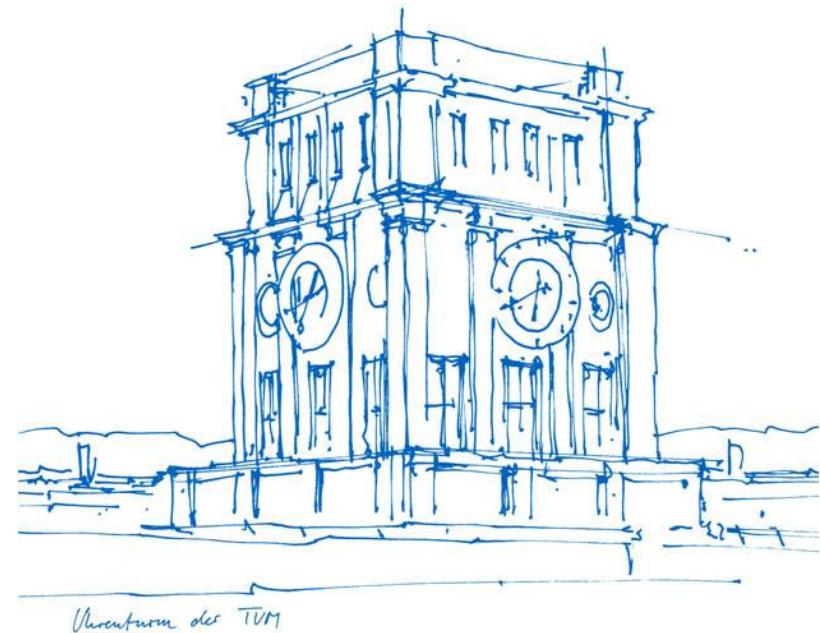


# Grundlagen des Bahnbetriebs

**Prof. Dr. Norman Weik**

Professur für Planung und Betrieb  
von Schienenverkehrssystemen (RTS)  
Technische Universität München

22.10.2025



# Bahnbetrieb

**Definition: Gesamtheit aller Tätigkeiten und Vorgänge zur Koordination, Regelung und Sicherung von Fahrten mit Schienenfahrzeugen auf einer Eisenbahninfrastruktur**

(nach Pachl)

Der Bahnbetrieb umfasst

- die Durchführung von Zug- und Rangierfahrten im Zusammenwirken von Eisenbahninfrastruktur- und Eisenbahnverkehrsunternehmen
- die Regelung des Zugangs zur Eisenbahninfrastruktur und die Koordinierung unterschiedlicher Nutzungsinteressen
- Das betriebliche Management des Systems, insbes. Disposition und Störfallmanagement



# Aufgaben

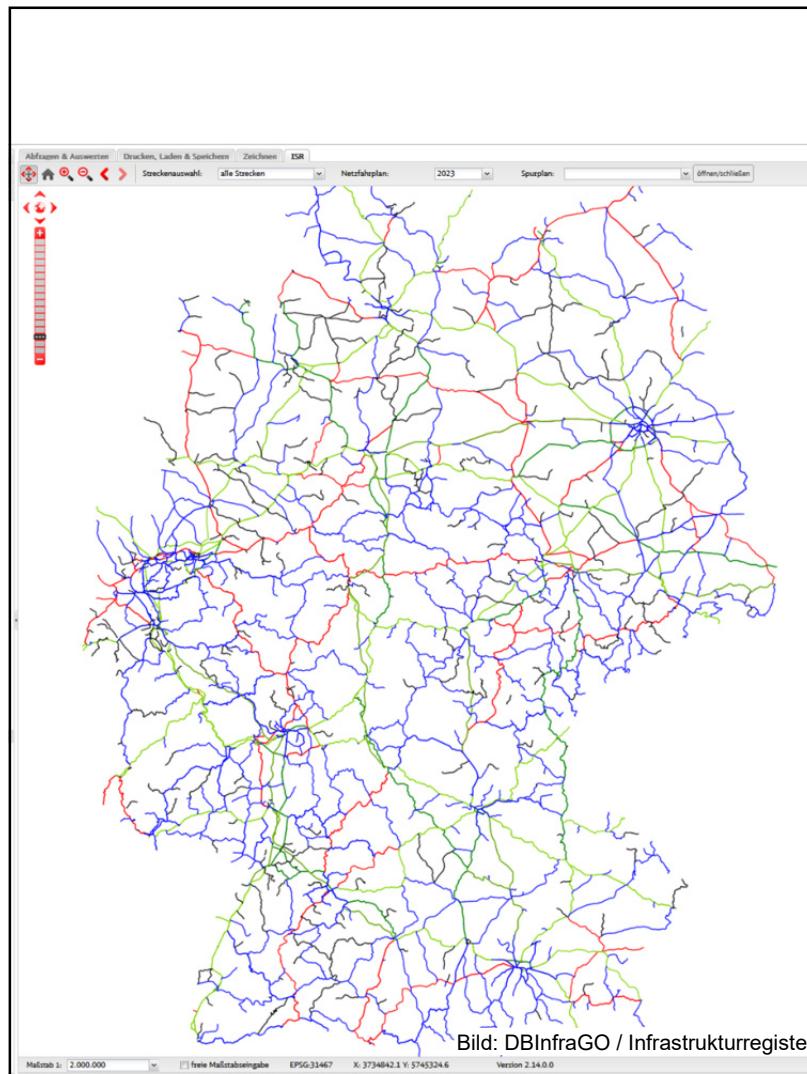
- **Betriebsplanung:** vorausschauende Festlegung des Angebots
- **Betriebsdurchführung:** Umsetzung des geplanten Angebots – Durchführung von Zug- und Rangierfahrten
- **Betriebsleitung:** Vergleich zwischen betrieblichem IST und Soll (Betriebsüberwachung) und Einleitung korrekter Maßnahmen bei Abweichungen vom Soll-Angebot (Disposition)
- **Betriebsanalyse:** Analyse des Betriebsprozesses und Ableitung von Verbesserungen



# Agenda



- 1) Durchführung des Bahnbetriebs
- 2) Grundlagen der Fahrplanung
- 3) Störungen und betriebliche Disposition
- 4) Leistungsfähigkeit von Bahnsystemen



# Systemeigenschaften der Eisenbahn

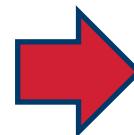
- Spurgeführtes Verkehrssystem
  - Geringer Verknüpfungsgrad  
~38.000 km Streckenlänge Bahn vs. 230.000 km Straßennetz (ohne städtische Netze)
  - Geringe Flexibilität bzgl. Routenwahl
  - Bedarf einer zentralen Koordinierung des Betriebs
- Rad-Schiene Kontakt
  - Geringe Reibung und lange Bremswege
  - Erlaubt hohe Beförderungsleistung, energieeffizient
  - Bedarf an Regelungen und technischen Hilfssystemen zur Gewährleistung der Sicherheit im Betrieb

## Bremswege

### Straßenverkehr

|                |       |   |
|----------------|-------|---|
| Auto (80 km/h) | 23,2m |  |
| LKW (80 km/h)  | 36,2m |  |
| PKW (120 km/h) | 56,6m |  |

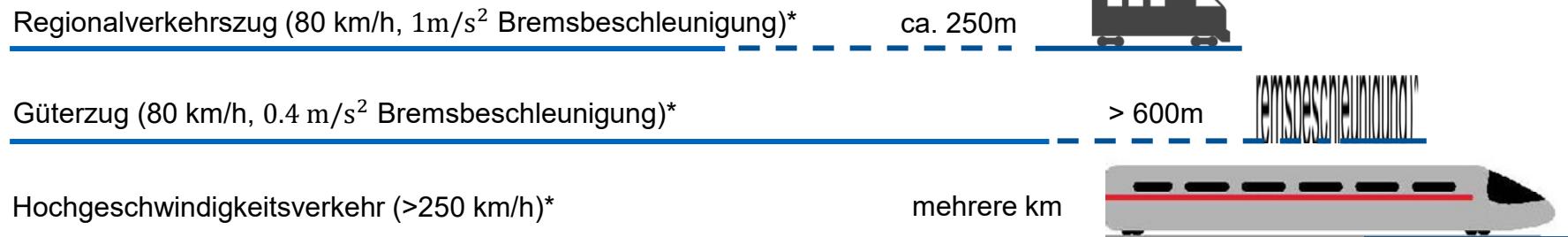
Quelle: ADAC



Bremsweg übersteigt das Sichtfeld des Triebfahrzeugführers

- Kein Fahren „auf Sicht“
- Koordination der Zugbewegungen und technische Lösungen zur Gewährleistung des sicheren Betriebs erforderlich

### Bahnverkehr



\* indikative Werte – exakte Werte abhängig von konkreter Zugzusammenstellung

## Bahnsysteme: Fahren im Raumabstand

### Fahren im relativen Bremswegabstand

- Nachfolgendes Fahrzeug muss in der Lage sein, auf Geschwindigkeitsänderung des vorangehenden Fahrzeugs schnell zu reagieren
- Typisches Sicherungsprinzip im Straßenverkehr, schwierig zu realisieren im Schienenverkehr



### Fahren im absoluten Bremswegabstand

- Distanz zum vorangehenden Fahrzeug ausreichend, um Folgefahrzeug innerhalb dieser Distanz zum Halt zu bringen
- Grenzfall im Schienenverkehr
- Erreichbar in modernen Zugsicherungssystemen (moving block)

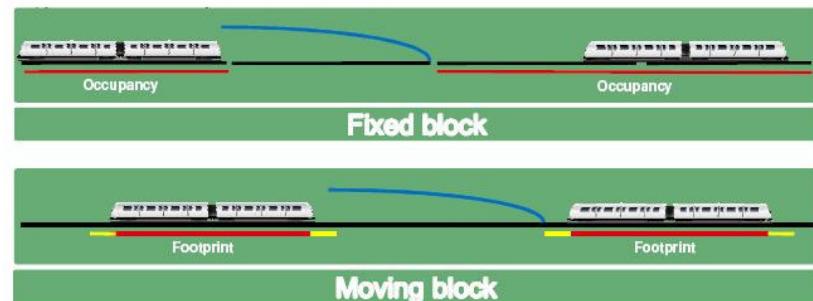


Bild: Israel.abad, CC-BY-SA 3.0

## Blocksignalisierung

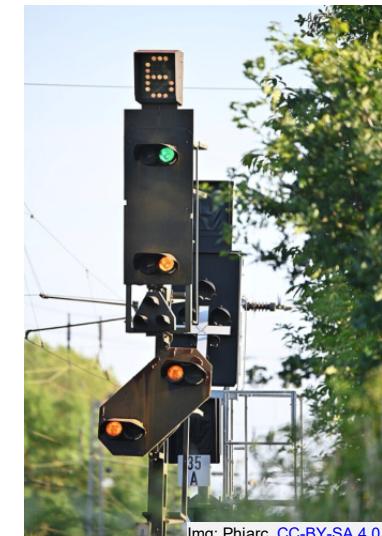
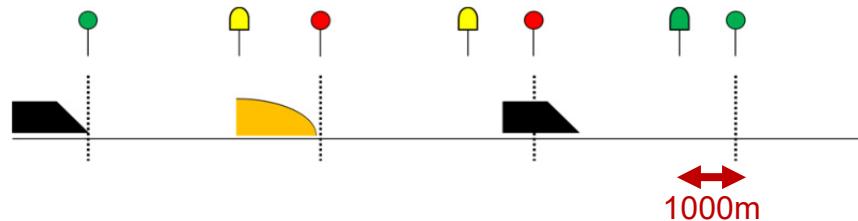
- Eisenbahninfrastruktur unterteilt in technisch gesicherte Segmente: *Strecken-/Bahnhofsblock*
- Blocksegment *geschützt* durch Signale
- Signal kann nur auf „Fahrt“ gestellt werden, wenn Blocksegment *freigeprüft/-gemeldet*



Bild: Weik

## Blocksignalisierung

- Eisenbahninfrastruktur unterteilt in technisch gesicherte Segmente: *Strecken-/Bahnhofsblock*
- Blocksegment *geschützt* durch Signale
- Signal kann nur auf „Fahrt“ gestellt werden, wenn Blocksegment *freigeprüft/-gemeldet*
- In Deutschland: Bremsweg bis zu 1000m (bei signalgestütztem Betrieb)
  - Triebfahrzeugführer bedarf Vorwarnung bzgl. Signalbegriff am Hauptsignal
  - Vorsignal (Regelabstand 1000m)



## Fahren im festen Raumabstand



### Zugsicherung bei höheren Geschwindigkeiten

- Geschwindigkeiten >160 km/h
  - Signalgestützte Zugsicherung nicht ausreichend
  - Lange Bremswege, große Blocklängen
- Kontinuierliche Zugsicherung/-beeinflussung mit Führerstandssignalisierung
- In Deutschland: LZB, zukünftig ETCS L2 oS
- Erlaubt kontinuierliche Geschwindigkeitsüberwachung und Zugbeeinflussung
- Voraussetzung für Betriebsgeschwindigkeiten >160km/h

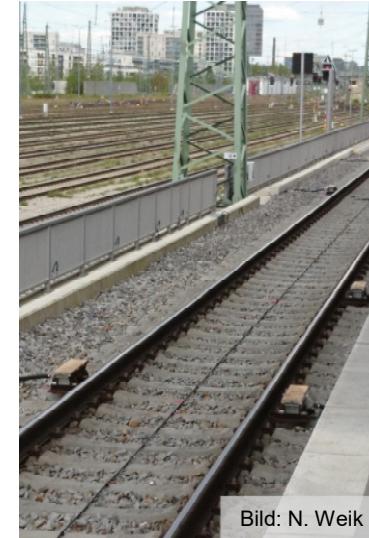


Bild: N. Weik

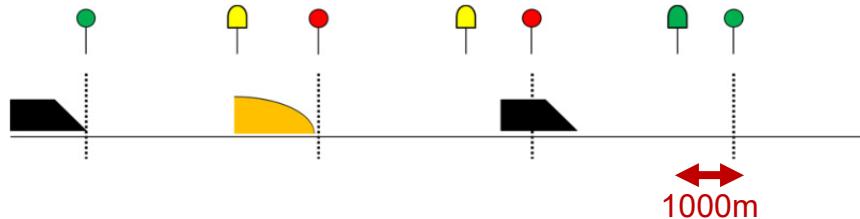


Bild: Andre\_de, [CC-BY-SA 4.0](#)

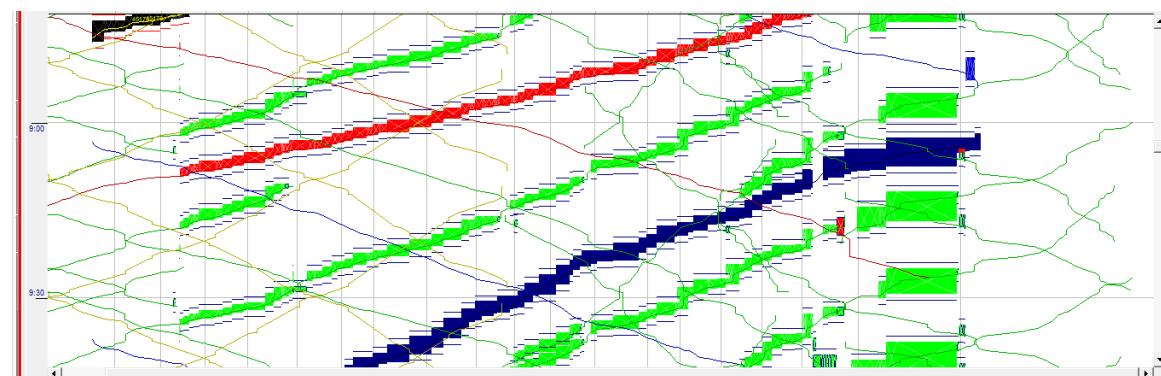
## Sperrzeiten

### Die Infrastrukturbeliebung einer Zugfahrt

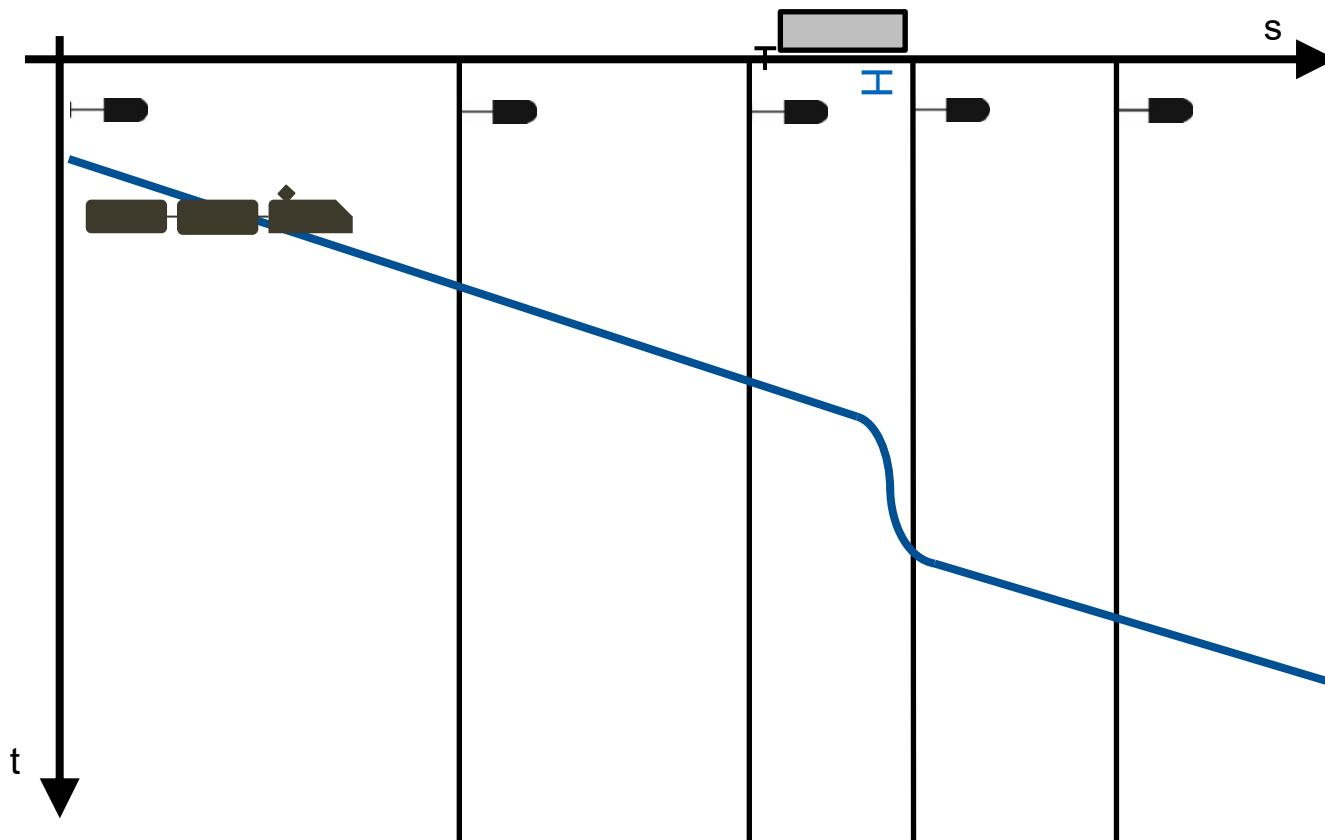
- Die Infrastrukturbeliebung einer Zugfahrt hängt ab von den Fahreigenschaften des Zuges sowie der sicherungstechnische Ausgestaltung der Infrastruktur
- Die Infrastrukturbeliebung wird durch die sog. **Sperrzeiten**, welche den Zeitraum, in dem ein Gleisabschnitt durch eine Fahrt betrieblich beansprucht wird und somit für andere Fahrten gesperrt ist, bezeichnet
- Infrastrukturbeliebung einer Zugfahrt: **Sperrzeitentreppe**



