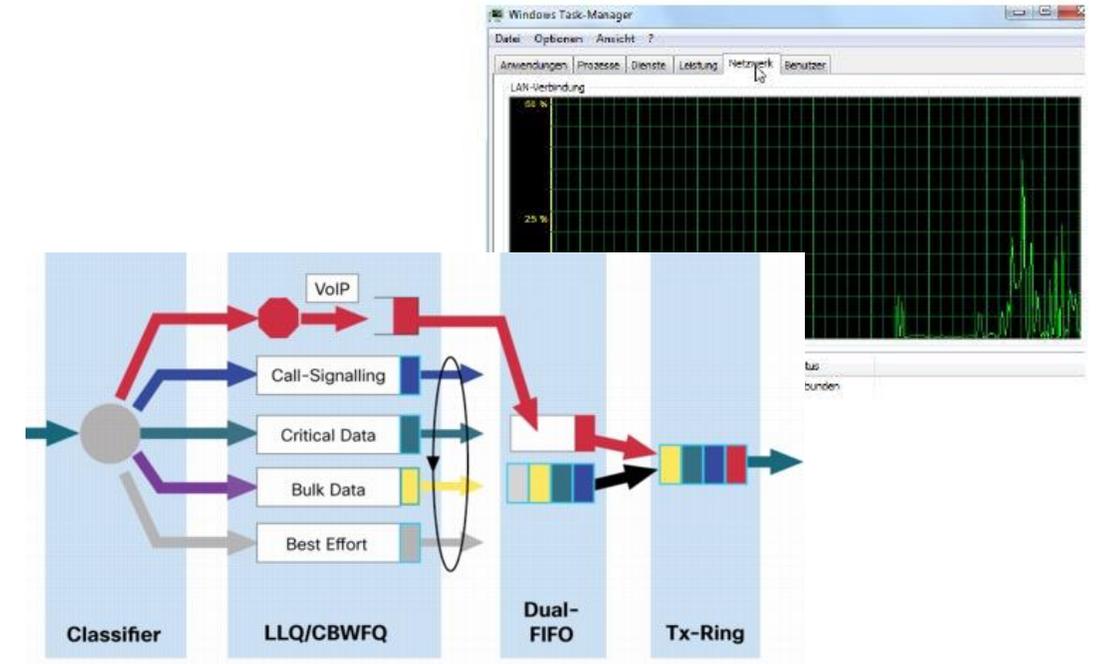
- nimmt der Packets/sec Durchsatz (Goodput) unterschiedlich zu
- nimmt die Verzögerung (Delay) überproportional zu

■ Auswirkungen von Überlast = Verstopfung

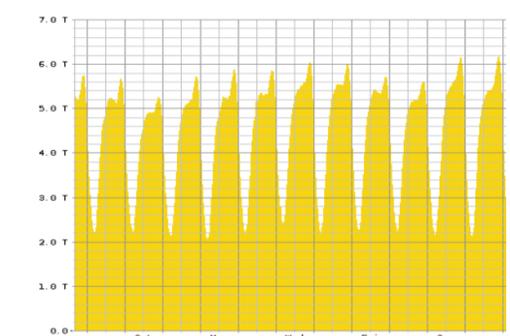
Congestion Control soll verhindern, dass das Netz überlastet wird.

