

Navigation im Schienenverkehrsmanagement

Aufbau und Besonderheiten
Regelungstechnisches Konzept
Zulaufsteuerung und Zuglaufregelung
Geregelter Schienenknotenverkehr

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Beyer

4 Schienenverkehrsmanagement

- Vorwort und Einleitung**
- Aufbau eines Managementsystems**
 - **Komponenten, Aufgaben, Anforderungen, Herausforderungen**
- Besonderheiten im Schienenverkehr**
 - **Fahrpläne, Knoten-, Kanten- und Folgeverspätungen**
 - **Regelungstechnisches Konzept**
- Geregelter Schienenknotenverkehr**
 - **Zulaufsteuerung**
 - **Zuglaufregelung**
 - **Knotenzulaufregelung**
- Simulationsbeispiel und Diskussion**

- Navigation im Schienenverkehrsmanagement ist eine Dienstleistung.
- Neben der Positionsbestimmung muss auch ein Verfahren zur „nutzbringenden“ Fahrzeug-Bewegung, also klassisch Navigation, bereitgestellt werden.
- Das aufgezeigte Konzept kann nicht nur am Beispiel Zuglauf angewandt werden. Allerdings ist es hier durch die Schienenführung deutlich einfacher umzusetzen.
- Zunächst wird ein möglicher Ansatz zur Zulaufsteuerung eines Zuglaufs vorgestellt. Diese Zulaufsteuerung dient als Sollwert einer Fahrzeug-Regelung.
- Die Positionierung liefert den Istwert, der durch einen Fahrzeugregler auf den bereitgestellten Sollwert gebracht wird. Dadurch wird der Sollwert eingehalten und dient auch zur Bestimmung der „geregelten“ estimated time of arrival ETA.
- Durch die gesteigerte Präzision der Bewegung und die Vorhersagbarkeit (die Wirklichkeit folgt dem Planungsmodell, da jetzt geregelt wird) kann wiederum eine ganze Fahrzeugflotte gemanagt werden.
- Hierbei wird den Fahrzeugen eine required time of arrival RTA vorgegeben. Also, sei zu einem gesetzten Zeitpunkt mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit an einem bestimmten Ort. Die Regelung sorgt für die Einhaltung der Vorgaben.
- Aufgrund der durch die Regelung erzeugten Präzision der Operation, lässt sich mit der modellgestützten Bewegungsplanung (also der Navigation) von Flotten beginnen.

- Warum Navigation im Schienenverkehr ?
 - Etabliertes Landverkehrssystem
 - Eindimensionale (einfache?) Navigation
 - Zusammenspiel von Fahrzeugen und Infrastruktur
 - Zusammenspiel von Planung und Betriebsdurchführung
 - Prädestiniert für den geplanten und prädizierbaren Verkehr
 - Herausforderung: Planung mit „Aufenthaltswahrscheinlichkeiten“
 - Geplante Zugposition bei Überlagerung der Sicherungstechnik
 - Der Zugweg besteht aus hintereinander aufgereihten Blöcken
 - Solange sich ein Zug in einem Block befindet, löst er für diesen Block automatisch eine Sperrzeit für nachfolgende Züge aus
 - Die Planung legt also die zeitliche Abfolge von Trassenräumen fest
 - Verlässt ein Zug seinen in der Planung zugewiesenen Trassenraum (Verspätung, Verfrühung), so überträgt er sein Problem durch die Sicherungstechnik auch auf nachfolgende und kreuzende Züge

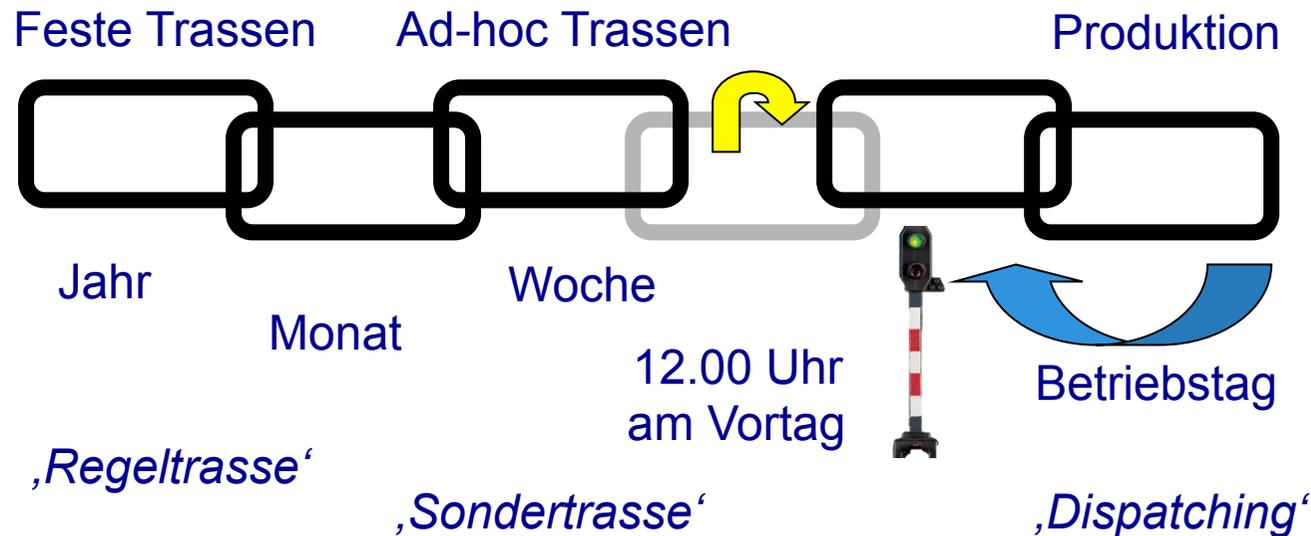
Interaktion zwischen Planung und Betrieb