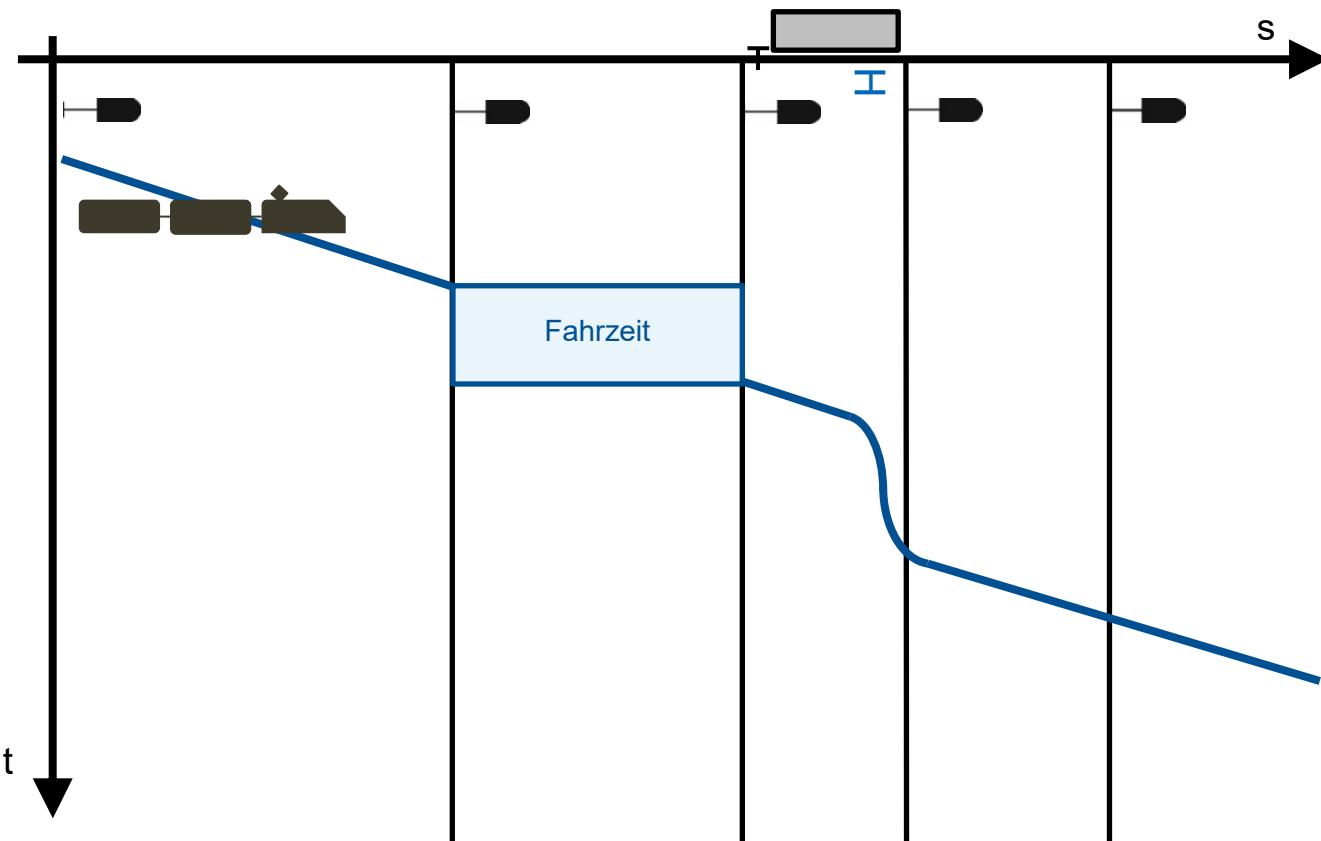
Img: Phiarc, CC-BY-SA 4.0



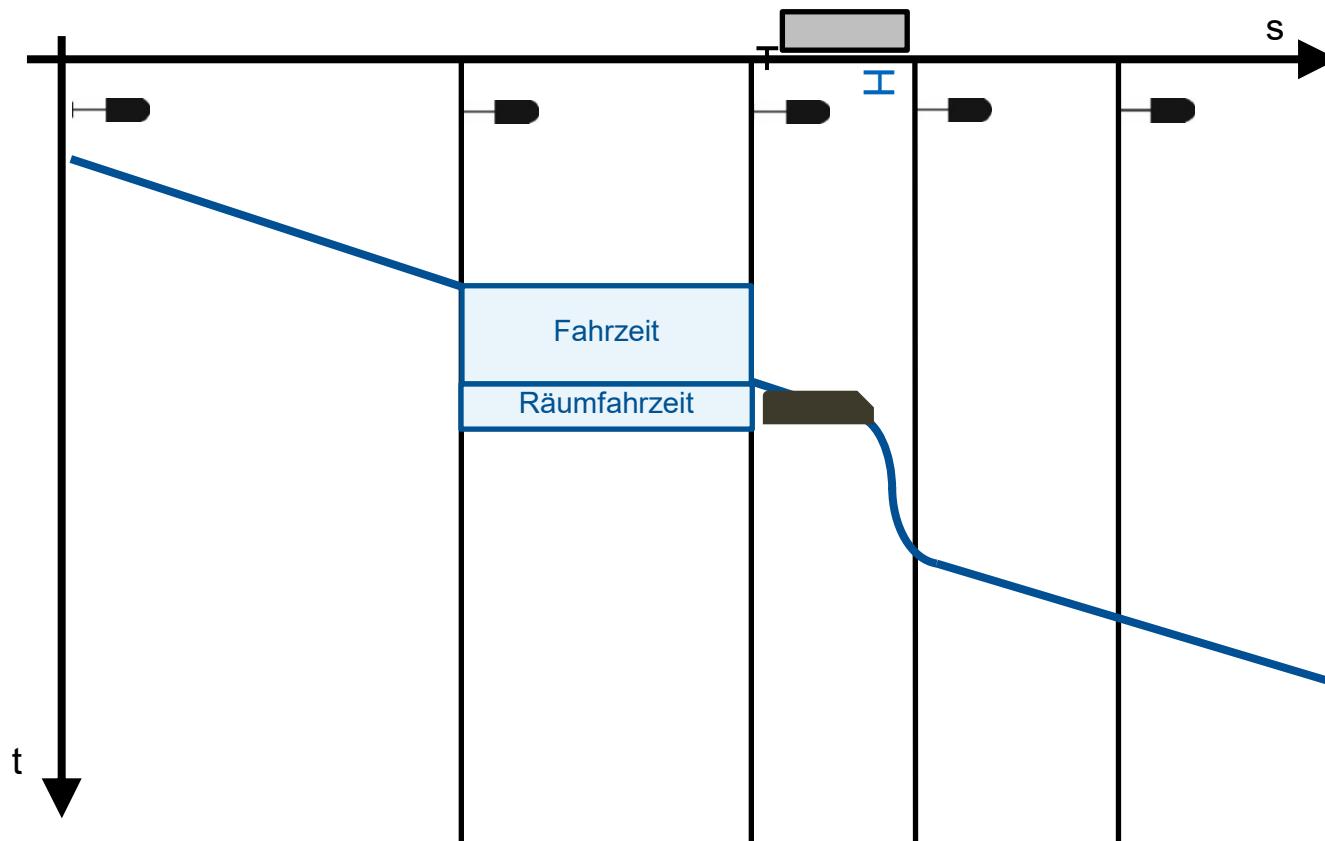
## Sperrzeit

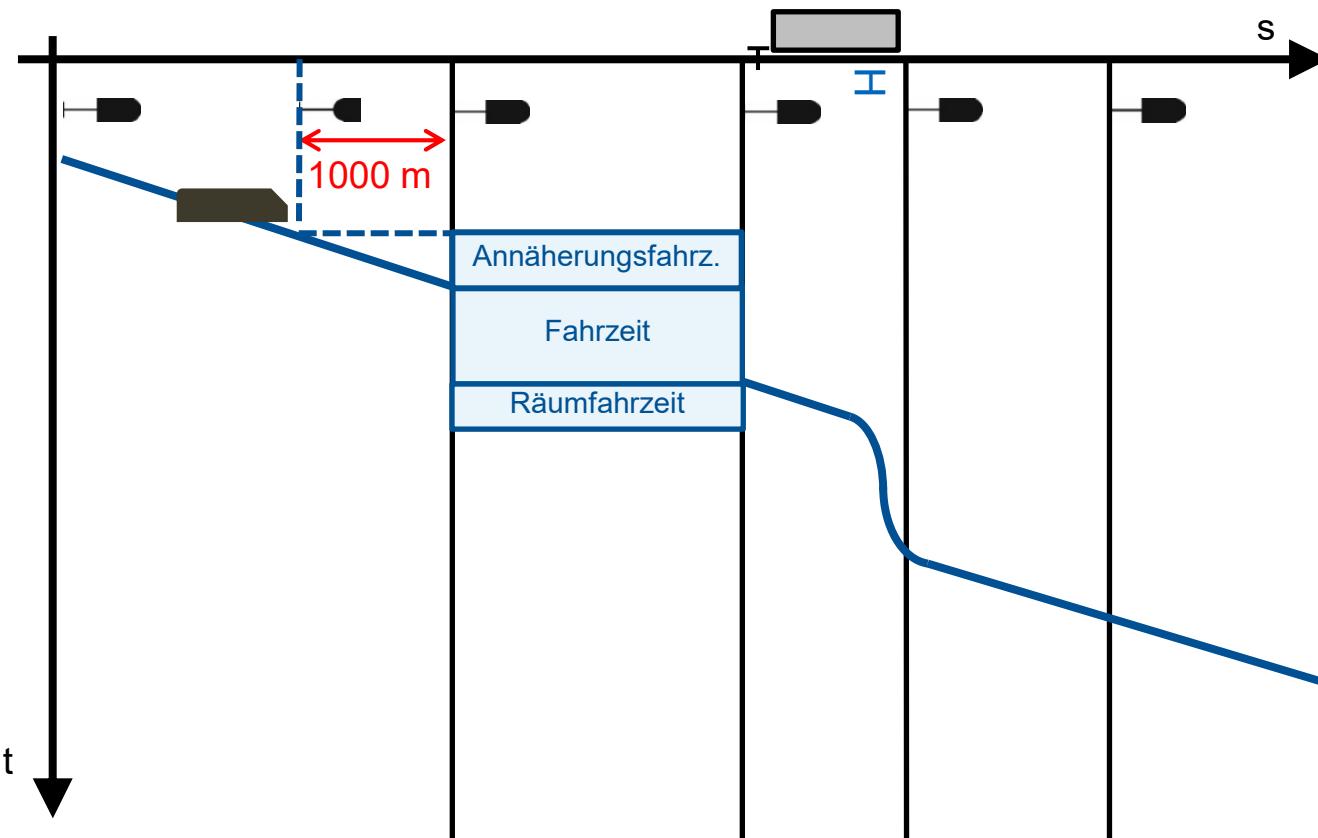


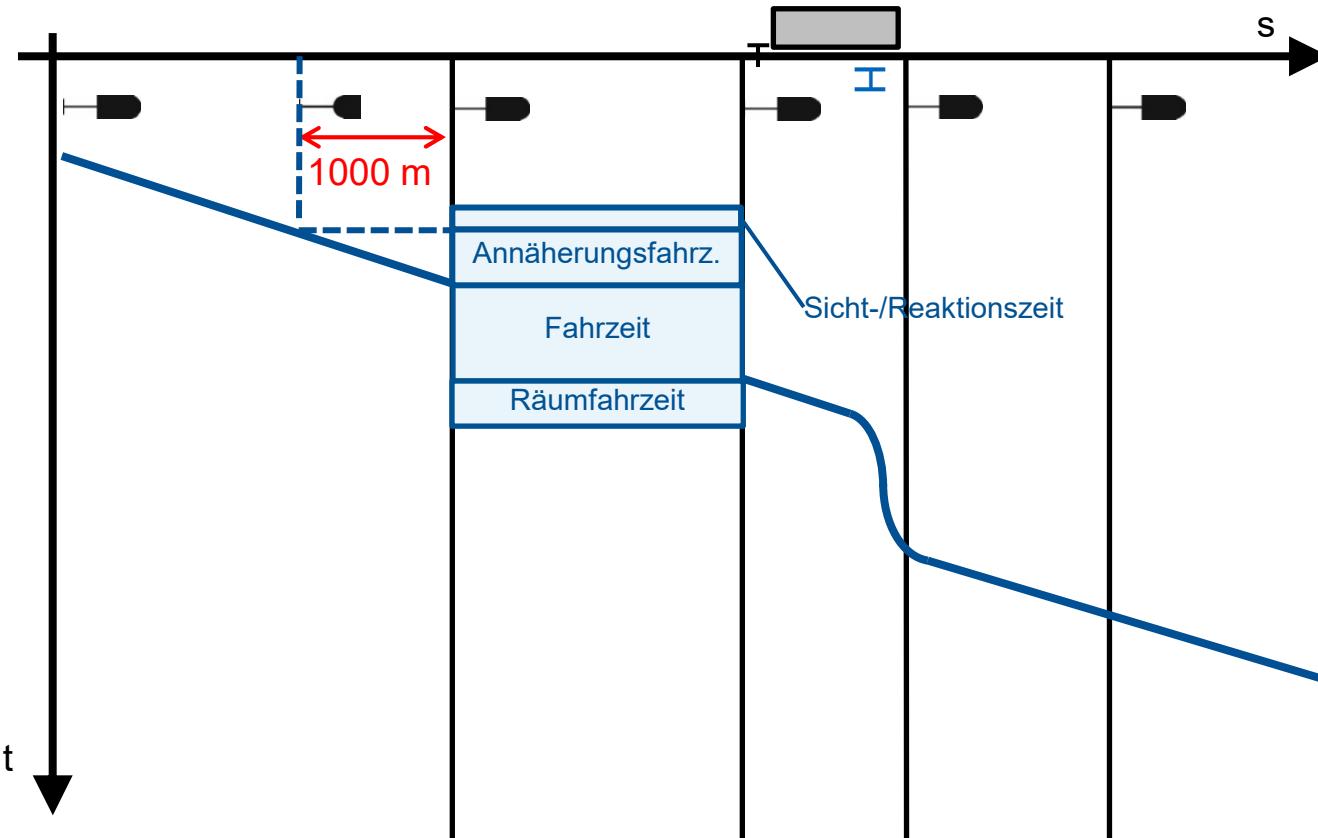
## Sperrzeit

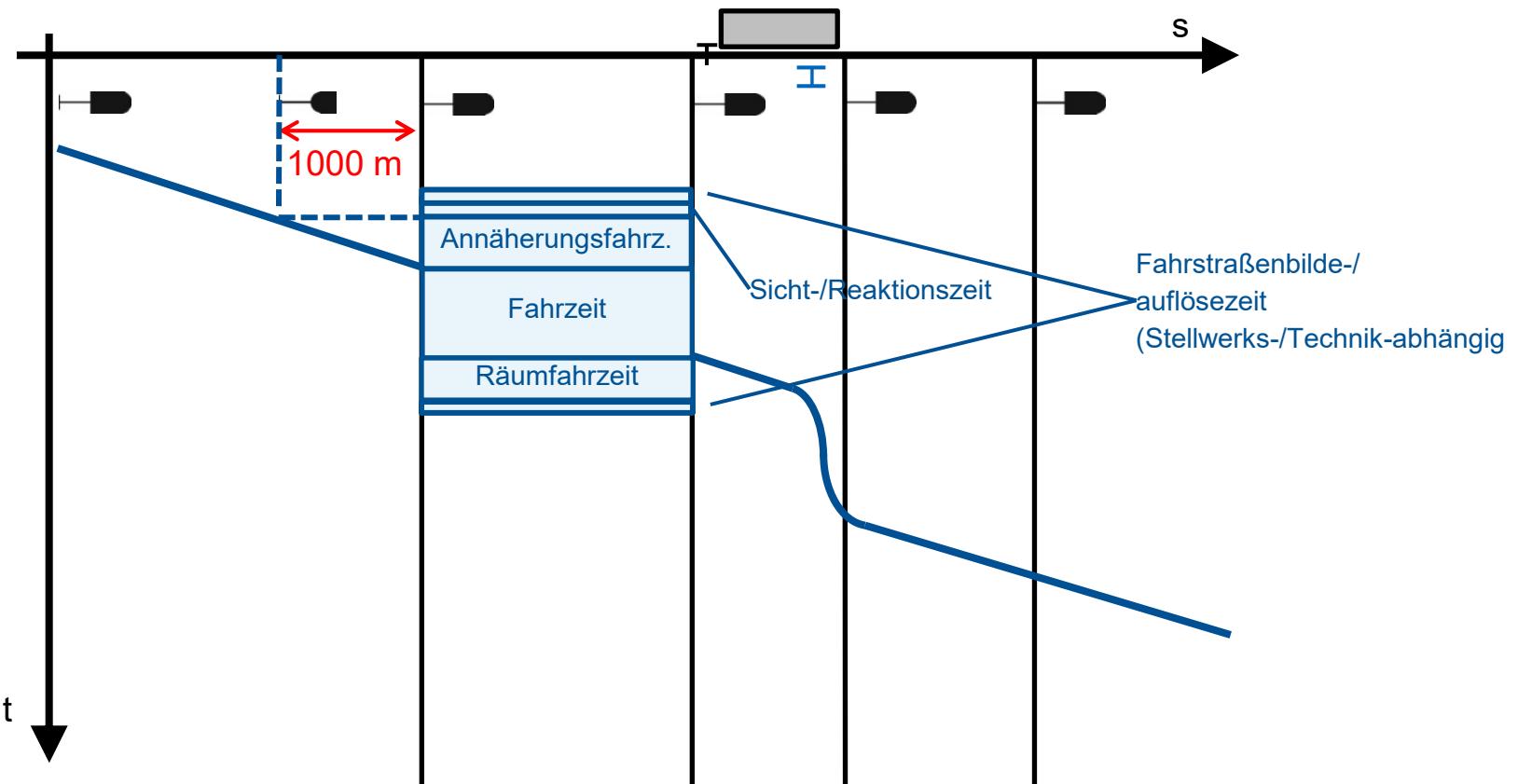


## Sperrzeit

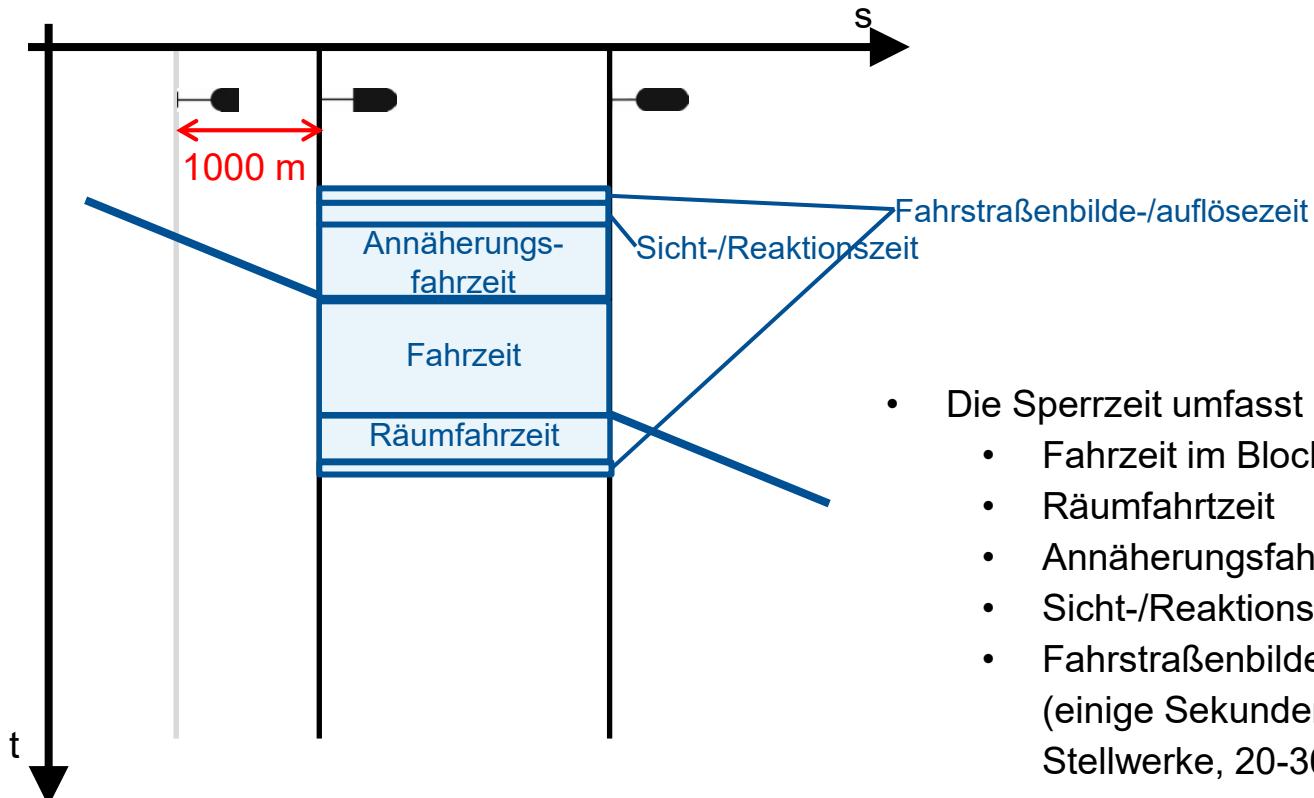


**Sperrzeit**

**Sperrzeit**

**Sperrzeit**

## Sperrzeit

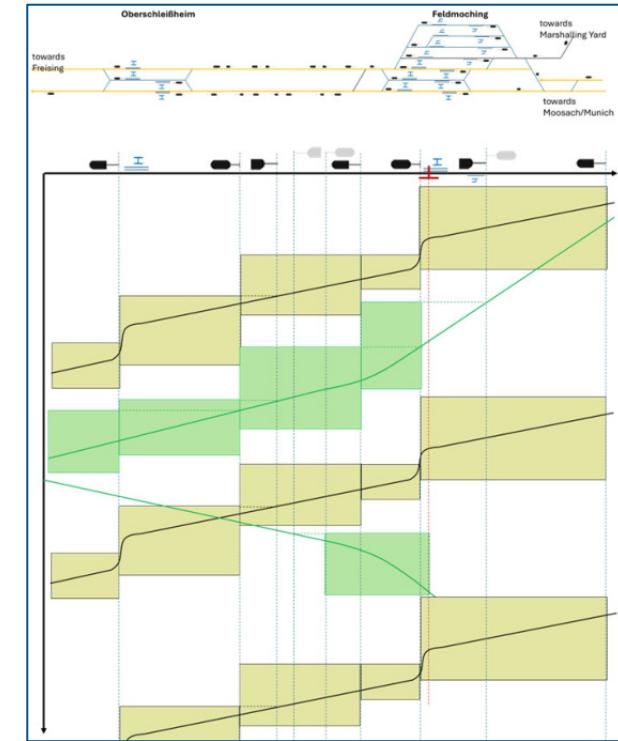


- Die Sperrzeit umfasst
  - Fahrzeit im Block
  - Räumfahrtzeit
  - Annäherungsfahrzeit
  - Sicht-/Reaktionszeit
  - Fahrstraßenbilde-/auflösezeit  
(einige Sekunden für moderne elektronische Stellwerke, 20-30s für komplexe Fahrstraßen in mechanischer Stellwerkstechnik)

## Sperrzeitentreppe

Für die Gesamtheit einer Zugfahrt ergibt sich aus den Sperrzeiten der einzelnen Blockabschnitte eine Sperrzeitentreppe

- Grundlage der Fahrplanung und Konflikterkennung
- Sperrzeiten im Fahrplan beinhalten die nominellen Belegungsansprüche von Zugfahrten
- Sperrzeiten im Betrieb beinhalten Zugwechselwirkungen und weichen vom geplanten Geschwindigkeitsprofil ab



# Betriebliche Regelwerke – Durchführung von Zugfahrten



Bild: N. Weik

# Durchführung des Bahnbetriebs



- **Aufgabenbereiche**
  - Zugbildung
  - Fahrwegsicherung
  - Abfertigung
- Die Ausführung von sicherheitsrelevanten Handlungen in den jeweiligen Aufgabenbereichen unterliegt strikten betrieblichen Regelwerken, welche Grundlage der Sicherheit des Betriebs sind
- Besondere Bedeutung hat hierbei die Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen Stellwerkspersonal (Fahrdienstleiter) und Triebfahrzeugführer bzw. Rangierpersonal

# Zugbildung

## Aufgabe des Verkehrsunternehmens

- Zugzusammenstellung, Traktionsart und –leistung müssen den Erfordernissen angepasst sein
- Einhaltung von Lichtraumprofil und max. zulässigen Zuglängen
  - Personenzug: max. 420 m
  - Güterzug: max. 750 m / 835m auf ausgewiesenen Strecken