Folgen der Asynchronität bei Datennetzen

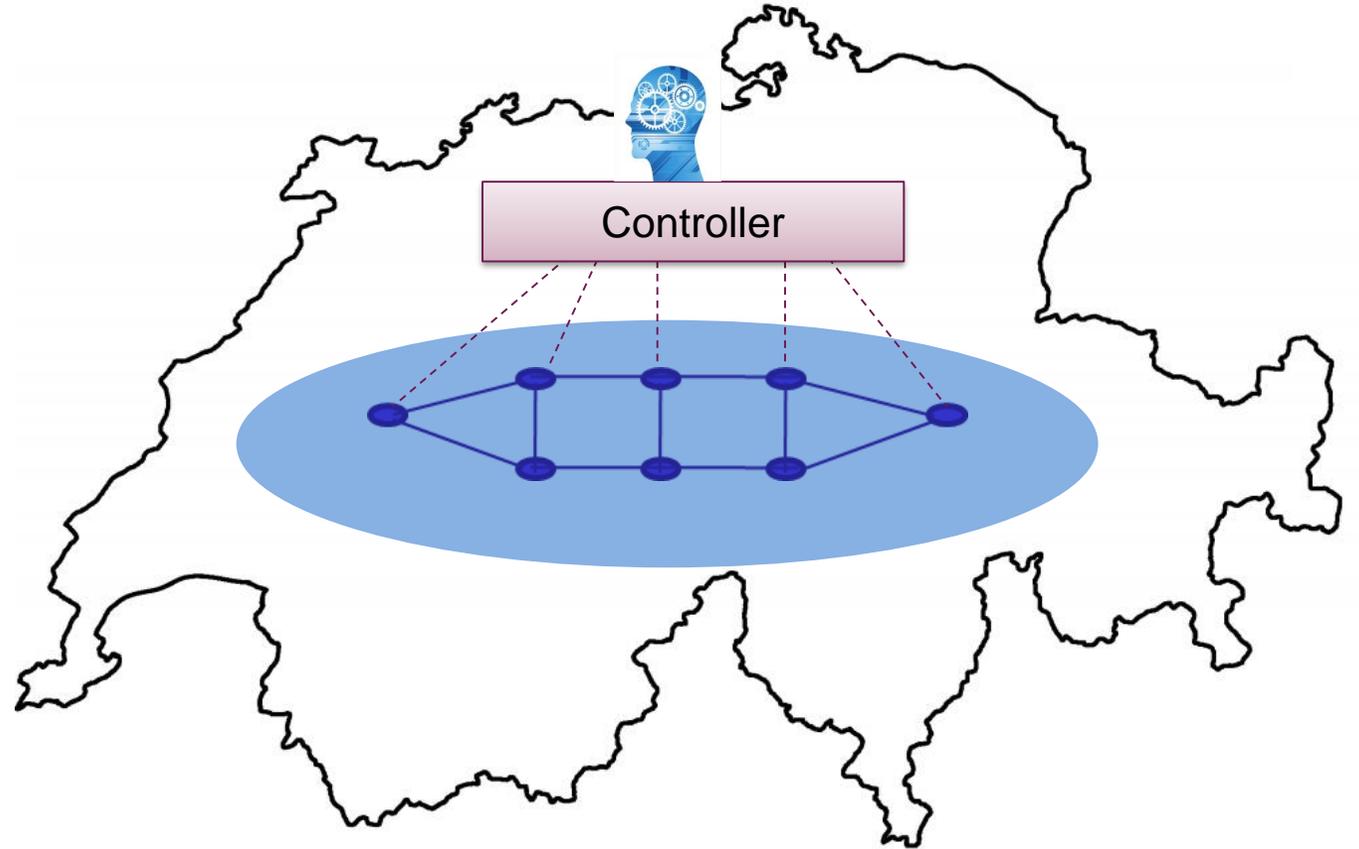
- Die Auslastung von Datennetzen ist »im Kleinen« (dh. v.a. im Access) nicht vorhersehbar, was zu Überlasten führt
- Überlasten werden mit prioritätsbasierten Queues (Warteschlangen) abgedeckt
- «Im Grossen» (dh. Core) hilft die Statistik, was zu vorhersehbaren Lasten führt und für die Planung der benötigten Kapazitäten genutzt wird