Produktionsplanung

- Trassenmanagement
- Fahrplanbearbeitung

Produktionssteuerung

- Betriebszentrale
- Betriebsführung

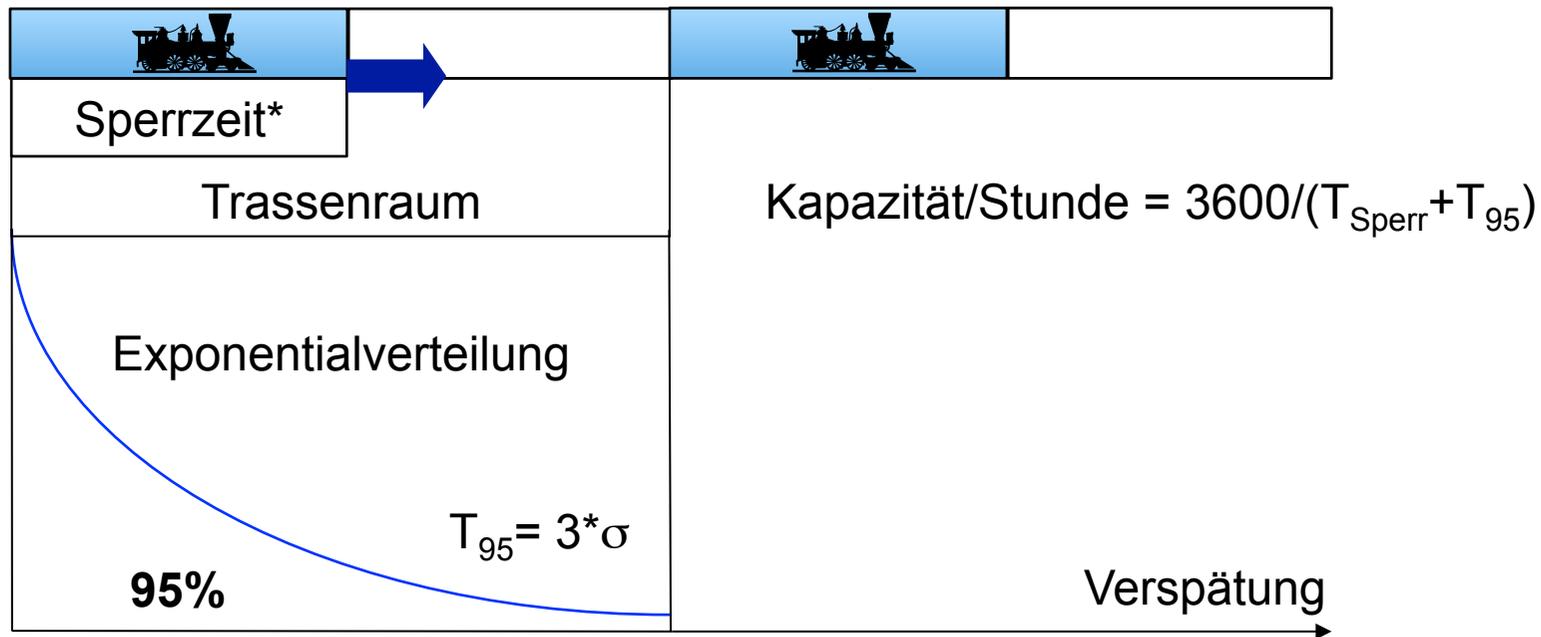


Quelle: Jürgen Beyer

Fahren im Blockabstand

$T_{Sperr} = L/V$

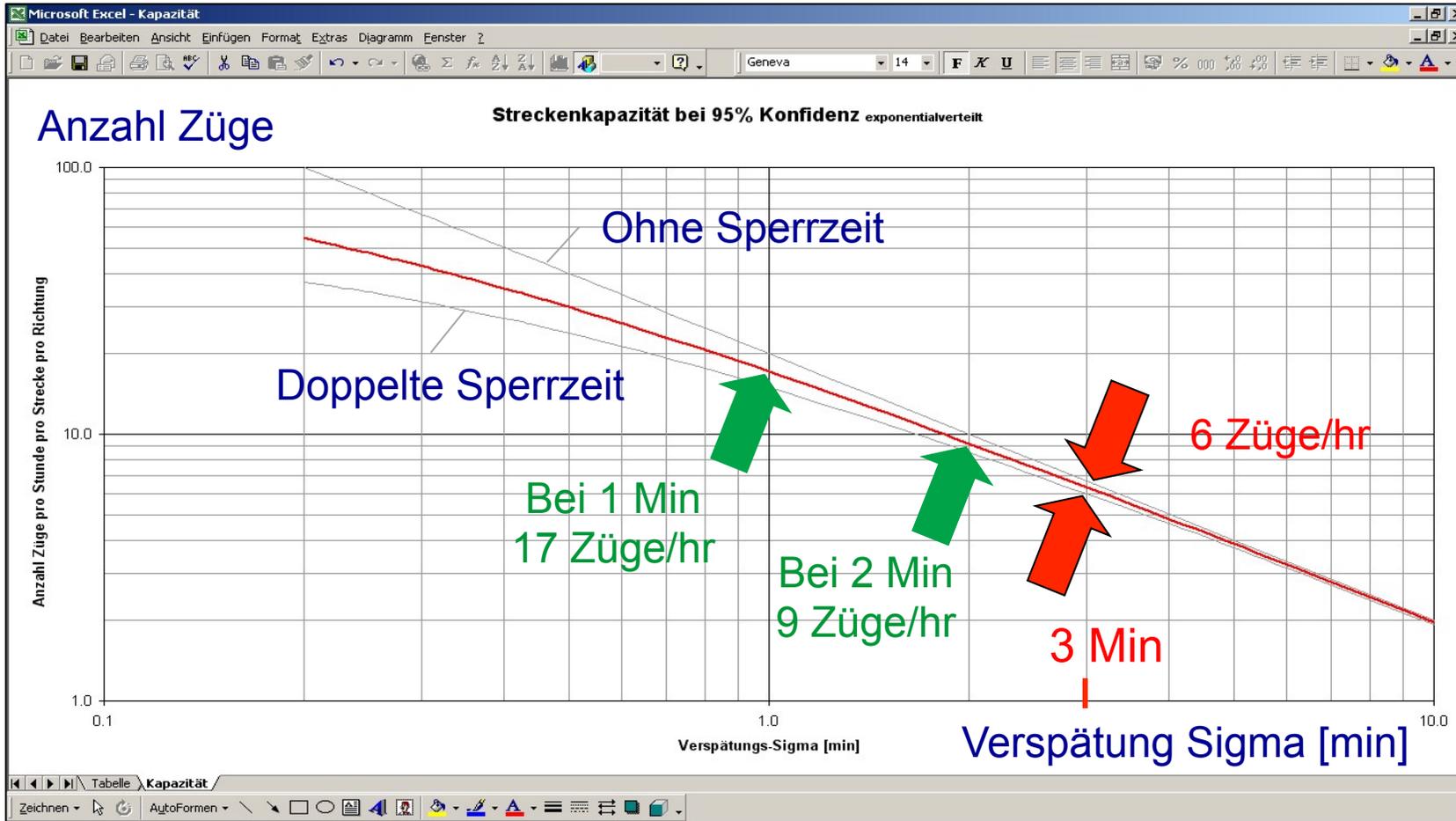
Kapazität/Stunde = $3600/T_{Sperr}$



* Der Begriff Sperrzeit wird nicht im Sinne der Richtlinie RL 405 verwendet, sondern bezeichnet die Zeit, in der ein Trassenabschnitt aufgrund einer Zugbelegung für andere Züge gesperrt ist