- Streckenkunde des Personals
- Gewährleistung des betriebssicheren Zustands des Rollmaterials
  - Durchführung der Bremsprobe
  - Installation des Zugschlusssignals



# Fahrwegsicherung

## Aufgabe des Eisenbahninfrastrukturunternehmens

- Fahrdienstleiter überwacht und koordiniert Zug- und Rangierfahrten
- Prüfung des Fahrwegs, der Stellung und Endlage von Weichen
- Festlegung von Fahrstraßen und Kommunikation mit Betriebspersonal des EVU
- *Signalabhängigkeit* als Grundlage der Sicherungstechnik: „Fahrtstellung“ des Signals im Stellwerk nur möglich, wenn alle Voraussetzungen der Fahrwegsicherung erfüllt



Bild: Raimond Spekking, CC-BY-SA 4.0

# Zugabfertigung

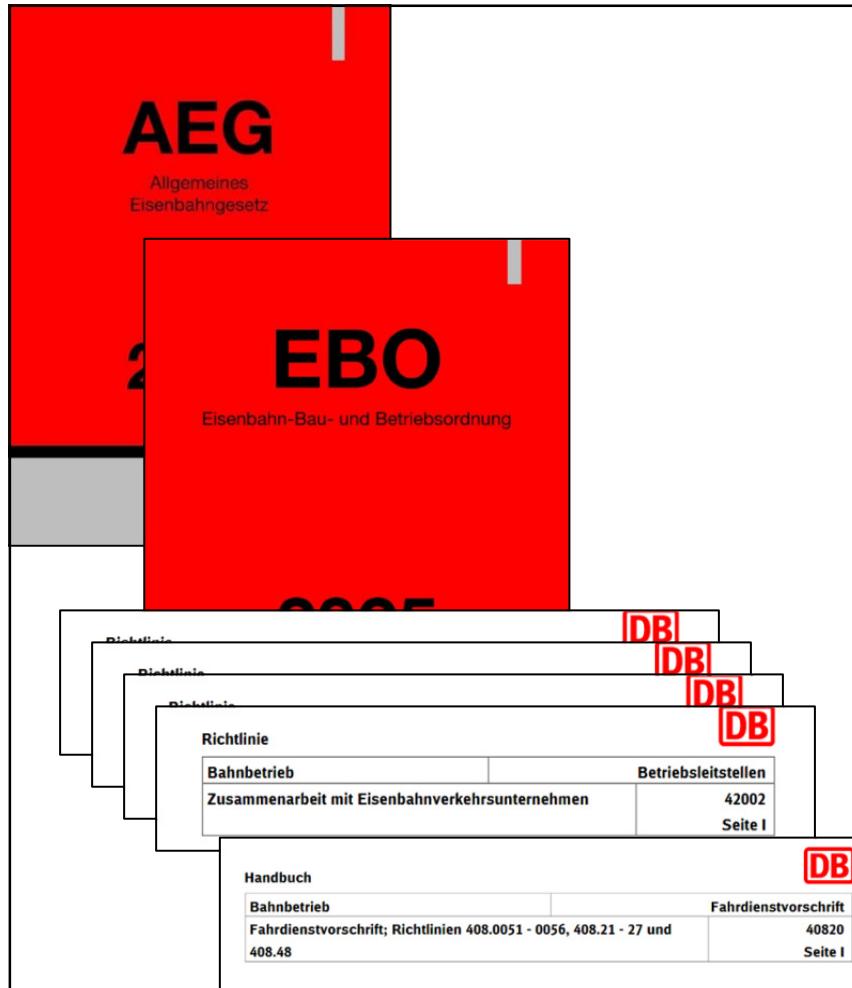
- Bei Erreichen der planmäßigen Abfahrtszeit werden nach Abschluss des Fahrgastwechsels die Türen geschlossen
- Abfahrauftrag wird erteilt, wenn alle Voraussetzungen erfüllt sind (Ausfahrtsignal auf „Fahrt“, Türen ordnungsgemäß geschlossen, Bahnsteigkontrolle)
- Abfahrauftrag durch örtlich zuständige Aufsicht (überwiegend historisch), oder durch Zugführer per Licht-/Handsignal bzw. inzwischen auch digital per App



Bild: Echtner, CC-BY SA 3.0



Img: indeedous/Wikimedia Commons



# Regelwerke

## Sicherheitsmanagementsystem (Anforderung AEG)

- Voraussetzung für den Betrieb und die Benutzung des „übergeordneten Netzes“
- Beinhaltet
  - Sicherheitsgenehmigung für EIU
  - Sicherheitsbescheinigung / Zulassung von EVU

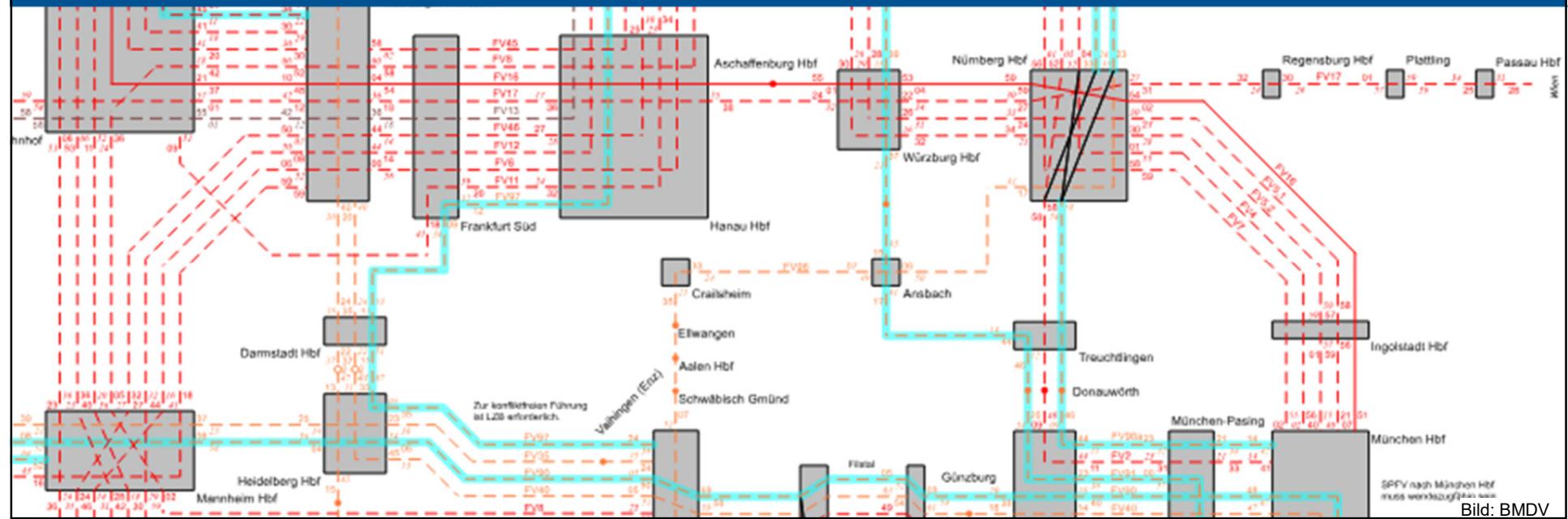
## Eisenbahnbetriebsleiter

- Verantwortlich für die Sicherheit und die reibungslosen Abläufe im Eisenbahnbetrieb.
  - Überwachung / Durchsetzung der Regelwerke und Anordnungen
  - Schulung / Qualifikation von Personal

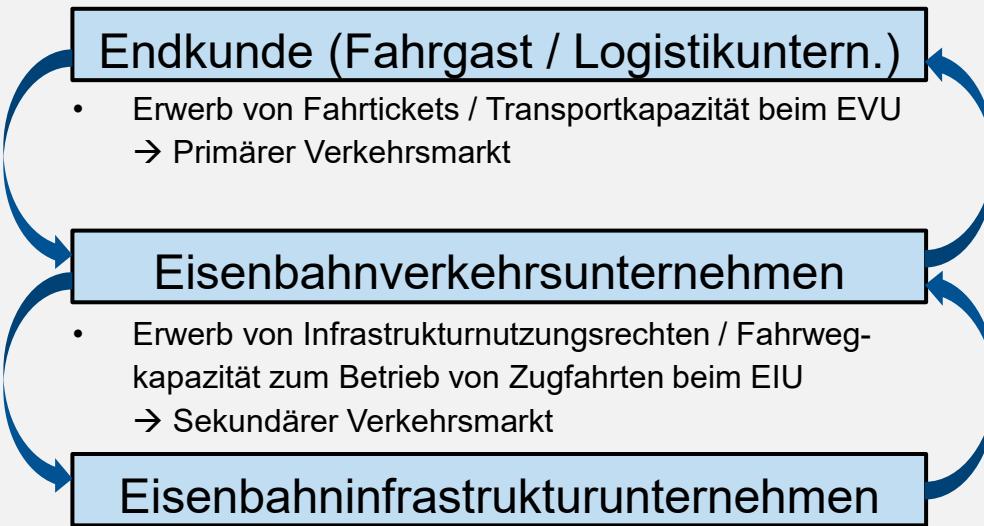
## Betrieblich-technisches Regelwerk

- Detaillierte Vorgaben für betriebliche Handlungen
  - Z.B. Signalbuch, Fahrdienstvorschrift, Notfallmanagement, Prozesse zur Abstimmung zwischen EIU und EVU, ...