Traffic @ DE-CIX

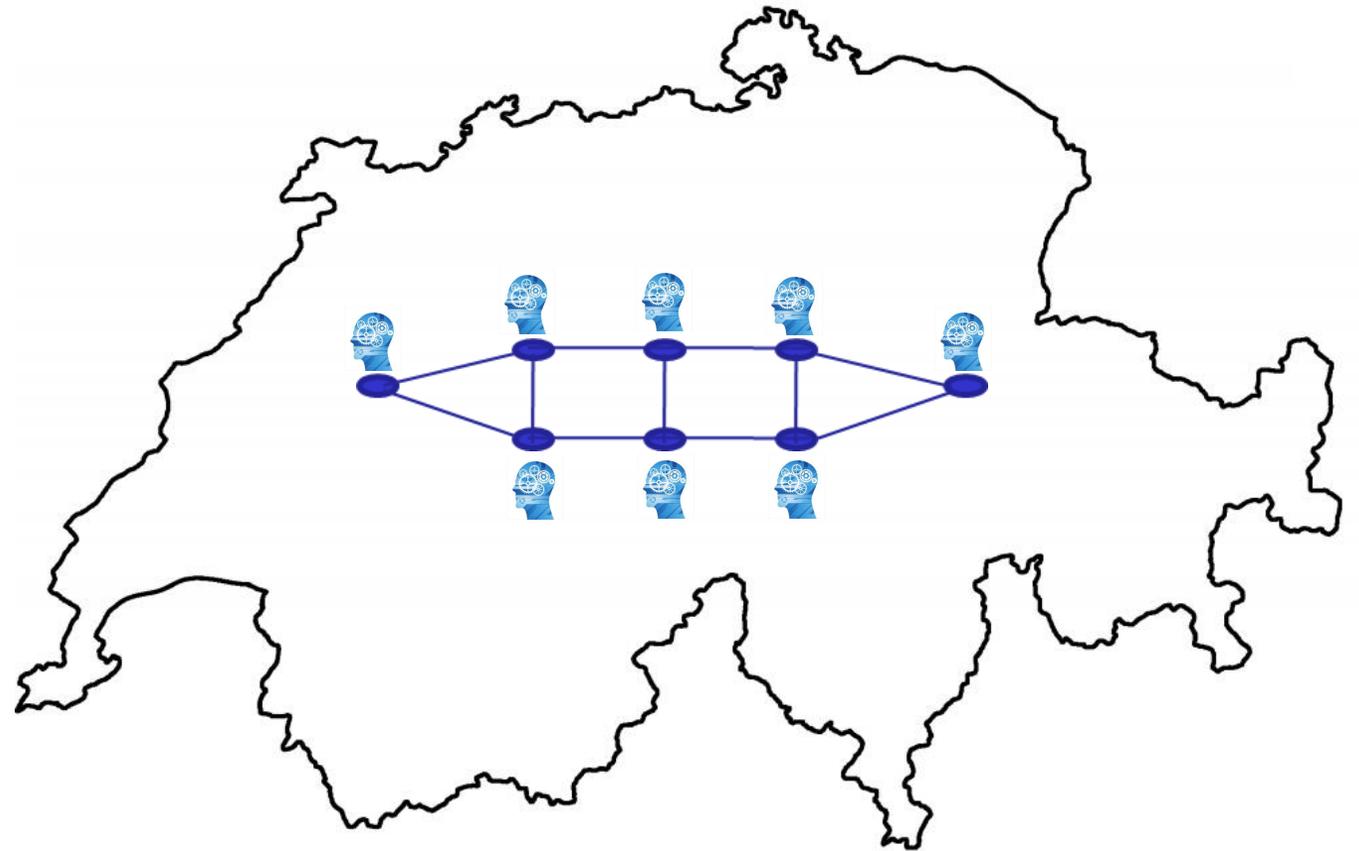


- Vor 30 Jahren: maximal zentralisiert



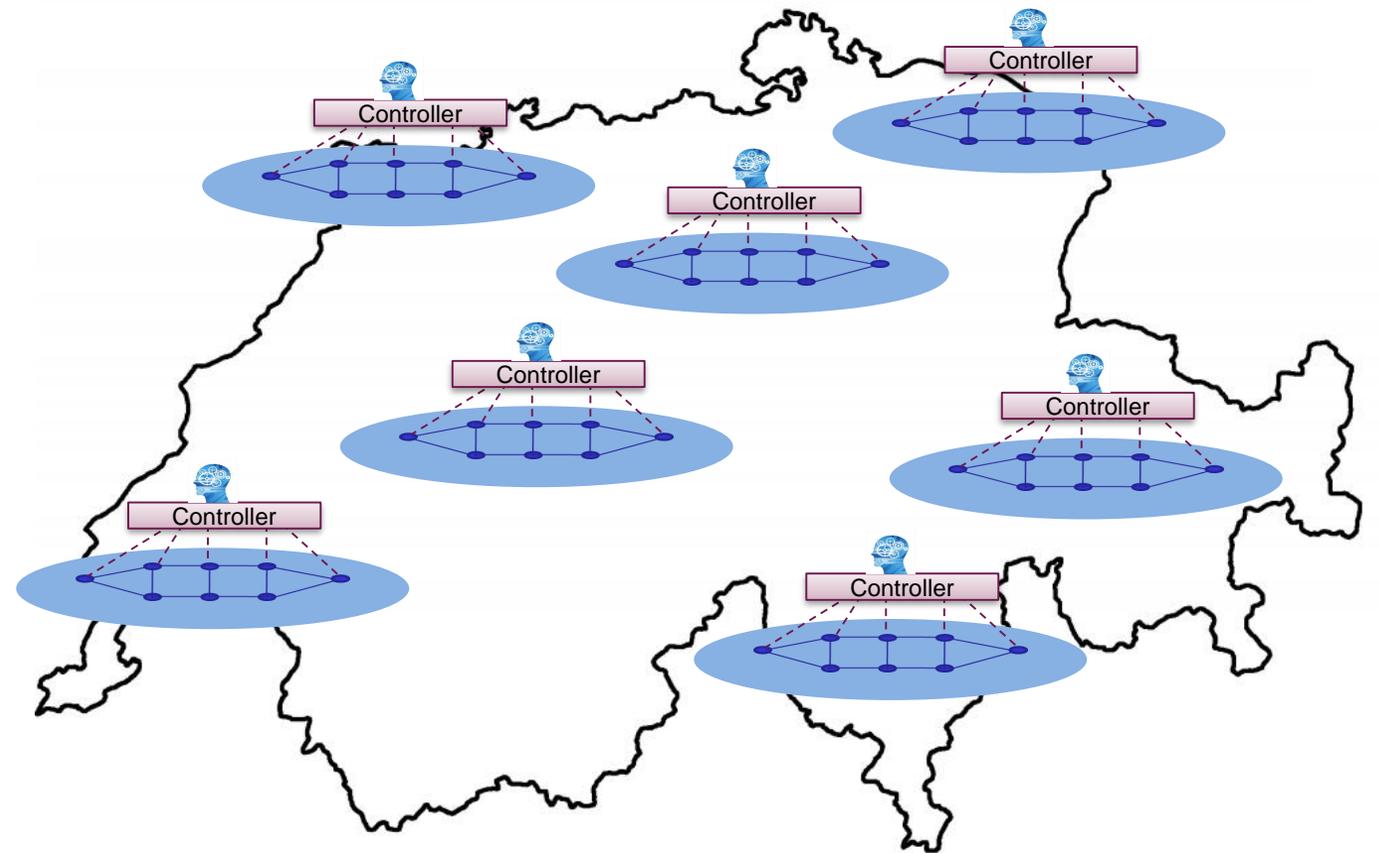
Steuerung resp. «Intelligenz» des Systems