Quelle: Jürgen Beyer

Die Streuung der Zugposition bestimmt die Streckenkapazität



Quelle: Jürgen Beyer

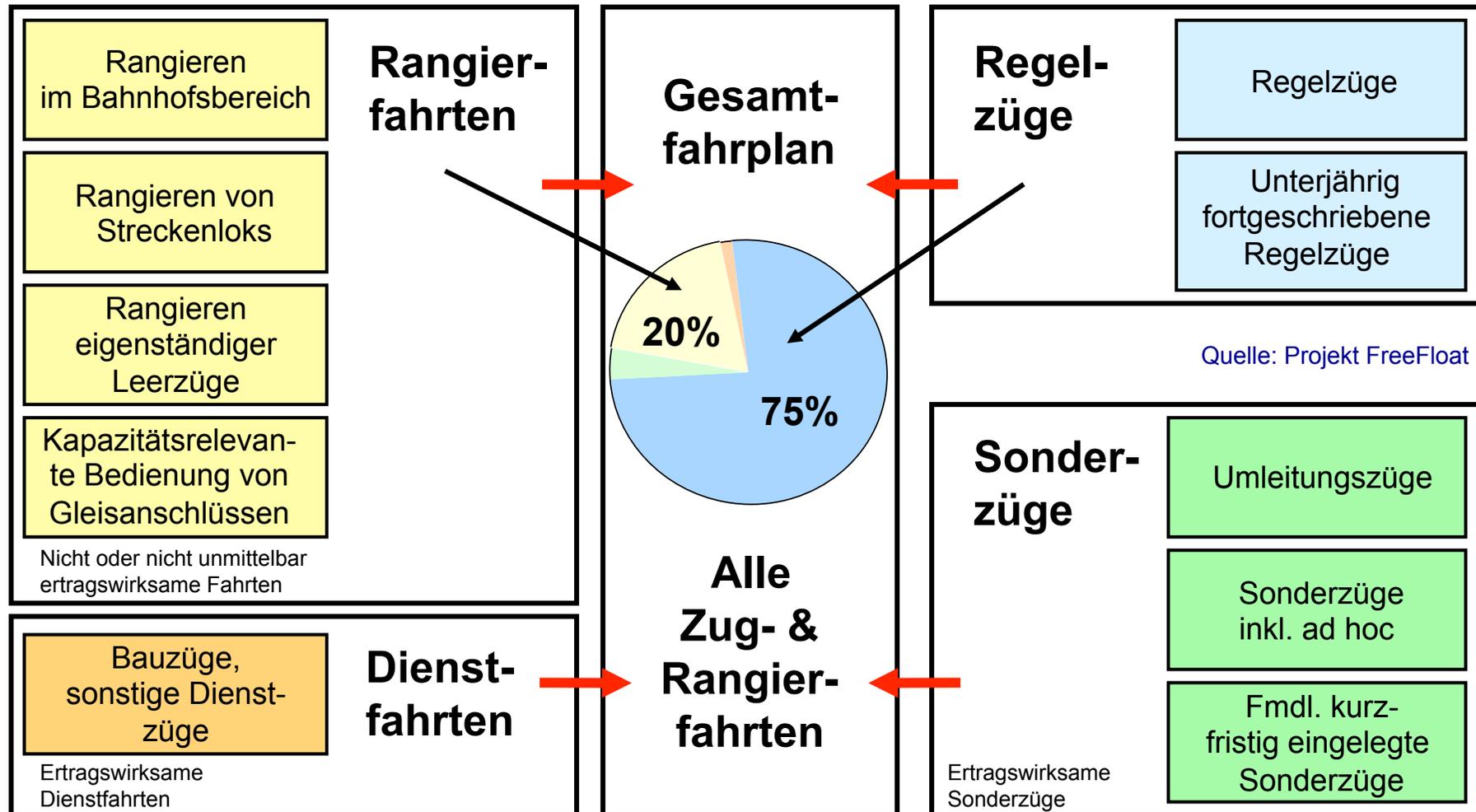
Aufbau eines Managementsystems



Quelle: Jürgen Beyer

- Gegenüberstellung von Komponenten
 - Eisenbahn: Fahrplan, Disposition, LST, Infrastruktur
 - SMGC: Planung, Operation, Navigation, Regelung
- Aufgaben und Anforderungen
 - Nachfrage, Planung, Angebot
 - Bestellung, Produktion
 - Ergebnis und Qualität
- Herausforderungen
 - Vollständige Prozess- und Wertschöpfungskette
 - Zusammenspiel ökonomischer & technischer Prozesse
 - Kurzfristigere, flexiblere und großflächiger angelegte Planung
 - Bestmöglicher Abgleich von Prognose und Zielerreichung

Besonderheiten im Schienenverkehr



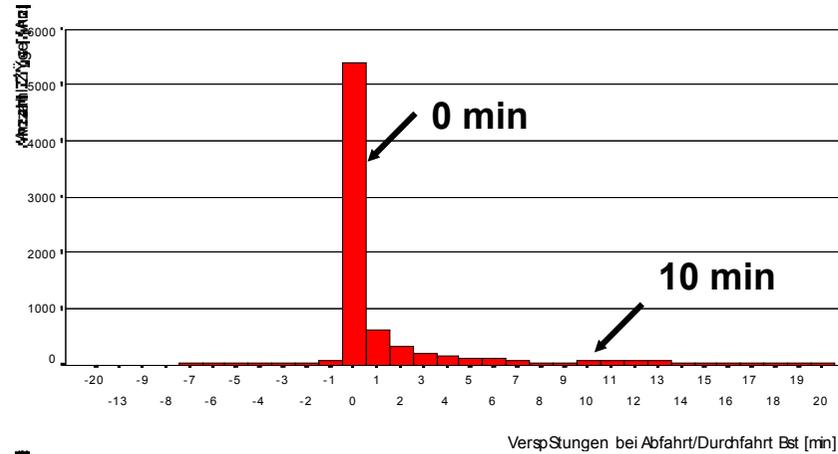
Trassen im Großknoten Nürnberg mit Zulaufstrecken für einen durchschnittlichen Betriebstag im September 02

- **Knotenstörung**
 - i.d.R. Abfahrtsverspätungen, ausgelöst durch das Einsteigeverhalten von Reisenden oder durch Verzögerungen bei der Zugfreigabe
 - Knotenstörungen führen zu näherungsweise exponentialverteilten Verspätungen im Betriebsablauf
- **Kantenstörung**
 - Variation der Zuggeschwindigkeit im Vergleich zum Fahrplan bzw. vom Lokführer gezielt vorgenommen, um bspw. Verspätungen aufzuholen
 - Kantenstörungen liefern i.d.R. normalverteilte Abweichungen (auch Verfrühung sind möglich)
- **Folgeverspätung**
 - Über Sicherungstechnik aufgeprägte Abweichung vom Fahrplan
 - Übertragung von Zug zu Zug (lawinenartige Ausbreitung)
 - Verteilung ist von Fahrplan und Infrastruktur abhängig