# Grundlagen der Fahrplanung



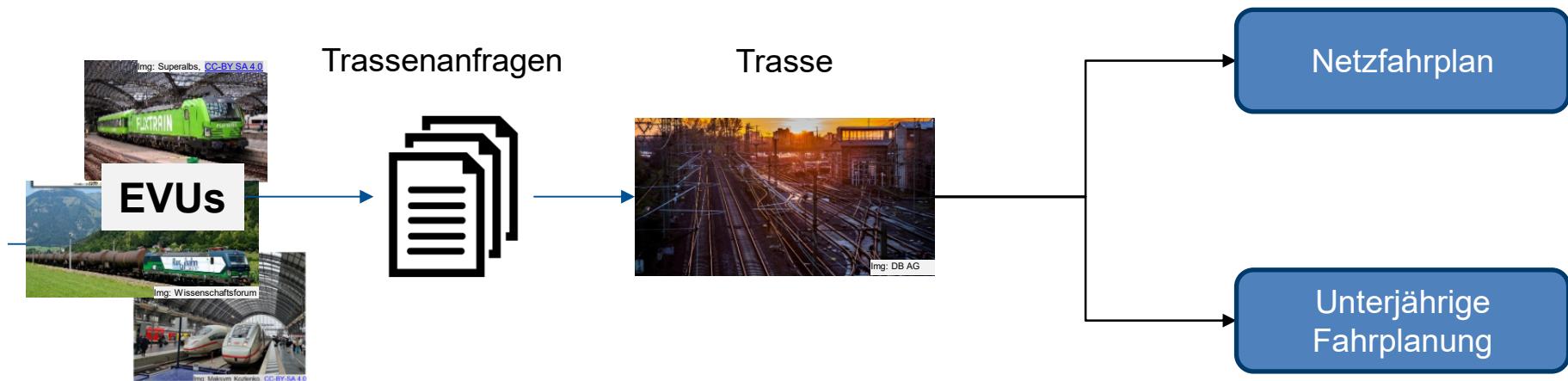
# Der Schienenverkehrsmarkt



## Fahrplanungsprozess

Es existieren zwei grundsätzliche Möglichkeiten für EVUs, Trassen zu erhalten:

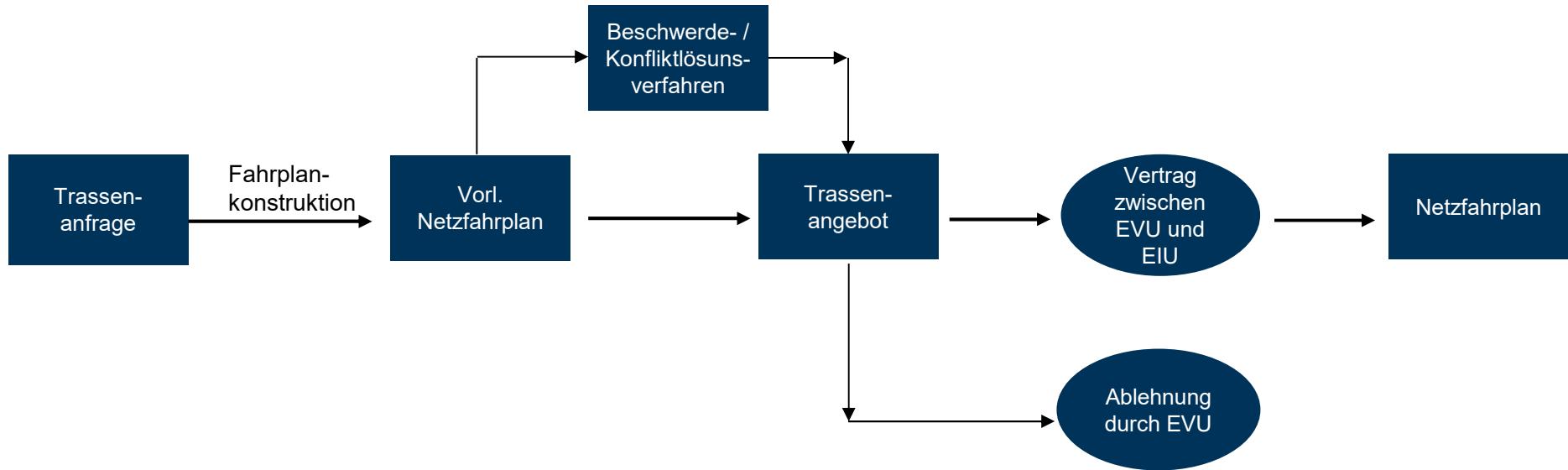
- Im Zuge des jährlichen Netzfahrplans
- Als Ad-hoc Trassen im Rahmen der unterjährigen Fahrplanung (Gelegenheitsverkehr)



## Fahrplanungsprozess

Es existieren zwei grundsätzliche Möglichkeiten für EVUs, Trassen zu erhalten:

- Im Zuge des jährlichen Netzfahrplans
- Als Ad-hoc Trassen im Rahmen der unterjährigen Fahrplanung (Gelegenheitsverkehr)



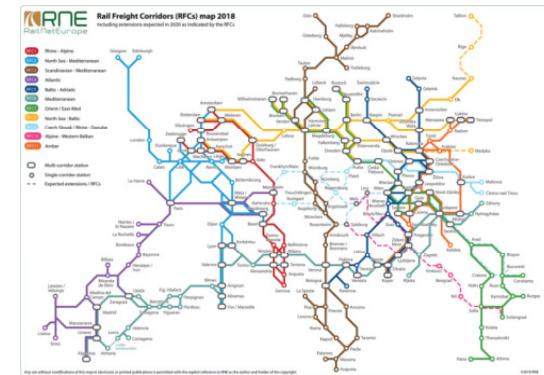
# Der Fahrplan zum Netzfahrplan



## Wichtige Termine zur Anmeldung für den Netzfahrplan 2025

|          |   |   |
|----------|---|---|
| Januar   | 08.01.2024                                | Veröffentlichung internationaler PaP-Kataloge (Pre-arranged Paths)  |
| März     | 11.03.2024 – 08.04.2024                   | Trassenanmeldefrist erste Phase der Netzfahrplanerstellung  |
| April    | 09.04.2024 – 25.09.2024                   | Trassenanmeldefrist zweite Phase der Netzfahrplanerstellung   |
|          | 22.04.2024                                | Bekanntgabe Pre-allocation durch Korridor One-Stop Shop   |
| Juli     | 01.07.2024 – 15.08.2024                   | Anmeldezeitraum Serviceeinrichtungen  |
|          | bis 01.07.2024                            | Vorläufiger Netzfahrplanentwurf erste Phase der Netzfahrplanerstellung  |
| August   | 01.08.2024 – 30.08.2024                   | Bestellzeitraum für die infrastrukturbezogenen sowie zugabhängigen Fahrplanunterlagen [Fahrzeitenheft (FzH), Buchfahrplan in geschlossener Darstellung (BfgD), Zugleitbetrieb (ZLB), Zugverzeichnis (Zv), Geschwindigkeitsheft (GeH)] |
|          | bis 02.08.2024                            | Stellungnahme des ZB oder des einbezogenen EVU zum vorläufigen Netzfahrplanentwurf erste Phase der Netzfahrplanerstellung   |
|          | bis 12.08.2024                            | Versand der Trassenangebote   |
|          | bis 19.08.2024                            | Annahme der Trassenangebote   |
|          | 24.08.2024                                | Annahme der Angebote in PCS bei Kapazitätszuweisung über SGV-Korridore*   |
| Oktober  | bis 15.10.2024                            | Angebotsabgabe/-versand Serviceeinrichtungen durch DB Netz AG   |
|          | 22.10.2024 (innerhalb von 5 Arbeitstagen) | Angebotsannahme Serviceeinrichtungen  |
| November | bis 08.11.2024                            | Endgültiger Netzfahrplanentwurf zweite Phase der Netzfahrplanerstellung   |
| Dezember | 15.12.2024 um 00:00 Uhr                   | Beginn Netzfahrplan   |

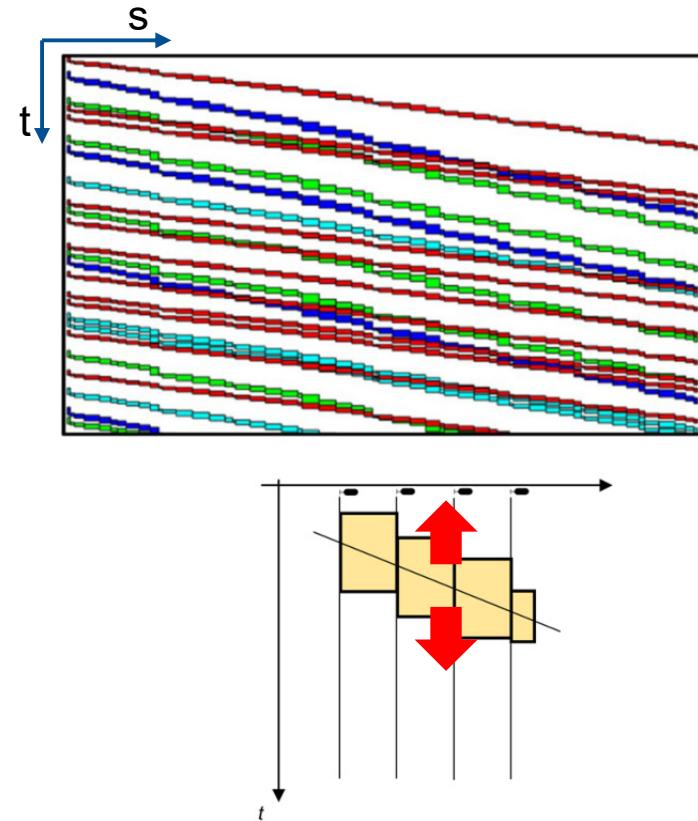
\*Sollte die DB Netz AG aus der Netzfahrplanerstellung heraus Trassenablehnungen beabsichtigen, können sich die genannten Termine infolge der Unterrichtung nach § 72 Satz 1 Nr. 1 ERegG und der Vorabprüfung durch die BNetzA nach § 73 Abs. 1 Nr. 1 ERegG verschieben.



Datum harmonisiert in Europa

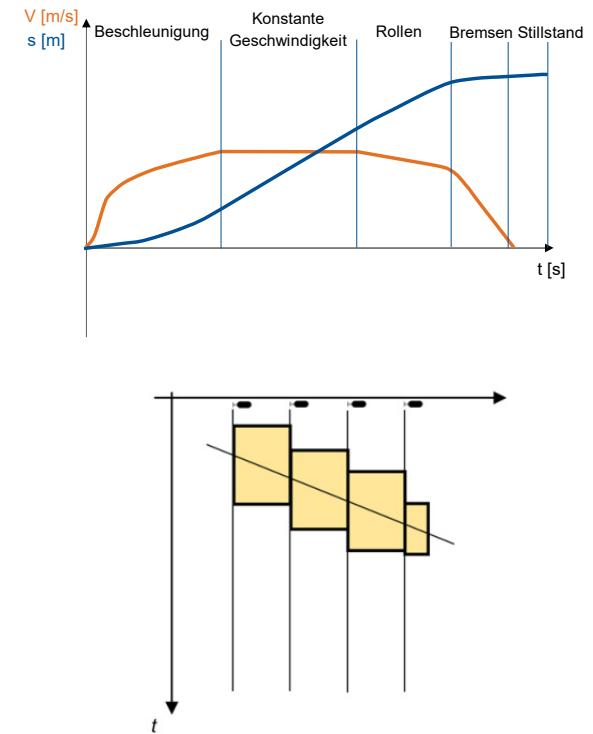
## Vorgehen bei der Netzfahrplanung

- Trassenanfragen unterschiedlicher EVU i.d.R. nicht konfliktfrei
  - Konfliktlösung erforderlich
  - Vorrangig im Einvernehmen (Koordinierungsverfahren)
  - Wenn keine einvernehmliche Lösung möglich, Priorisierung nach Vertaktungsgrad, grenzüberschreitendem Verkehr, Trassenentgelt (vgl. Ril 420)
  - Im Extremfall: per Trassenauktion
- Konstruktionsspielräume (1. Anmeldephase)
  - Personenzüge +/- 3 Minuten
  - Güterzüge +/- 30 Minuten
- Konstruktionsspielräume (2. Anmeldephase)
  - Personenzüge +/- 30 Minuten
  - Güterzüge +/- 60 Minuten
- Konstruktionsrichtlinien (z.B. in Bezug auf Fahrplanreserven und Pufferzeiten) sind einzuhalten



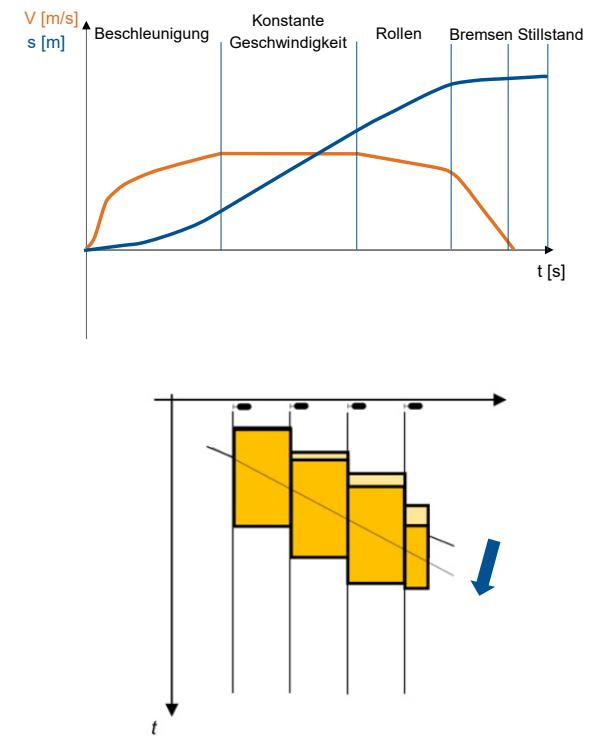
## Fahrplanung – Vorgehen und Rahmenbedingungen

- Voraussetzung für die Fahrplanung ist die Berechnung der technisch möglichen Fahrzeiten auf Basis der vom EVU übermittelten Zugeigenschaften
- Der Bahnbetrieb überliegt systemimmanente Varianzen durch z.B. Witterungsbedingungen
  - Trasse enthält **Fahrzeitreserven** um unterschiedliche Fahreigenschaften abzubilden
  - Verspätungen können aufgeholt werden
  - Energiesparende Fahrweise / Nutzung von Reserven bei pünktlichem Betrieb



## Fahrplanung – Vorgehen und Rahmenbedingungen

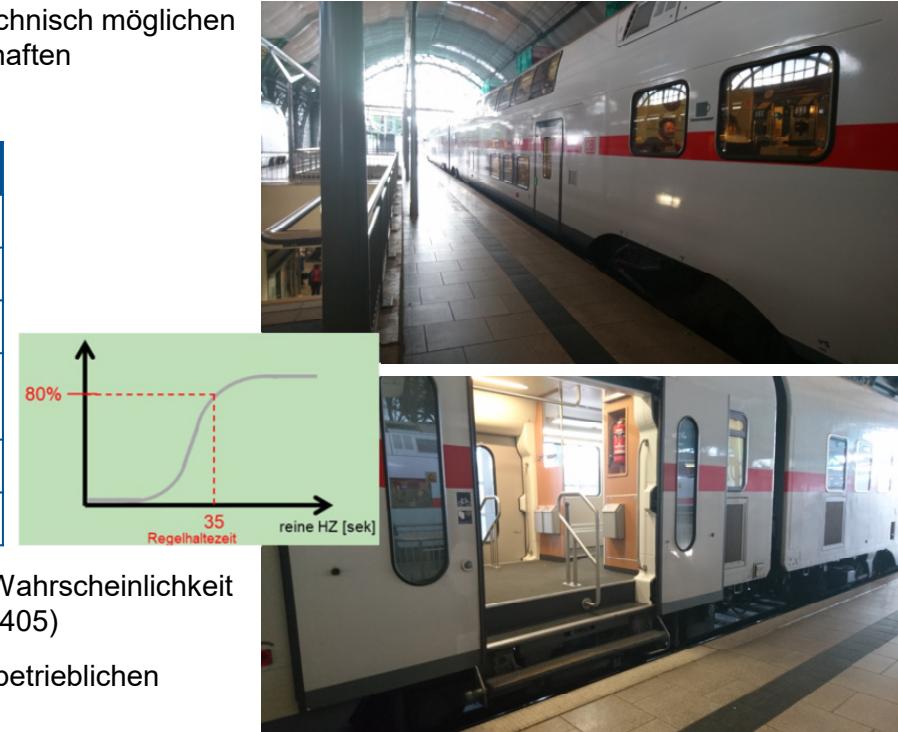
- Voraussetzung für die Fahrplanung ist die Berechnung der technisch möglichen Fahrzeiten auf Basis der vom EVU übermittelten Zugeigenschaften
- Der Bahnbetrieb überliegt systemimmanente Varianzen durch z.B. Witterungsbedingungen
  - Trasse enthält **Fahrzeitreserven** um unterschiedliche Fahreigenschaften abzubilden
  - Verspätungen können aufgeholt werden
  - Energiesparende Fahrweise / Nutzung von Reserven bei pünktlichem Betrieb
- **Regelzuschlag:** 3-7% (7% UIC-Empfehlung)
  - Zur Abbildung von Systemvarianzen
  - Prozentualer Zuschlag zur techn. minimalen Fahrzeit
- **Haltezeitreserven** werden zusätzlich zur minimalen Haltezeit/Fahrgastwechselzeit geplant
- **Knotenzuschlag:** pauschaler Zuschlag vor/nach großen Knotenbahnhöfen
  - Pauschaler Zuschlag zur Mitigation von Verspätungen in komplexen Knoten
- **Bauzuschlag:** zur Berücksichtigung von Langsamfahrstellen/Baumaßnahmen