- Vor 30 Jahren: maximal zentralisiert
- Vor 15 Jahren: maximal dezentralisiert



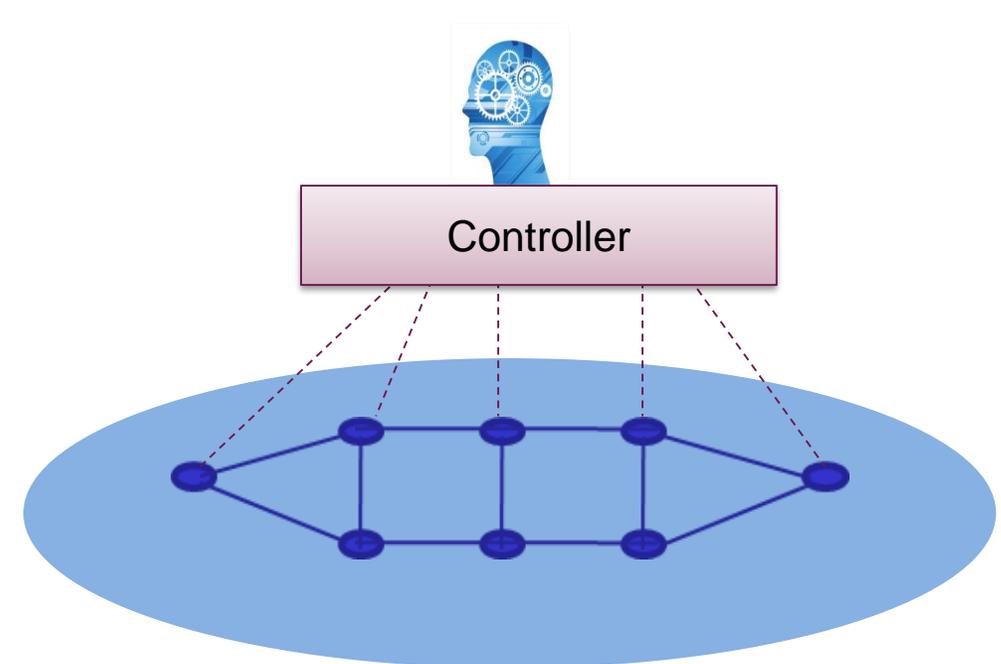
Steuerung resp. «Intelligenz» des Systems