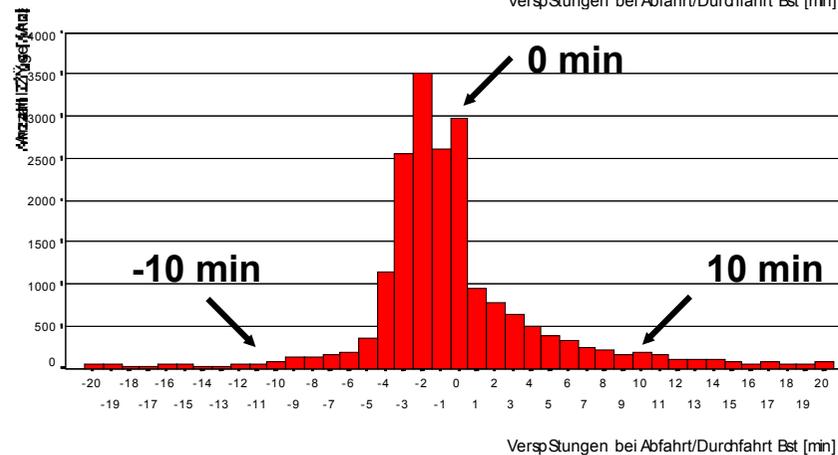
Zulaufstrecke 5:

**Bayreuth / NBY (äußerer Rand)
Nürnberg-Ost / NNO (Kernbereich)**

**Verspätungen*
bei NBY mit
Häufigkeiten**

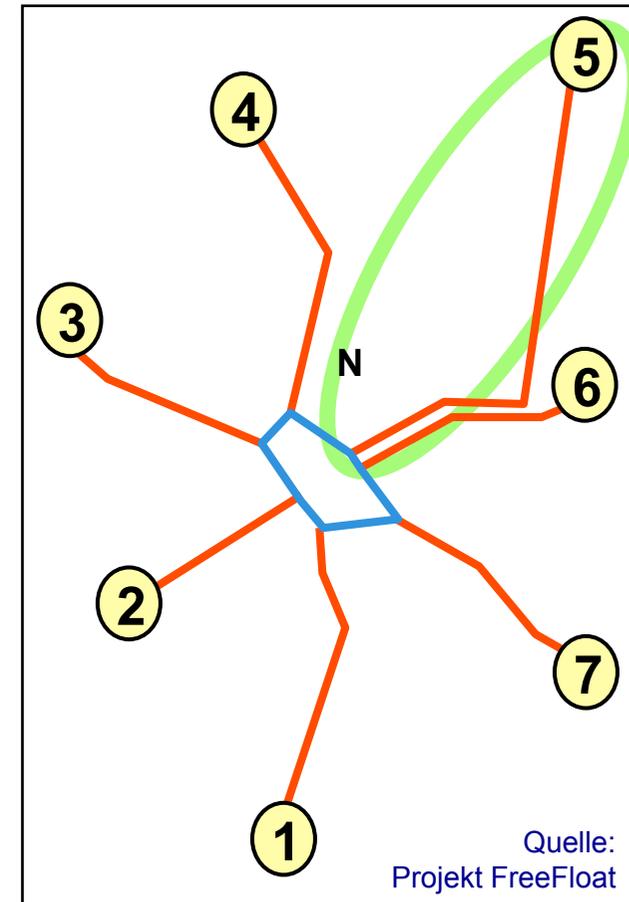


**Verspätungen*
bei NNO mit
Häufigkeiten**



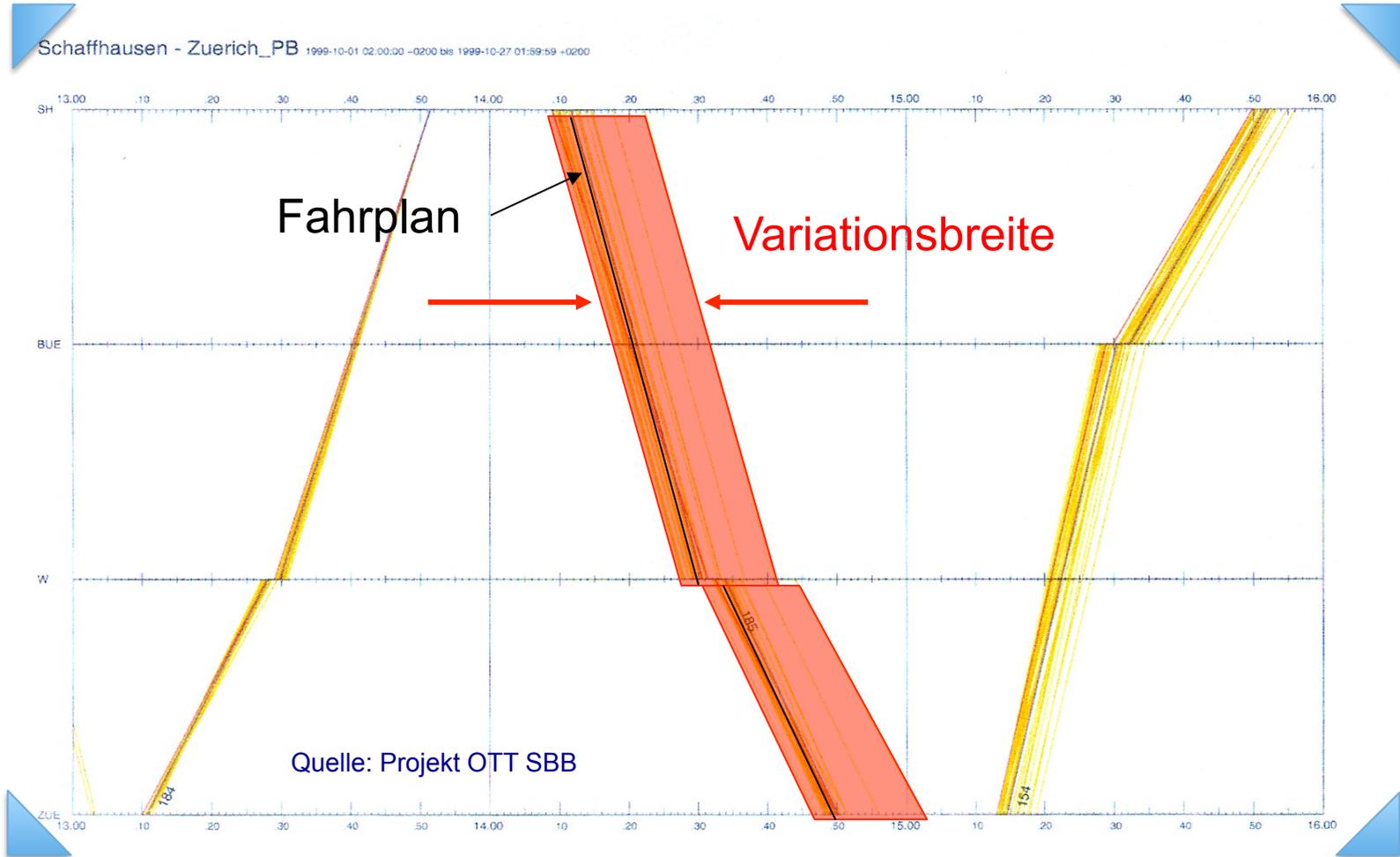
**Verspätungen
nehmen zu,
Verfrühungen
nehmen stark
zu**

**Großraum Nürnberg
mit 7 Zulaufstrecken
und definiertem Kernbereich**



*Verspätungen im Güterverkehr über einen Zeitraum von einem Jahr (August 2001 bis September 2002)

Besonderheiten im Schienenverkehr



Schaffhausen – Zürich von 13:00 Uhr bis 16:00 Uhr in der Zeit vom 1. bis zum 27. Oktober 1999

- Grundfunktionen

- Durchgängiger Planungsprozess (Planning)
- Stabilisierung des Betriebsablaufs (Control)
- Dynamische Verkehrslenkung (Adaption)
- Permanente Zustandsbestimmung (Filter)