## Fahrplanung – Vorgehen und Rahmenbedingungen

- Voraussetzung für die Fahrplanung ist die Berechnung der technisch möglichen Fahrzeiten auf Basis der vom EVU übermittelten Zugeigenschaften
- **Haltezeiten:**

| Verkehrssegment   | Mindesthaltezeit |
|---|------------------|
| Schienenpersonennahverkehr  | 0.5-0.7min       |
| Schienenpersonenfernverkehr   | 2 min            |
| Halt mit Flügeln/Schwächen  | 3 min            |
| Halt mit Vereinigung / Stärken,<br>bei Wenden / Fahrtrichtungswechsel | 5 min            |
| Stärken ohne automatische Kupplung                                    | 8 min            |
| S-Bahn / U-Bahn   | 20-40 s          |

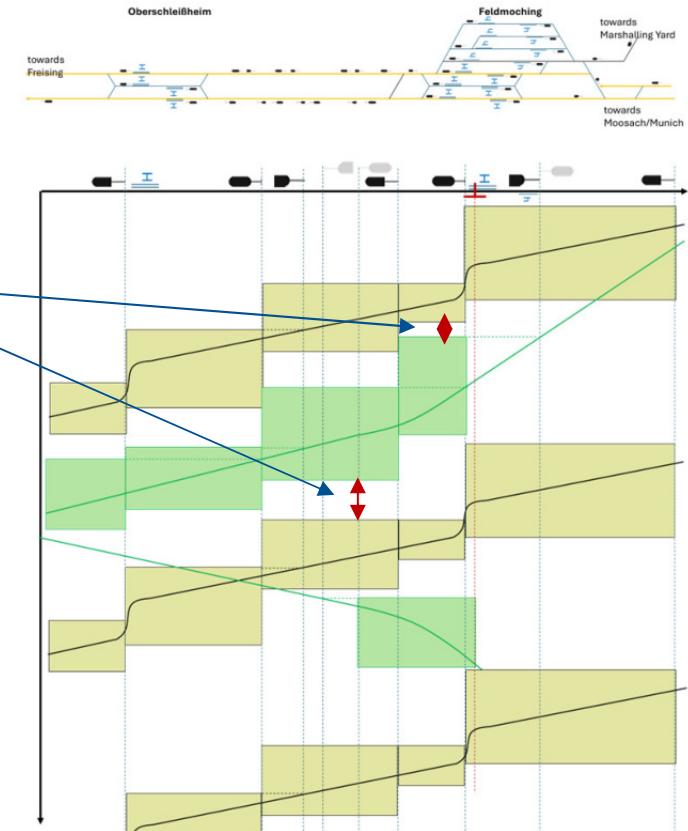


- Die **Regelhaltezeit** wird so dimensioniert, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von min. 80% im Regelbetrieb eingehalten werden kann (RiL 405)
- Zusätzliche **Haltezeitzuschläge** werden in Abhängigkeit der betrieblichen Komplexität als Fix-Zuschlag pro Zug geplant

# Fahrplanung – Vorgehen und Rahmenbedingungen

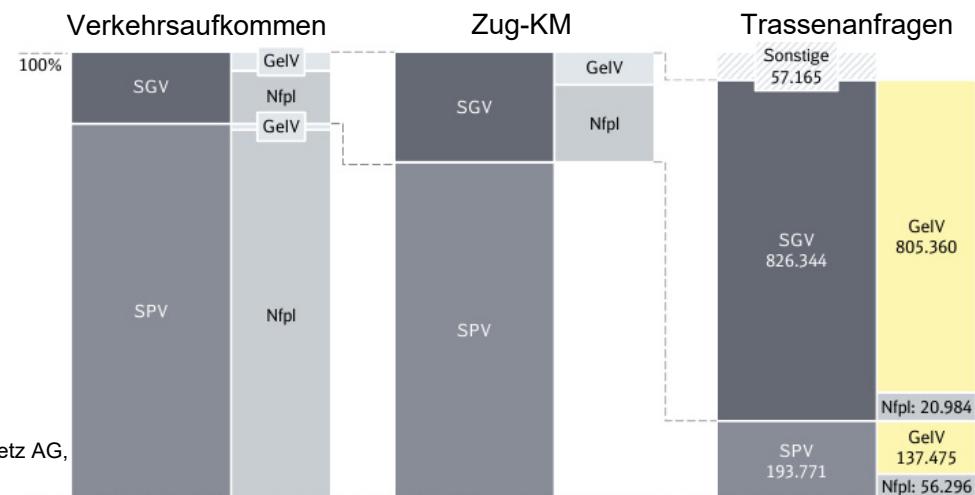
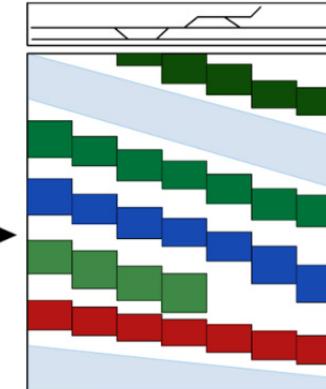
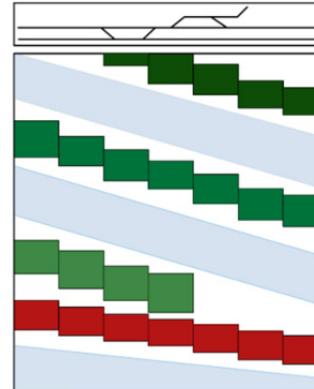
## Zielkonflikte

- Voraussetzung für die Fahrplanung ist die Berechnung der technisch möglichen Fahrzeiten auf Basis der vom EVU übermittelten Zugeigenschaften
- Zur Vermeidung von Verspätungsübertrag zwischen Zügen werden **Pufferzeiten** geplant, die Standard-Mindestpufferzeit beträgt 60s
- Interessenkonflikt bei der Fahrplanung:



## Unterjährige Fahrplanung

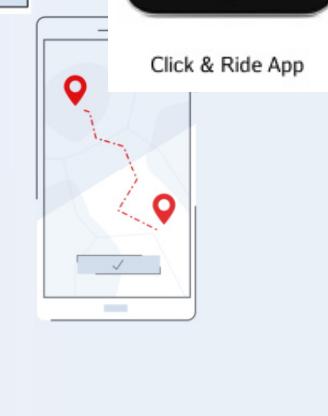
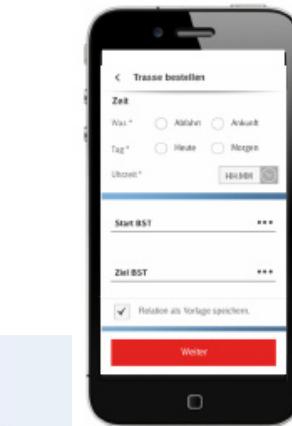
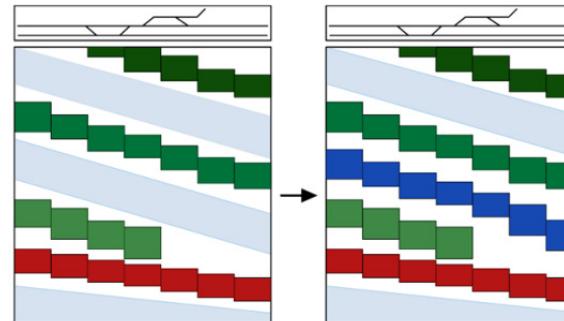
- Logistik / Schienengüterverkehr
  - Verkehrsaufkommen stark abhängig von wirtschaftlicher Lage
  - Fixierung des Angebots 1 Jahr im Voraus unrealistisch
  - Hohes Aufkommen von Einzeltrassenanfragen mit kurzer Vorlaufzeit (einige Tage bis Wochen)
- Zusätzliche Trassen können nach Maßgabe der Konstruierbarkeit unterjährig geplant werden



## Vergabeprozess im unterjährigen Fahrplan

- Früher: Manuelle Trassenkonstruktion im Gelegenheitsverkehr
- Heute: Vorgeplante Slots (Systemtrassen) im Netzfahrplan, die zu einem späteren Zeitpunkt an EVUs im Gelegenheitsverkehr verkauft werden können
- Automatische Trassenzuweisung (Slot Allokation) mittels mathematischer Optimierung
- Transformation von make-to-order zu (standardisiertem) assemble-to-order Prozess
  - Reduktion von Reaktionszeiten und Workload
  - Click-and-Ride: Trassenangebot binnen 3 Minuten per App bis zu 45min vor Abfahrtswunsch

### Click and Ride

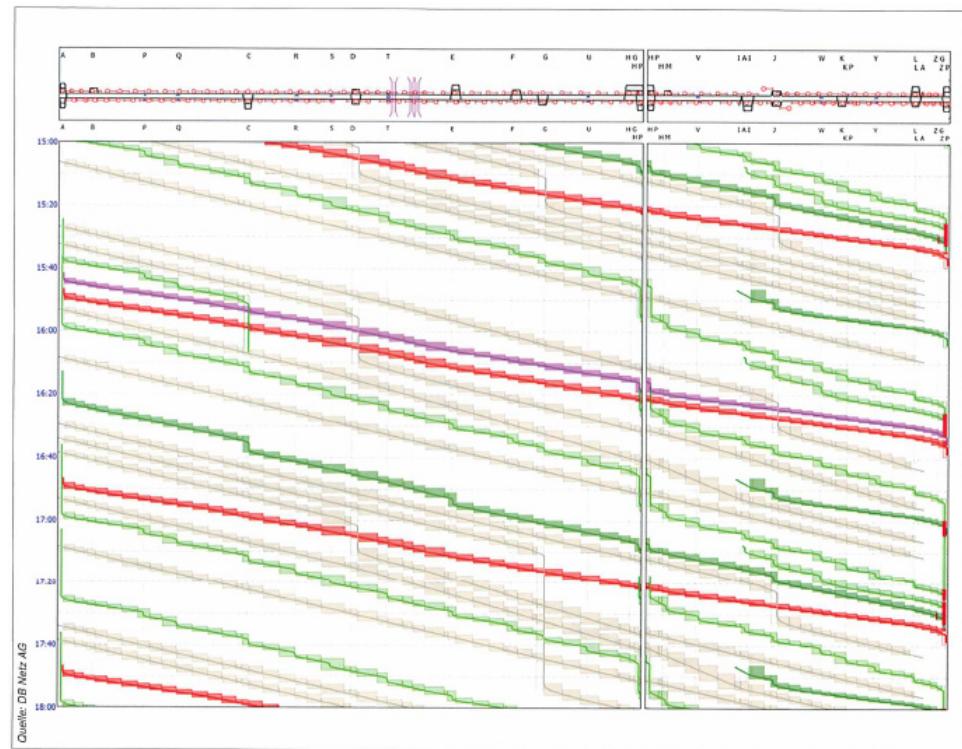


<https://trassenfinder.de>

## Herausforderungen

Vor-Allokation von Trassenkapazität (Slots) bedeutet Standardisierung

- Gut geplante Trassen für standardisierte Zugkategorien, aber: kein Zug (insbes. im Frachtsegment) ist wie jeder andere
- Größere Reserven nötig für die Trassen, um für verschiedene Züge passfähig zu sein
- Vorplanfahrten pünktlicher Züge
- Wie sollten Trassen geplant werden?  
Wie viele Trassen sind vorzusehen / belegbar?
- Stärkere Kopplung mit Nachfragemodellen



# Europäische Initiative: Rollierende Fahrplanung

## Trend hin zu stärkerer Vorkonstruktion

- RailNetEurope (Verband der EIUs in der EU): Identifikation und Vorausplanung von Trassen für unterschiedliche Marktsegmente

| Planning phase        | Annual Timetable Planning                                     | Rolling Planning   | Short-term Planning   |  |
|-----------------------|---|--|---|--|
| Request possibilities | Annual Timetable & Late requests ( $\Leftrightarrow X-2$ )    | Rolling Planning requests ( $M-120 \Leftrightarrow M-30$ days) | Ad hoc requests ( $X-2 \Leftrightarrow M-30$ days)  | Short-term ad hoc requests (< 30 days)   |
| Validity              | $X \Leftrightarrow X+12$                                      | Multi-annual up to 36 months                                   | $X \Leftrightarrow X+12$  |  |
| Capacities used       | Pre-constructed Annual Timetable capacity; Unplanned capacity | Pre-constructed Rolling Planning capacity                      | Unplanned capacity; Residual Annual Timetable capacity; Pre-constructed Ad hoc capacity (if applicable) | Unplanned capacity; Residual Annual Timetable capacity; Residual Rolling Planning capacity; Residual Ad hoc capacity (if applicable) |
| Timetable process     | Annual Timetable process                                      | Rolling Planning process                                       | Ad hoc process  |  |

X = Timetable change in Mid-December; M = day of operation

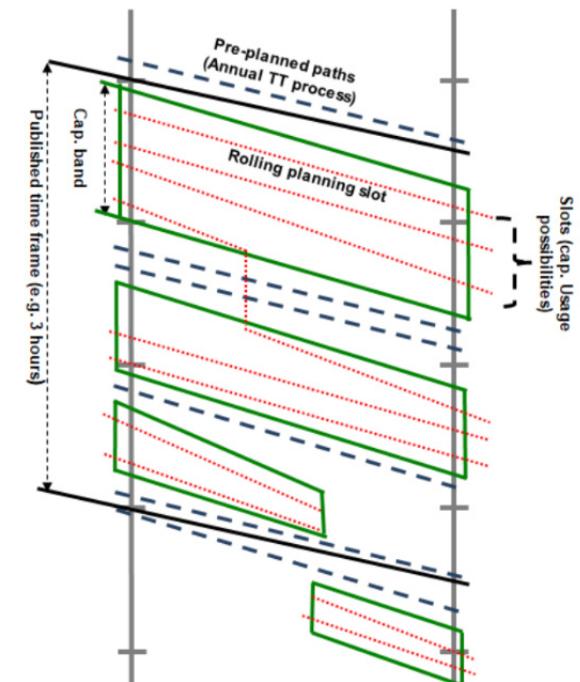


Bild: RNE

## Fahrplanstrukturen

### Aktuell: Paradigmenwechsel hin zu fahrplangetriebener strategischer Planung (Deutschland-Takt)

- Koordinierung von Linien in Knotenbahnhöfen
  - Optimierung von Umstiegsbeziehungen
  - „pulsierender“ Fahrplan
- Umsetzung eines Deutschland-Takts nach Schweizer Vorbild

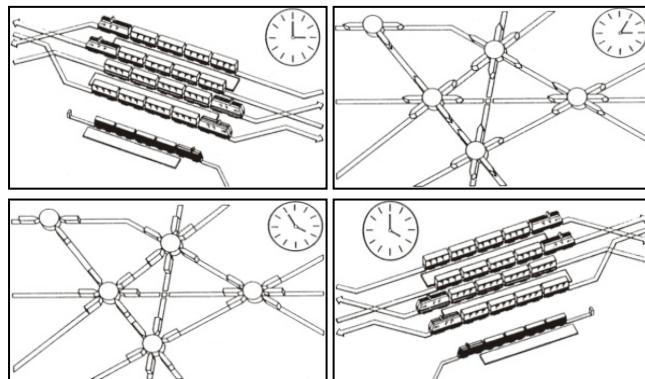
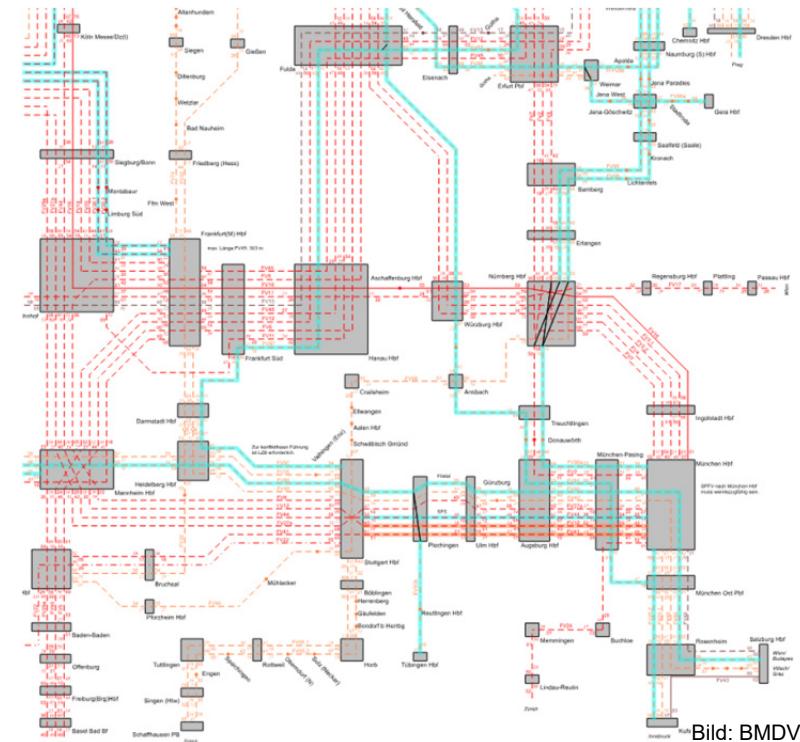