- Vor 30 Jahren: maximal zentralisiert
- Vor 15 Jahren: maximal dezentralisiert
- Heute: Mix: Kleinere «zentralisierte» Bereiche, aber übergeordnete Dezentralisierung



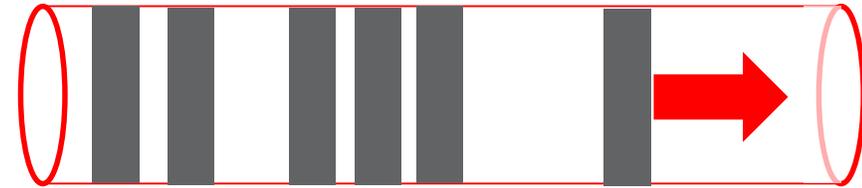
Grenzen der Zentralisierung von «Intelligenz»

- **Zentrale muss «alles sofort wissen», um die «richtigen Entscheide treffen zu können**
- **Die Komplexität wächst exponential mit der Anzahl zu steuernden Knoten -> führt zu grösserem CPU Bedarf und längeren Berechnungszeiten**
- **Mit wachsender Grösse der Zelle verlängern sich die Latenzen (Laufwege)**
- **Zentrale = potentieller Single-Point of Failure**
- **Was wenn Kommunikation zu Knoten unterbrochen?**

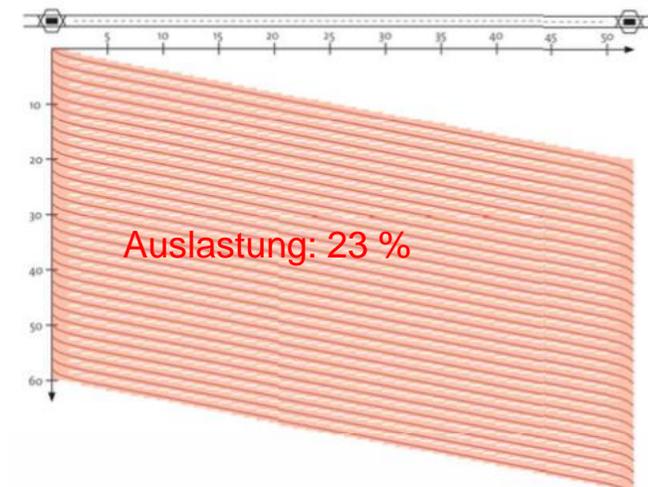
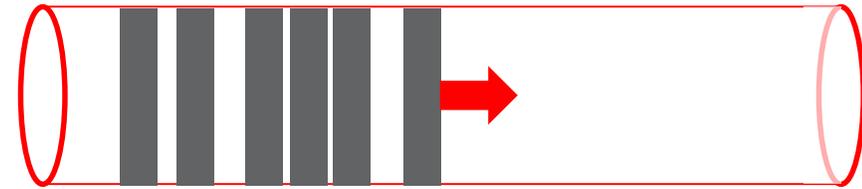


- **Eigenständige «Röhren» zwischen grösseren Abfahrt und Zielorten**
 - Schnelle für Core-Verbindungen
 - Langsamere für den Distribution Bereich
- **Alle Züge in einer Röhre fahren genau gleich schnell, damit kann der Abstand zwischen Zügen massiv reduziert werden**
- **Einheitliche Steuerung einer Röhre: alle reagieren gleichzeitig**
 - Entweder durch zentrale Steuerung
 - Direktkommunikation zwischen Zügen
- **Es fahren soviele Züge wie nötig (asynchron), dh. alle x Minuten eine Abfahrt**
- **-> damit klassischer Fahrplan hinfällig**

Core: «schnelle Verbindungen»



Distribution: «langsamere Verbindungen»



Streckendaten:

Länge: 52km

ETCS L2

Zugdaten:

Mittl. Geschw.: 160km/h

Länge: 400m

Zugfolgezeit: 2 Min.

⇒ Zugzahl: 30 Züge/h

Das Institut für vernetzte Systeme am schönen Obersee