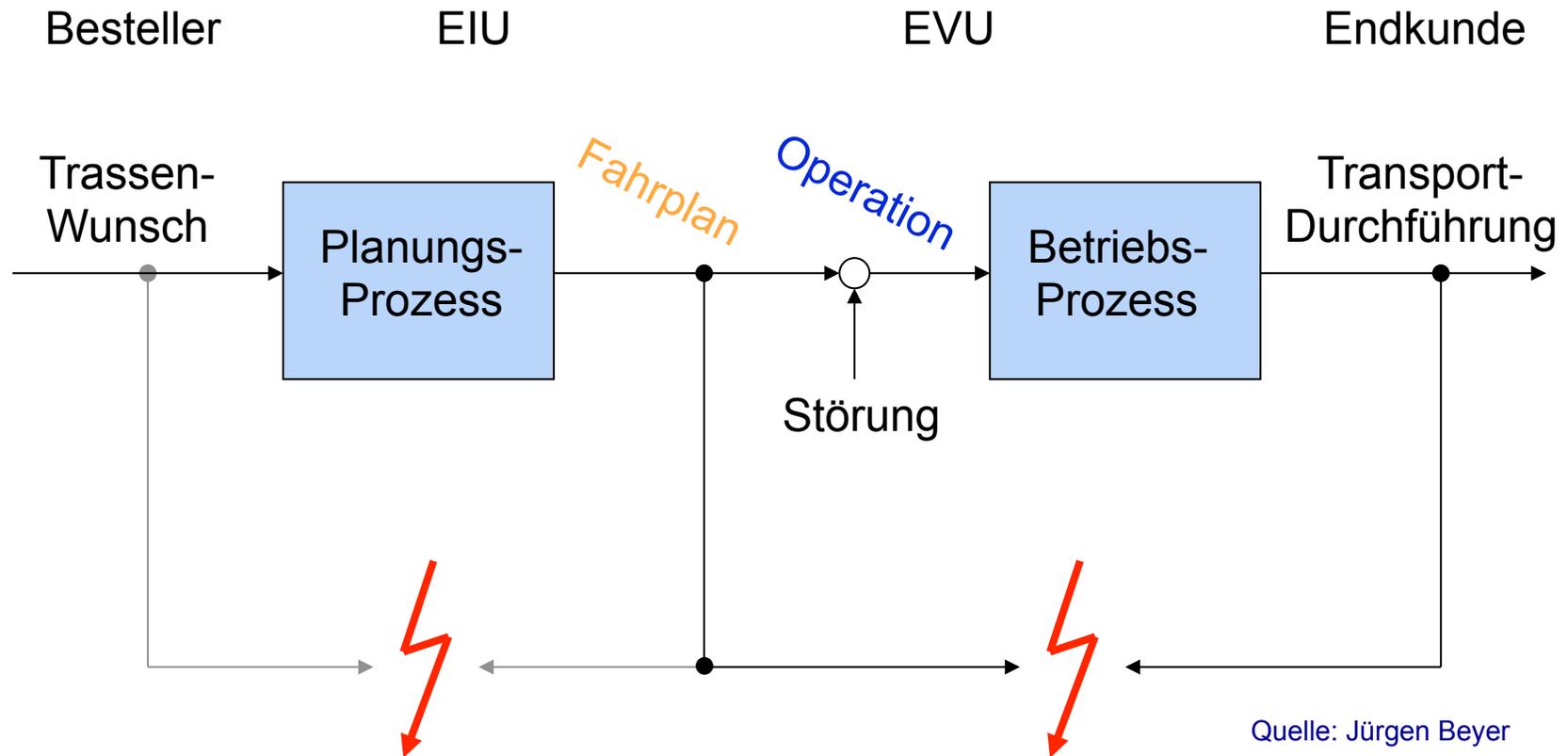
- Prozessverständnis

- Eisenbahnbetrieb ist ein stochastischer Prozess
- Kleine Störungen im Betriebsablauf sind unvermeidbar
- Berücksichtigung in Modellen nur über Wahrscheinlichkeiten
- Vorhersagen sind immer mit einer gewissen Unschärfe behaftet
- Stochastik bezieht sich auf technische sowie auf ökonomische Aspekte