Bild: Schweizer Eisenbahn-Revue (1987)



# Störungen und betriebliches Management von Verspätungen



img: N. Weik

## Verspätung

- **Verspätung** ist die Zeit, die ein Zug an einem spezifischen Punkt seiner Fahrt von der geplanten Zeit abweicht
- Basierend auf dieser Definition, kann eine Verspätung sowohl positiv als auch negativ sein
- Es existieren unterschiedliche Klassen von Verspätungen
  - *Primär- oder Urverspätungen*
    - Bezeichnen Verspätungen, die ein dezielter Zug innerhalb des Untersuchungsbereichs erleidet
  - *Sekundär- oder Folgeverspätungen*
    - Sind Verspätungen, die ein durch andere Züge auf einen Zug übertragen werden
    - Würden nicht auftreten, wenn alle Züge planmäßig verkehren



Bild: N. Weik

Folgeverspätungen nehmen ca. 60-70%  
der Gesamtverspätungen ein

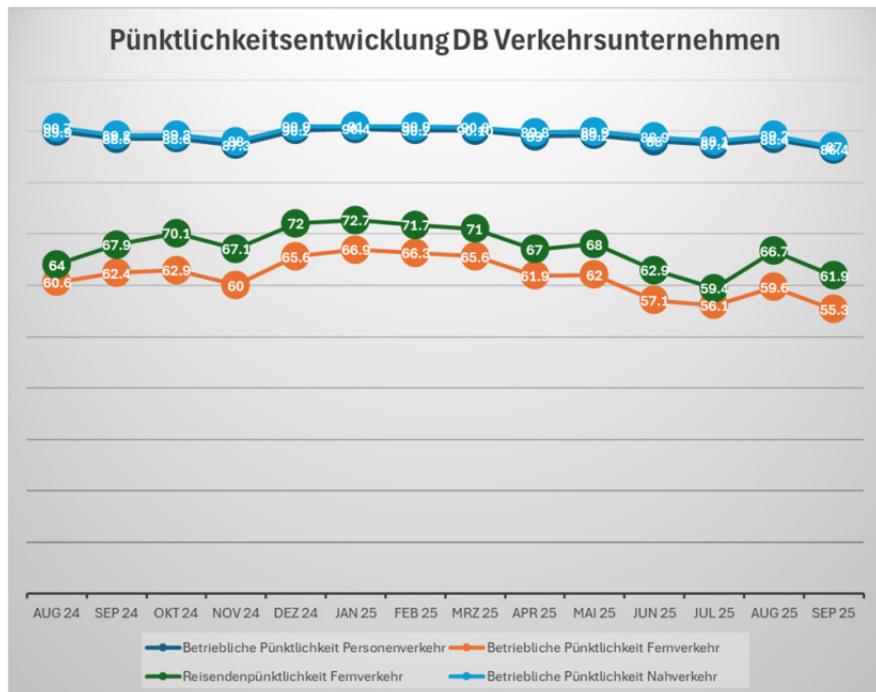
## Verspätungskodierung

- Zuwachsverspätungen ab >90s sind von Fahrdienstleiter/Disponent bzgl. Ursache zu codieren
  - Ril 420
- Grundlage betrieblicher Steuerungsprozesse
  - Netzzustandsreport, Pönen für öffentlich bezuschusste Leistungen im SPNV

| Kodierung der Zusatzverspätungen   |  |  |                                     |    |   |    |                               |  |                                  |                                  |                       |                          |                      |                       |                                |   |  |
|------------------------------------|--|--|-------------------------------------|----|---|----|-------------------------------|--|----------------------------------|----------------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|---|--|
| Betriebsplanung<br>Betriebsführung |  | Betreiber der Schienenwege (BdS)<br>Infrastruktur<br>Technik |                                     |    | Bauliche Gründe                             |    | andere Infrastruktur<br>(EIU) | Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU)<br>Verkehrliche<br>Durchführung |                                  | Fahrzeuge                        |                       | EVU auf<br>Nachbarnetz   | Externe<br>Einflüsse | Sekundäre<br>Ursachen |                                |   |  |
| 10                                 | Fahrplanerstellung                     | 20   | Stromversorgungsanlagen (Fahstrom)  | 30 | Mängellangsamfahrtstelle                    | 40 | Nächster EIU                  | 50   | Haltezeitüberschreitung          | 60                               | Umlauf-Einsatzplanung | 70                       | Nächstes EVU         | 80                    | Externe Einflüsse nächstes EIU | 90  | Gefährliche Ereignisse                             |
|                                    |  | 21   | Telekommunikationsanlagen           | 31 | Bauarbeiten/Arbeiten                        | 31 | Vorheriger EIU                | 51   | Antrag EVU                       | 61                               | Zugbildung durch EVU  | 71                       | Vorheriges EVU       | 81                    | Anordnung NLZ - Streik         | 91  | Zugfolge - wegen Vorrang anderer Züge              |
| 12                                 | Fehl disposition                       | 22   | Bauwerke                            | 32 | Unregelmäßigkeiten bei Bauarbeiten/Arbeiten |    |                               | 52   | Ladearbeiten                     | 62                               | Reisezugwagen         |                          |                      | 82                    | Witterung                      | 92  | Unregelmäßigkeiten - betroffener Zug war verspätet |
| 13                                 | Vorbereitung                           | 23   | Fahrbahn                            |    |   |    |                               | 53   | Unregelmäßigkeiten an der Ladung | 63                               | Güterwagen            |                          |                      | 83                    | Schmierfilm                    | 93  | Umlauf   |
| 14                                 | Anfangsverspätung bei Zügen des Netzes | 24   | Bahnübergangssicherungsanlagen      |    |   |    |                               | 54   | Verkehrliche Zugvorbereitung     | 64                               | Triebfahrzeuge        |                          |                      | 84                    | Behörden                       | 94  | Anschluss  |
|                                    |  | 25   | Anlagen Leit- und Sicherungstechnik |    |   |    |                               |  |                                  |                                  |                       |                          | 85                   | Fremdeinwirkung       | 95                             | Flügeln   |  |
|                                    |  | 26   | Weichen                             |    |   |    | 46                            | Anlagen DB Energie   |                                  |                                  |                       |                          |                      |                       | 96                             | Anordnung NLZ - Weitere Untersuchungen erforderlich |  |
|                                    |  | 27   | Netzfahrzeuge                       |    |   |    | 47                            | Anlagen S&S  | 57                               | Keine Meldung durch EVU          |                       |                          |                      |                       |                                |   |  |
| 18                                 | Betriebliches Personal Netz            | 28   | Technisches Personal Netz           |    |   |    | 48                            | Personal S&S und DB Energie  | 58                               | Verkehrliches Personal EVU       | 68                    | Technisches Personal EVU |                      |                       |                                |   |  |
| 19                                 | Sonstiges Betrieb Netz                 | 29   | Sonstiges Technik Netz              |    |   |    | 49                            | Sonstiges S&S und DB Energie                                       | 59                               | Sonstige verkehrliche Gründe EVU | 69                    | Sonstiges Fahrzeuge EVU  |                      |                       |                                |   |  |

Folgeverspätungen

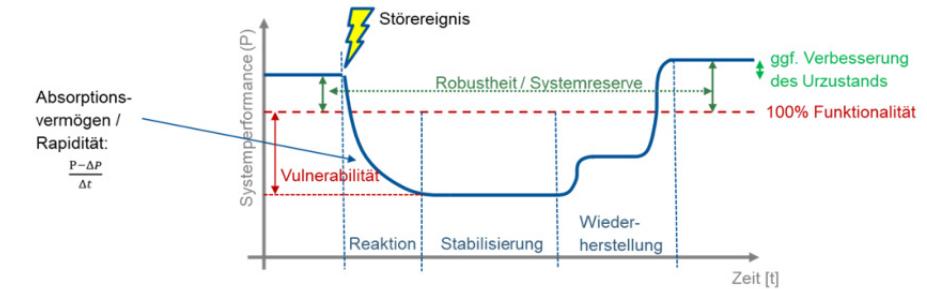
## Pünktlichkeit



- Betriebliche Pünktlichkeit:  
Zugverspätung < 5:59 min
  - Reisendenpünktlichkeit:  
Ankunftsverspätung Reisende < 14:59 min
  - Andere Länder:
    - CH: Pünktlichkeitsschwelle: 2:59 min
    - NL: Pünktlichkeitsschwelle: 4:59 min
    - AT: Pünktlichkeitsschwelle: 5:29 min
- Ein Direktvergleich der kommunizierten Pünktlichkeitswerte ohne Diskussion der Schwelwerte ist irreführend

## Begriffsklärung: Robustheit und Resilienz

- Verspätungen und Störungen im Bahnbetrieb haben mannigfaltige Ursachen
- In der Modellierung von Störungen wird unterschieden zwischen
  - kleinere, regelmäßig auftretenden Unregelmäßigkeiten (z.B. durch Witterung, erhöhtes Reisendenaufkommen, etc.)
  - Größere Störungssereignissen wie Infrastrukturausfällen oder Fahrzeugstörungen, die Veränderungen am Zuglauf bedingen

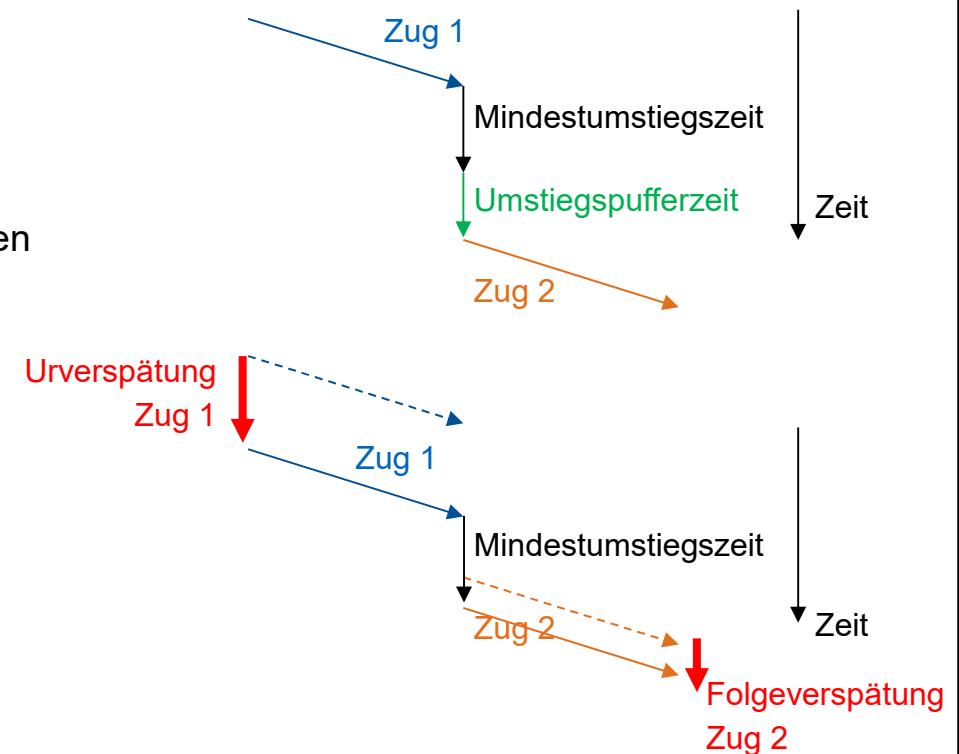


**Robustheit:** System ist auf entsprechende Störereignisse hin auszulegen  
→ Gegenstand der Dimensionierung

**Resilienz:** Management-/Mitigationsstrategien zur Behebung sind zu definieren / optimieren  
→ Gegenstand des Störungsmanagements

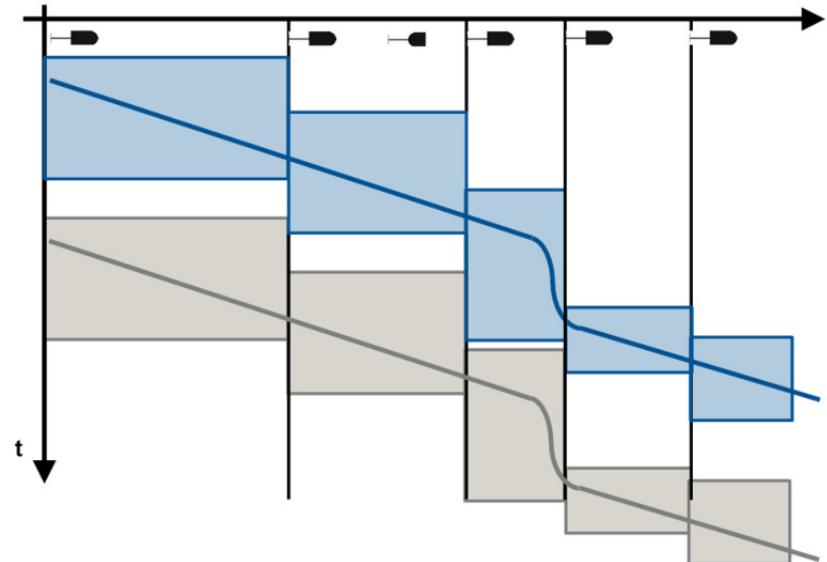
## Verspätungsübertragung

- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen



## Verspätungsübertragung

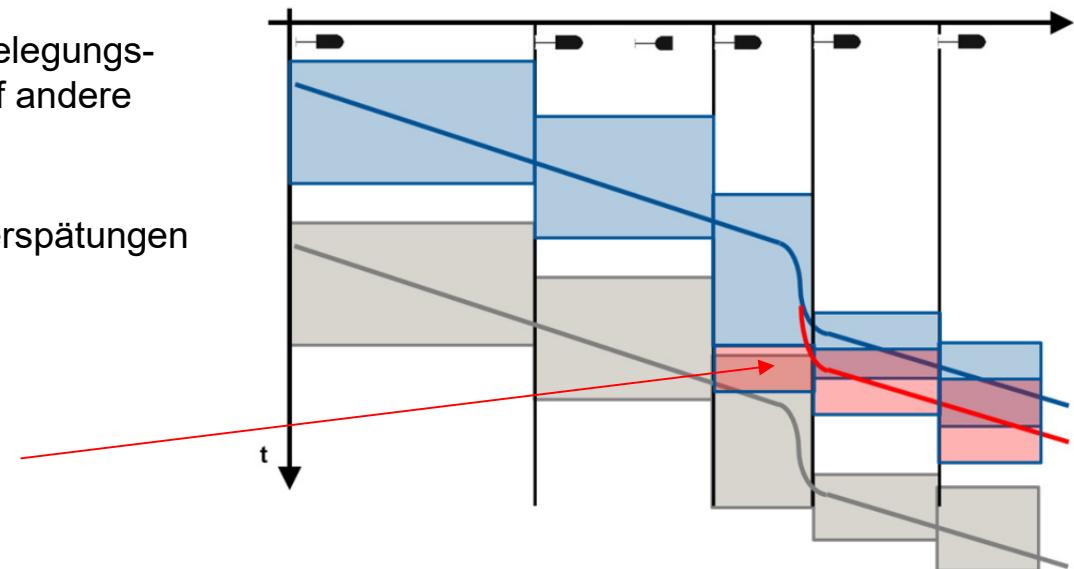
- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen



## Verspätungsübertragung

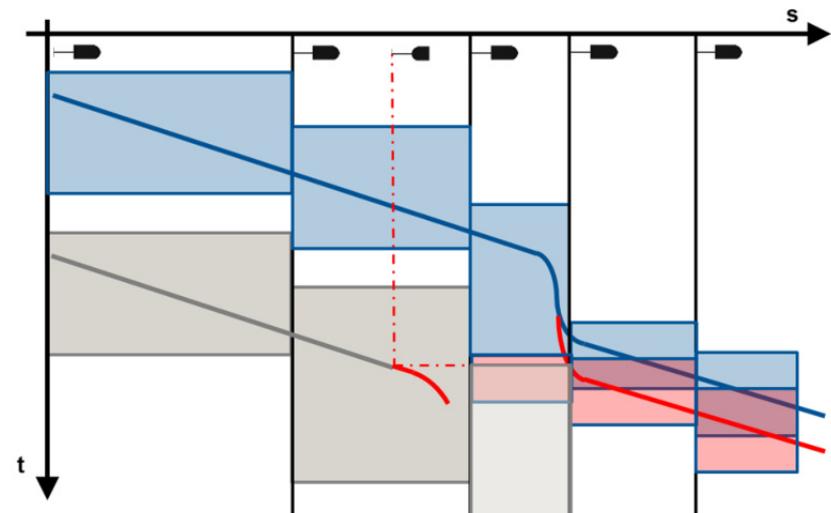
- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen

Haltezeitüberschreitung



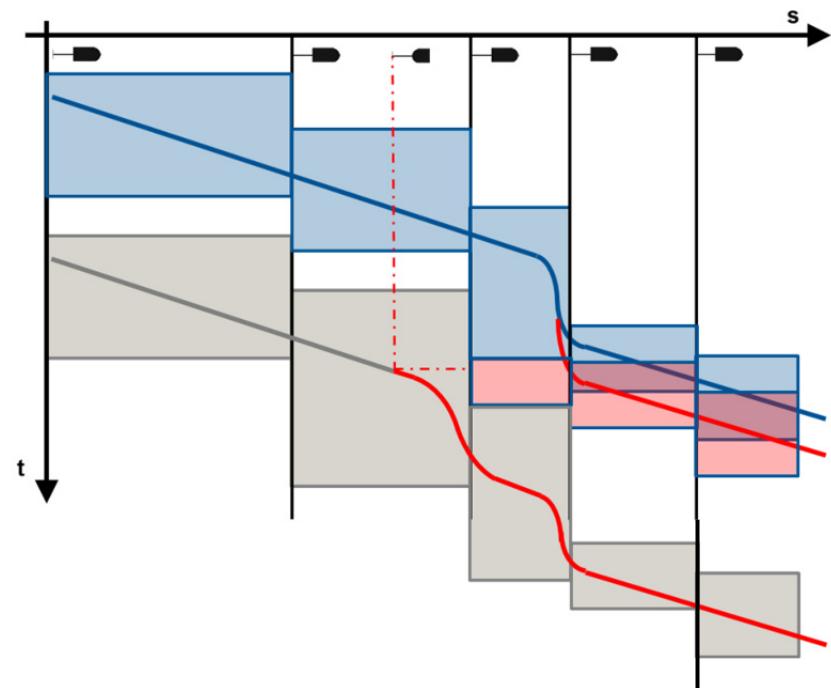
## Verspätungsübertragung

- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen



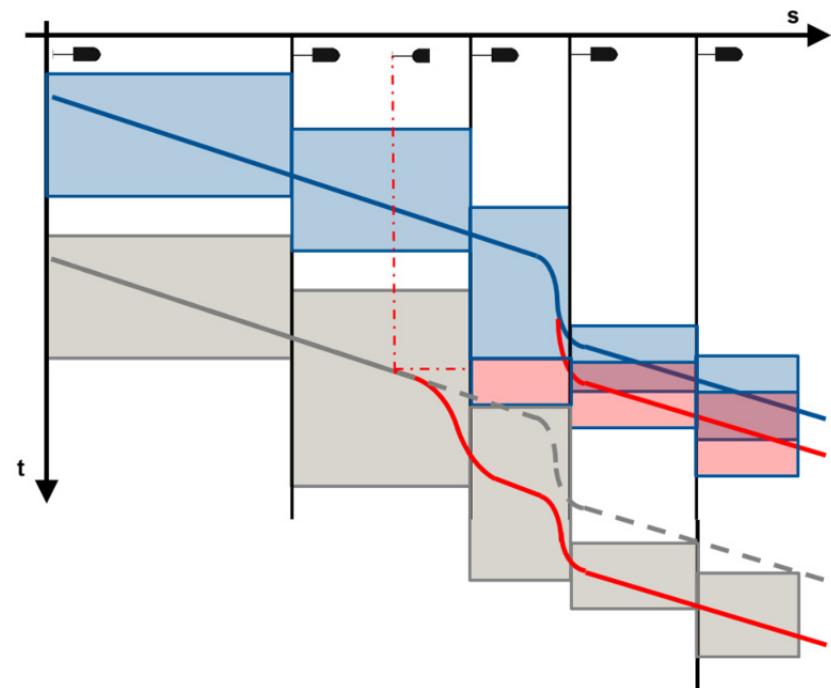
## Verspätungsübertragung

- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen



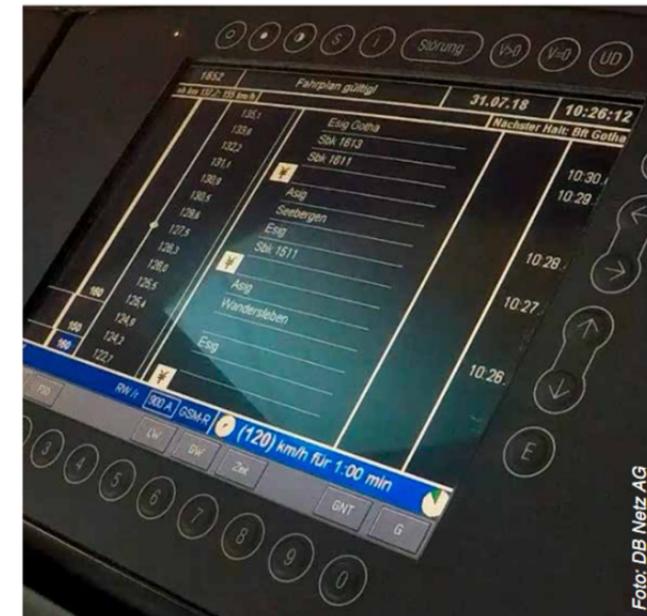
## Verspätungsübertragung

- Ein verspäteter Zug kann durch Gleisbelegungs- oder Anschlusskonflikte Verspätung auf andere Züge übertragen
  - Verspätungsübertragung / Folgeverspätungen
  - Die übertragene Folgeverspätung kann größer als die Differenz der Fahrlagen sein
  - Nichtlineare Effekte durch Veränderung des Geschwindigkeitsprofils



## Verspätungsmanagement

- Intelligentes Verspätungsmanagement ist eine gesamtheitliche Aufgabe
  - Planung robuster Fahrpläne mit hinreichend Reserven und Pufferzeiten
  - frühzeitige Erkennung und Lösung von Konflikten
  - Bereitstellung wertiger Informationen an den Triebfahrzeugführer
  - Präzises und vorausschauendes Fahren
  - Technische Hilfssysteme / Fahrerassistenzsysteme
  - Zukünftig: integriertes Kapazitäts- und Verkehrsmanagementsystem (CTMS) als Grundlage für die betrieblich präzise Steuerung des Systems Bahn



## Organisation der Disposition

- Europäische Bahnsystem: Komplexe Netzwerke mit langreichweitigen Wechselwirkungen
- Betriebliche Entscheidungen an Ort A können Auswirkung auf andere Regionen haben
  - Netzwerkeffekte
    - Belegungskonflikte
    - Anschlusskonflikte
    - Umläufe (Personal/Fahrzeuge)
  - Folgeverspätungen
- Zentrale, harmonisierte Steuerung nötig
  - Regionale Betriebsleitstellenn
  - Netzleitzentrale für Koordination auf nationaler Ebene



## Aufgaben und Ziele der Disposition



### Ziele der Disposition:

*Die betriebliche Disposition hat die Erkennung und Lösung betrieblicher Konflikte zum Ziel, sodass die betriebliche Stabilität optimiert und Verspätungen minimiert werden. Entscheidungsgrundlage sind hierfür die gegenwärtige oder prognostizierte Netzsituation.*

### Aufgaben der Disposition:

- Überwachung des Betriebs  
→ Vergleich geplanter und tatsächlicher Zugtrajektorien
- Konflikterkennung  
→ Prognose der Zeit-Weg-Linien / betrieblichen Sperrzeiten der Züge
- Konfliktlösung → Bewertung der Effekte möglicher Konfliktlösungen und Lösen von Konflikten inklusive möglicher Folgekonflikte
- Umsetzung der Konfliktlösungsentscheidungen und Kommunikation mit den EVUs / Triebfahrzeugführer

## Aufgaben und Ziele der Disposition

### Dispositionsziele nach RiL 420

- Wiederherstellung der Planmäßigkeit bzw. des Regelzustands
- Gewährleistung der Flüssigkeit des Betriebes
- Verbesserung der Gesamtpünktlichkeit aller Züge
- maximale Auslastung der Kapazität von Strecken und Knoten

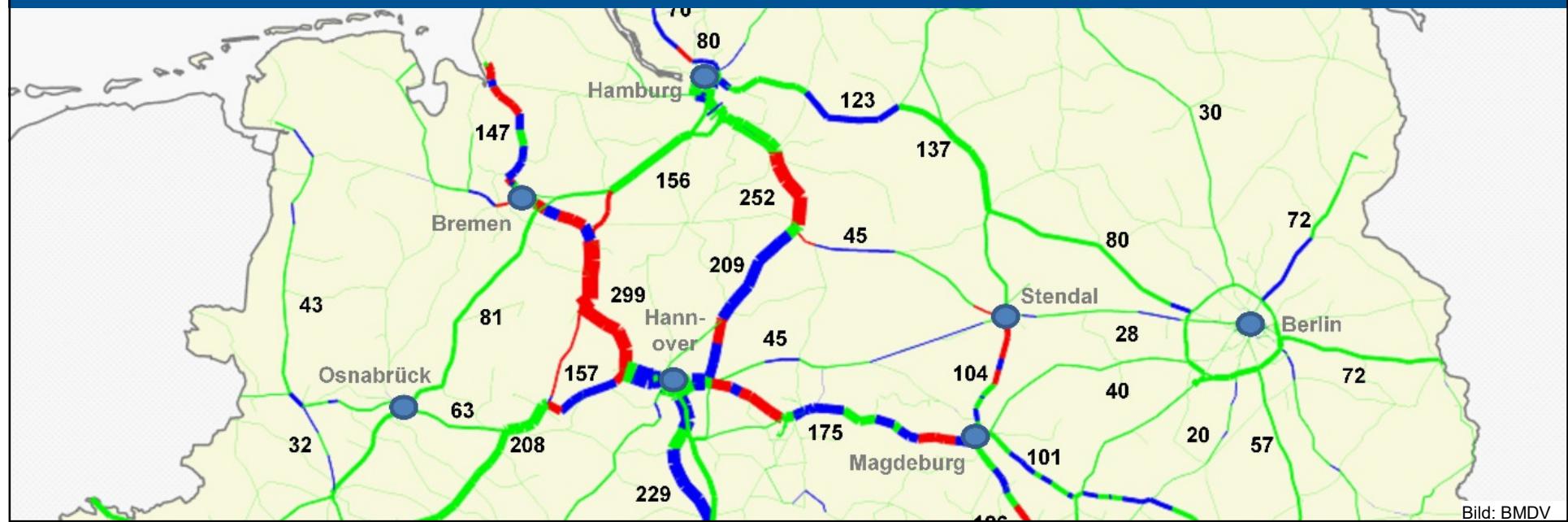
Zum Erreichen der Ziele gelten grundsätzlich folgende Präzedenzregelungen:

1. Dringende Hilfszüge
  2. Schienenpersonenfernverkehr, Marktsegment „Express“
  3. Express-Güterzüge
  4. Bei gleichwertigen Zügen haben schnellere Züge grundsätzlich Vorrang
- Dispositionsunterschützung auf Basis mathem. Optimierung und KI



Bild: DB InfraGO

# Leistungsfähigkeit von Bahnanlagen



## Leistungsfähigkeit von Schienenverkehrssystemen

**Kernfrage: Wie viele Züge können auf einer gegebenen Infrastruktur in einem definierten Zeitraum betrieben werden?**

Theoretische Leistungsfähigkeit bezeichnet die Zahl maximal konfliktfrei planbarer Trassen

- Problem: Keinerlei Robustheit
- Praktisch untauglich

Die praktische Leistungsfähigkeit bewertet die Leistungsfähigkeit in Relation zu einem Qualitätsmaß (Level of Service), das eingehalten werden soll

- Bedarf dafür Modellen, die den Zusammenhang zwischen Zugzahl und Qualität modellieren



Bild: N. Weik

## Die darstellbare Leistungsfähigkeit hängt ab von...

- Mindestzugfolgezeiten
  - Infrastruktur (Blocklängen, Sicherungssystem)
- Betriebsprogramm
  - Zuggeschwindigkeiten
  - Geschwindigkeitsschere (Variation)
  - Haltepolitiken
  - Zugfolge
- Betrieblicher Effizienz
  - Grundzuverlässigkeit / Stärke des Störgeschehens (Grundrauschen)

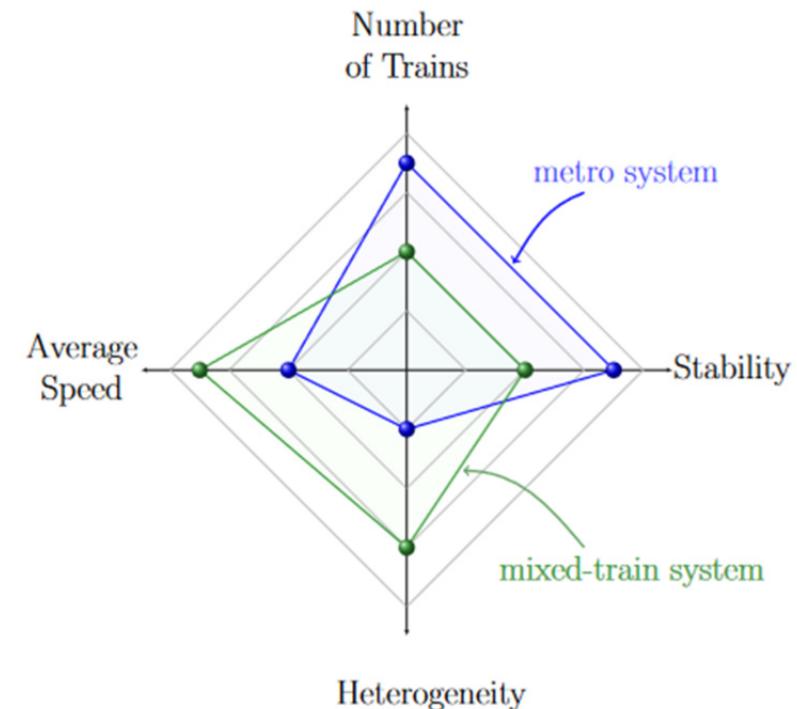
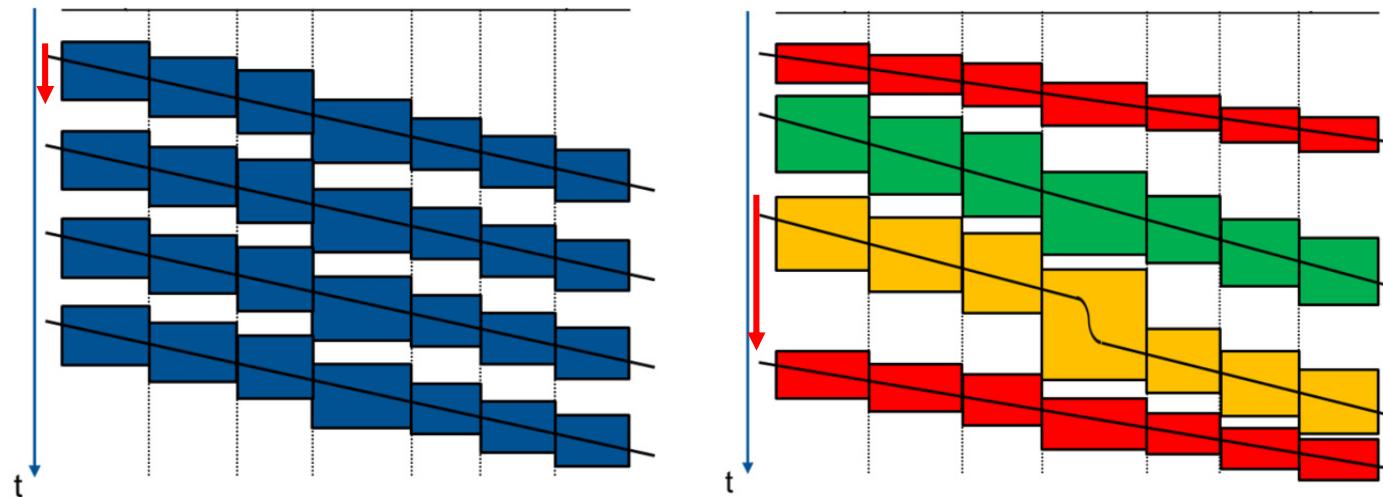
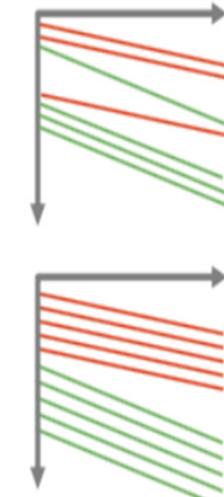


Bild: Weik, 2020 nach UIC, 2004

## Heterogenität des Betriebsprogramms führt zu ineffizienterer Kapazitätsnutzung

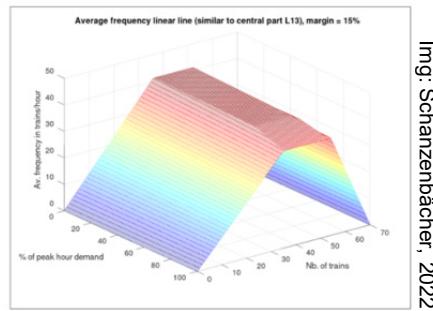


- Auslastung als internationales Maß für Kapazität
- Unzureichend zur Charakterisierung der Betriebsqualität:
  - Verfahren zur Leistungsfähigkeitsbewertung



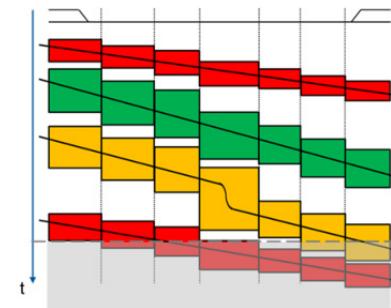
## Vier Gruppen von Indikatoren, die in Kapazitätsplanungsverfahren zum Einsatz kommen

### Machbarkeit / Durchsatz

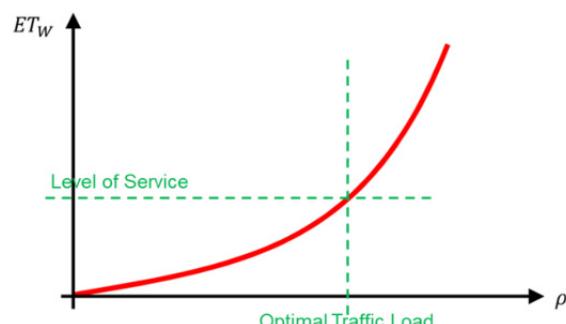


Img: Schanzenbächer, 2022

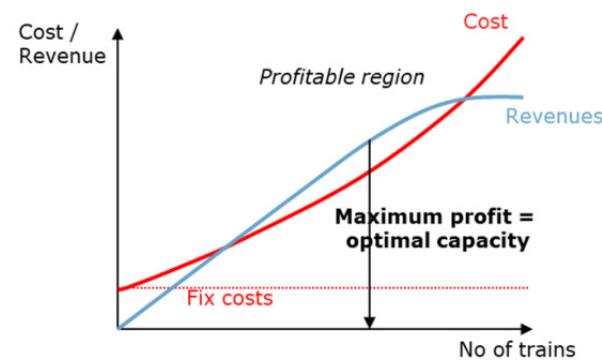
### Auslastung



**(Kunden-/Betriebsbezogene)**  
Qualitätsindikatoren  
**(Pünktlichkeit, Verspätungen, Reisezeiten, etc.):**



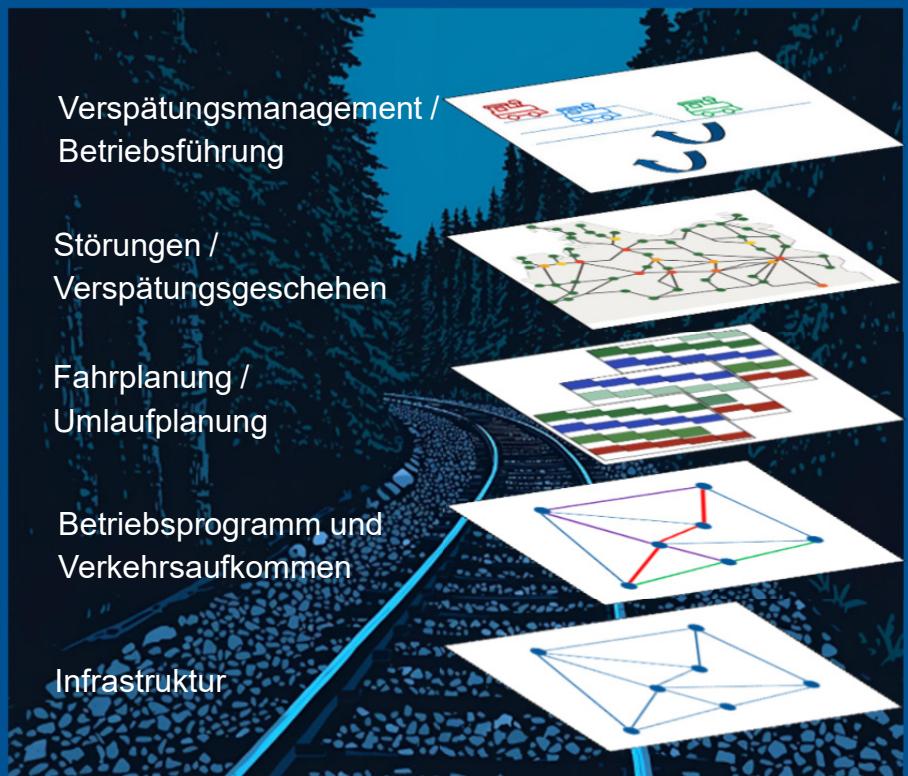
### (Sozio-ökonomische) Nutzenbetrachtungen



## Verfahren zur Leistungsfähigkeitsbewertung

|                                 | Anwendungsgebiet   | Zeithorizont  | Stärken  | Schwächen  |
|---------------------------------|--|---|--|--|
| <b>Konstruktive Methode</b><br> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrplanmachbarkeitsstudien</li> <li>einzelne, sehr spezifische Detailanalysen von Fahrplänen (insbes. Taktverkehre)</li> <li>Konstruktion von Fahrplänen für die Betriebssimulation</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Typischerweise <math>\leq 1</math> Jahr</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Detaillierte Abbildung der mikroskopischen Infrastrukturnutzung der Züge</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Gefahr der Scheingenaugkeit: Mikroskopisch konstruierter Fahrplan wird im Betrieb niemals gefahren</li> <li>Auslastung als Qualitätskennziffer nicht ausreichend</li> </ul>         |
| <b>Simulative Methode</b><br>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Fahrplanrobustheitsprüfung</li> <li>Bewertung / Optimierung von Fahrplanvarianten</li> <li>(Nebenanwendung) Asynchrone Simulation des Fahrplanerstellungsprozesses</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\leq 1</math> Jahr – ca. 5 Jahre</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Detaillierte Abbildung des Betriebsgeschehens auch über größere Netzwerkbereiche</li> <li>Direkte Entsprechung zum Eisenbahnbetrieb</li> <li>Zuglauf- und Fahrgastbezogene Auswertung möglich</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Ergebnisse für einen konkreten Fahrplan</li> <li>Gefahr unrealistischer Ergebnisse bei abweichender Abbildung der Disposition</li> </ul>  |
| <b>Analytische Methode</b><br>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Strategische Langfristplanung / Infrastrukturplanung</li> <li>Verkehrsplanung / Kapazitives Routing (z.B. BVWP-Planung)</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>1-25 Jahre</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erhalt lokaler Auslastungsparameter und parametrischer Lastkurven zur Verwendung in Verkehrsumlegungsmodellen</li> <li>Bewertung losgelöst von konkretem Fahrplan<br/>→ Infrastruktur im Fokus</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Keine Abbildung von Fahrplanzusammenhängen und Umläufen</li> <li>setzt Netzerlegung voraus<br/>→ Kapazitätsreserven auf angrenzenden Strecken passen ggf. nicht zusammen</li> </ul> |

# Bahnbetrieb als vielschichtige Aufgabe, die unterschiedliche Unternehmen, Technologien und Prozesse in einem gemeinsamen Ziel vereint



# Diskussion: Status der Eisenbahnbetriebs in Deutschland

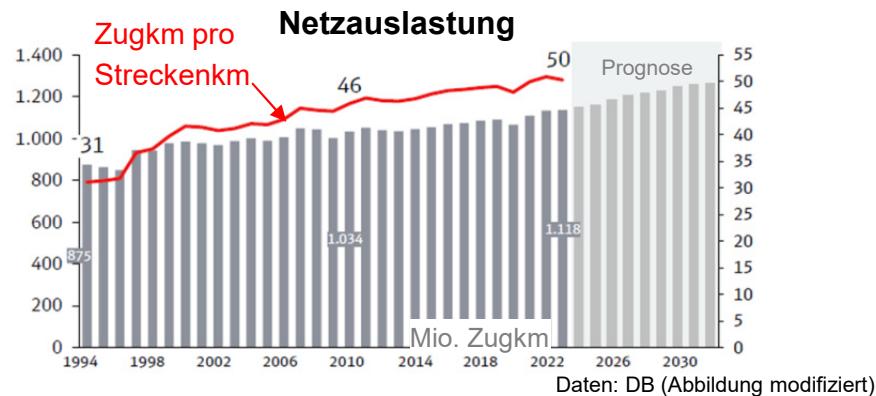


| Abfahrt Departure / Départ |          |   |                     |        |
|----------------------------|----------|---|---------------------|--------|
| Zeit Time/Temps            | Über Via | Ziel Destination                          | Gleis Platform/Voie |        |
| 19:22 20:07                | IC 2311  | Frankfurt(M)Süd - Aschaffenburg           | München Hbf         | Fern 6 |
| 19:30 21:00                | ICE 713  | Frankfurt(M)Main/Hbf                      | Fern 4              |        |
| 19:53 20:10                | ICE 912  | Düsseldorf Hbf - Duisburg Hbf - Essen Hbf | Dortmund Hbf        | 207    |
| 19:57 21:12                | ICE 1222 | Mainz Hbf - Koblenz Hbf - Solingen Hbf    | Dortmund Hbf        | Fern 7 |
| 20:09 20:31                | ICE 1690 | Frankfurt(M)Süd - Hanau Hbf - Fulda       | Berlin Ostbahnhof   | Fern 4 |
| 20:19 20:39                | ICE 129  | Frankfurt(M)Main/Hbf                      | Fern 5              |        |
| 20:23 20:58                | ICE 528  | Düsseldorf Hbf - Duisburg Hbf - Essen Hbf | Dortmund Hbf        | Fern 7 |
| 20:28 20:50                | ICE 1128 | Mainz Hbf                                 | Wiesbaden Hbf       | Fern 7 |
| x 20:29                    | ICE 929  | Zug fällt aus                             | Passau Hbf          | -      |
|                            |          | Frankfurt(M)Hbf - Nürnberg Hbf            | München Hbf         | Fern 5 |
|                            |          |   | Düsseldorf Hbf      | -      |

Img: BR

## Das deutsche Eisenbahnsystem: Status Quo

### Überaltert und überlastet



- 1994-2006: Rückbau von Infrastruktur im Zuge der Bahnreform / Privatisierung
  - Reduktion der Streckenlänge um ca. 5.000 km (~15%)
  - Rückbau von Überholgleisen, Gleiswechseln, etc.
- (Falsche) Anreize in der Finanzierung, die zur Priorisierung von Ersatz (Bund finanziert) über Erhalt (Bahn finanziert) führte
  - Zustandsverschlechterung
  - **Verlust von Resilienz**



**Das Eisenbahnsystem in Deutschland – Aktuelle Entwicklungen**

## **Generalsanierungsprogramm**

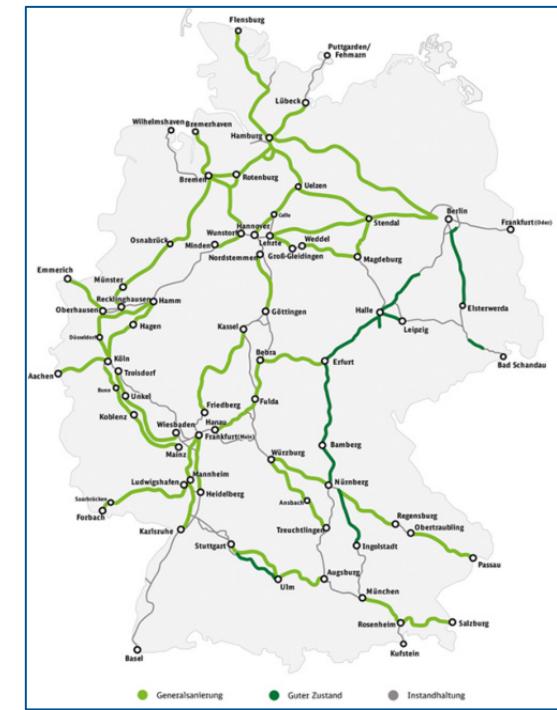
- Das deutsche „Kernnetz“ wird im Zeitraum 2024-2035 nahezu komplett generalsaniert
  - Ersatz des Oberbaus, von Ingenieurbauwerken, Upgrade der Ausrüstung (Gleiswechsel, Bahnhöfe, Sicherungstechnik (ETCS), ...)
  - Mehrmonatige Korridorsperrungen
    - Konzentration der Instandhaltung → Auswirkungen auf Servicequalität
  - 12/2024: Erstes Projekt (Riedbahn: Mannheim-Frankfurt) abgeschlossen  
<https://www.deutschebahn.com/de/konzern/Aktuelles-/Bahnsinn-Riedbahn-Eine-deutsche-Baustelle-Blick-hinter-die-Kulissen-der-Generalsanierung-ab-sofort-alle-Folgen-der-Serie-verfuegbar-12910782>



Img: DB AG



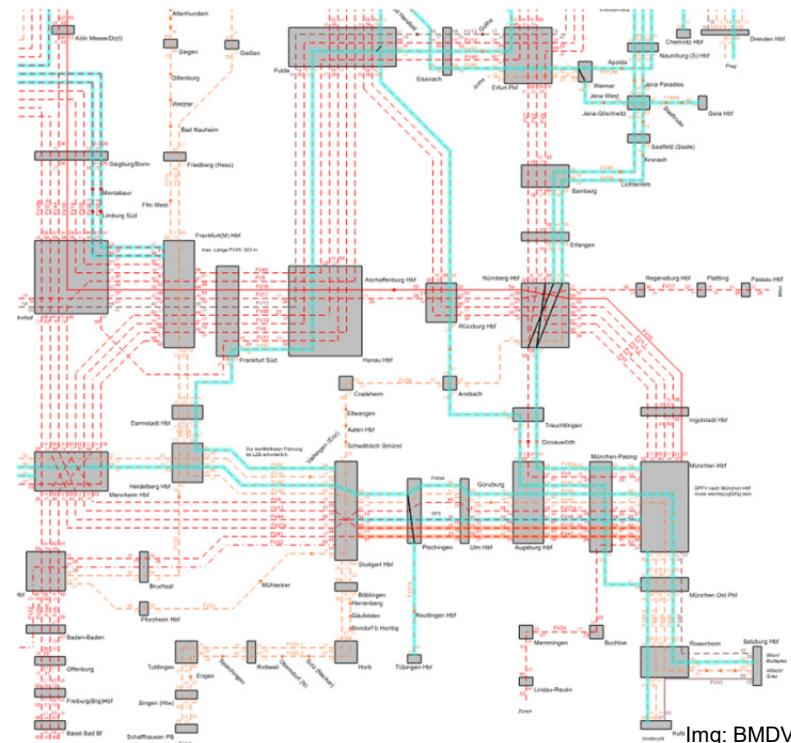
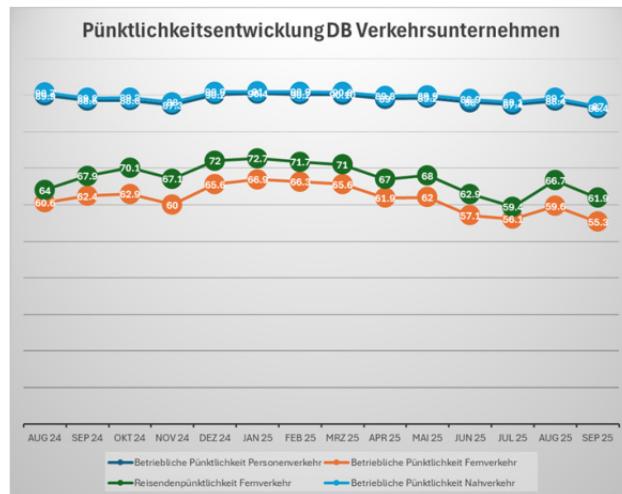
Img: DB AC



Img: DB AG

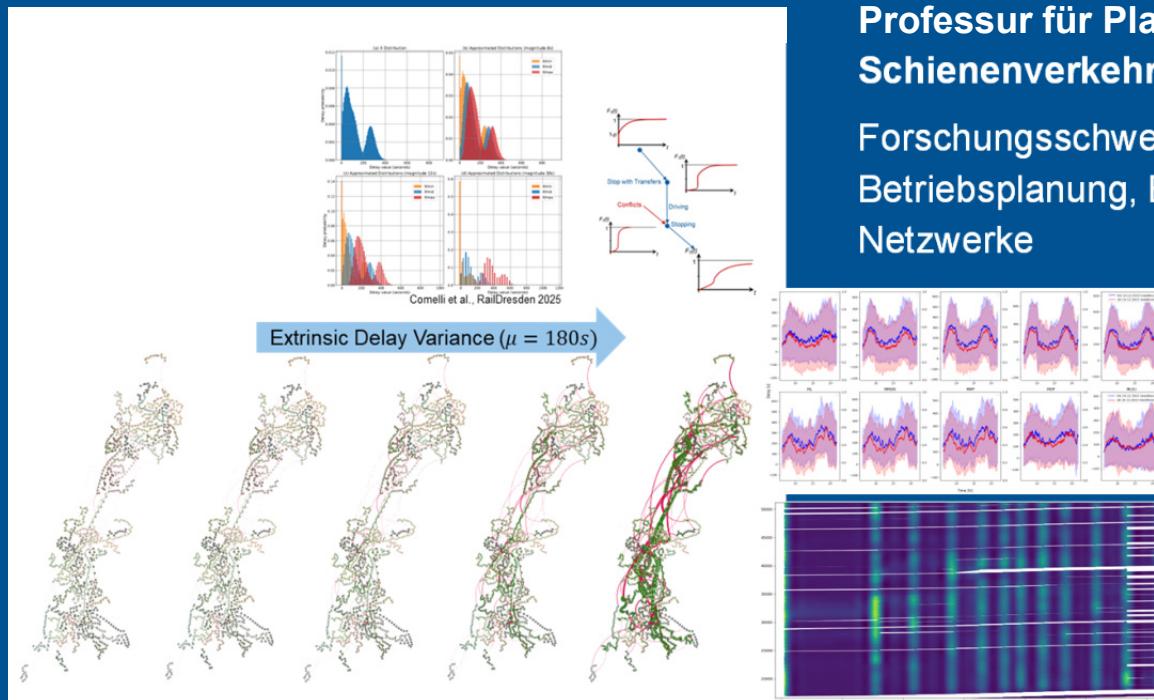
## Service Offensive – Deutschland-Takt

- Nationaler *strategischer Fahrplan als Grundlage der Angebotsplanung und Netzentwicklung*
- Nach Schweizer Vorbild: Fahrplan als Grundlage der Infrastrukturentwicklung
- Problem:



Img: BMDV

# Bei weiterführendem Interesse am Thema



**Professur für Planung und Betrieb von  
Schienenverkehrssystemen**

Forschungsschwerpunkte: Systemdesign, Netz-/  
Betriebsplanung, Betriebssteuerung, Analyse komplexer  
Netzwerke



Herzlichen Dank!



# Kontakt

Prof. Dr. Norman Weik  
Professur für Planung und Betrieb  
von Schienenverkehrssystemen

Parkring 35  
85748 Garching

[norman.weik@tum.de](mailto:norman.weik@tum.de)  
[rts@ed.tum.de](mailto:rts@ed.tum.de)  
[www.mos.ed.tum.de/rts](http://www.mos.ed.tum.de/rts)