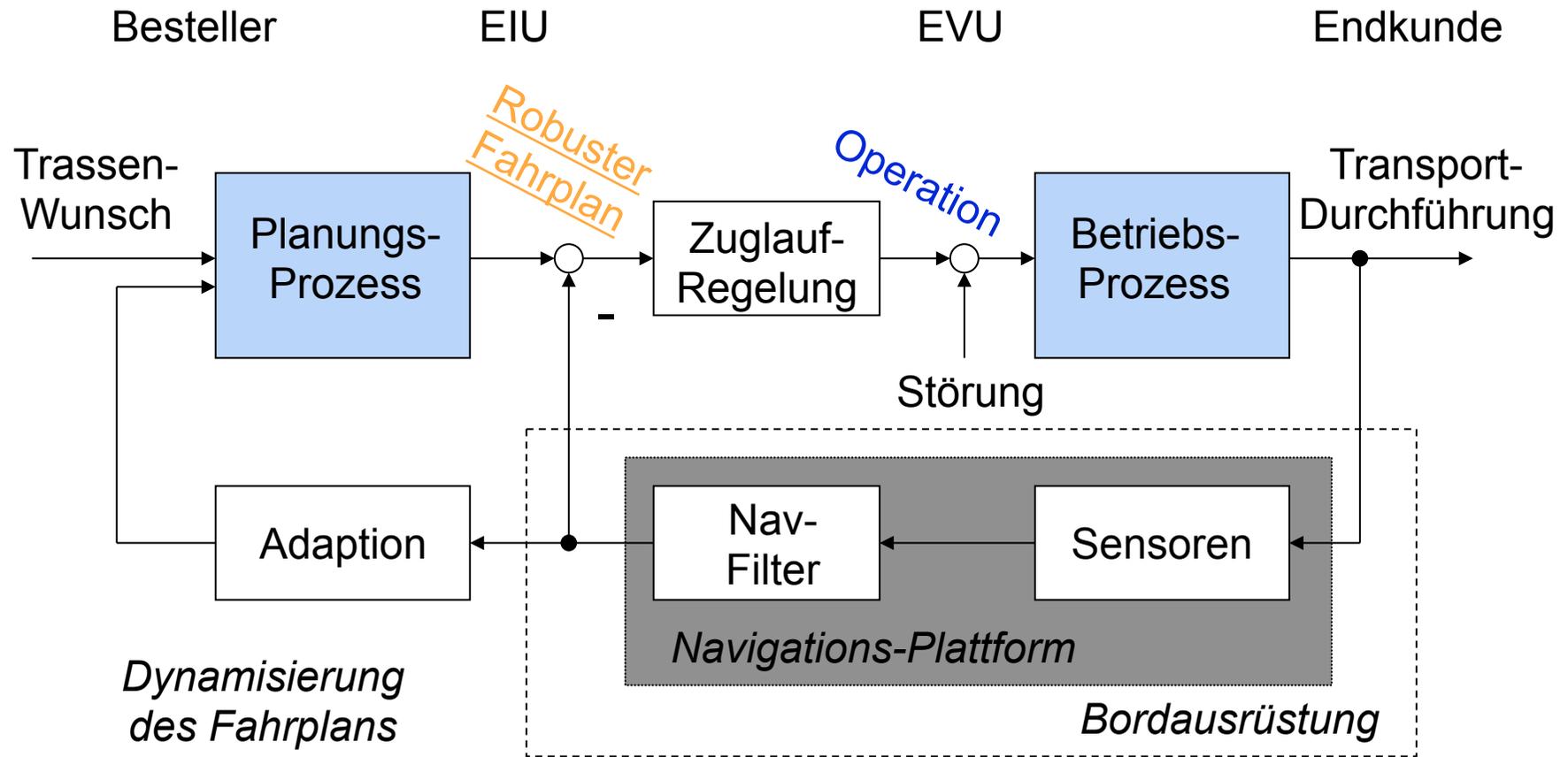


Quelle: Jürgen Beyer

Die Steuerung:



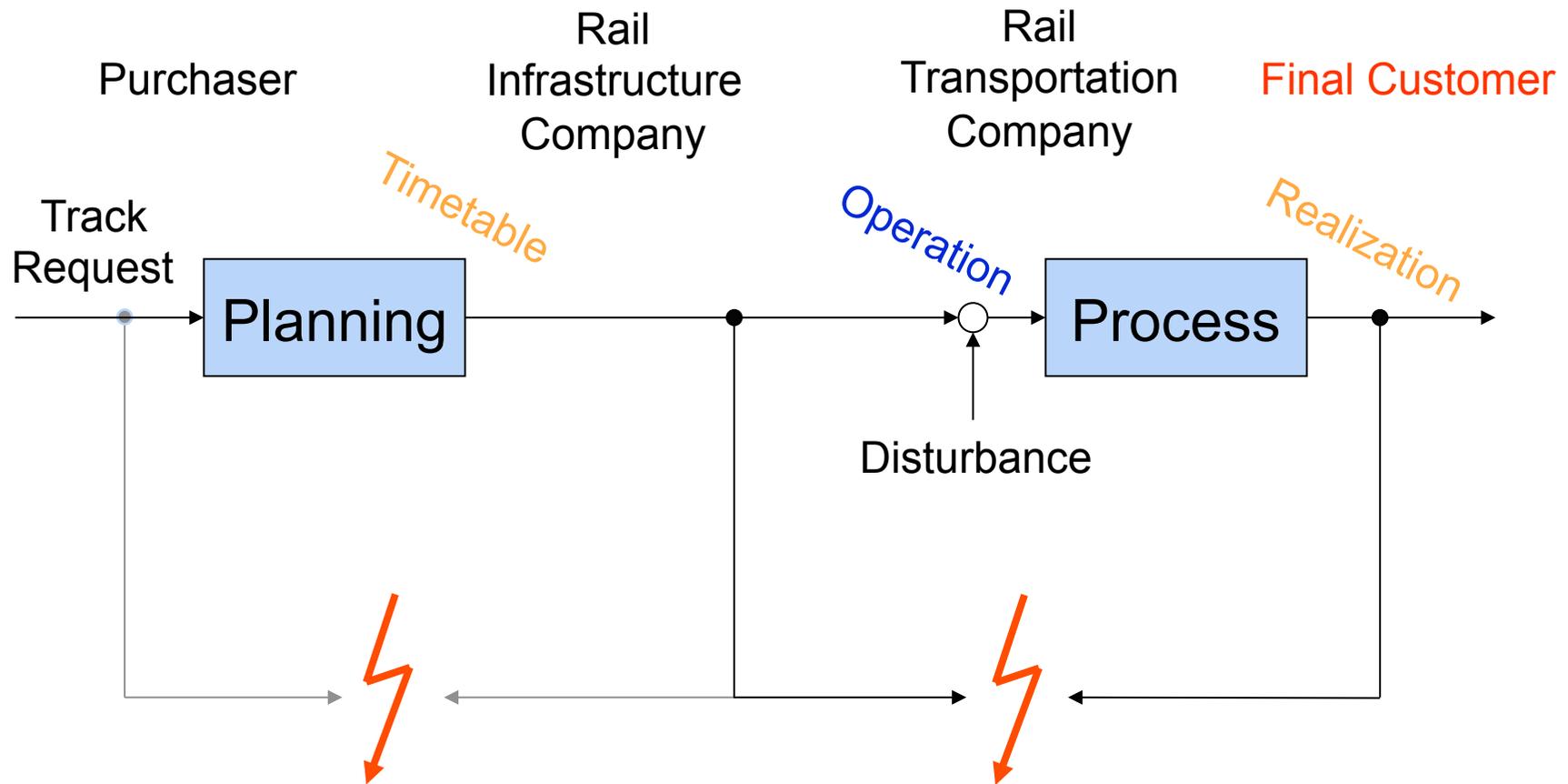
Die Regelung:



Quelle: Jürgen Beyer

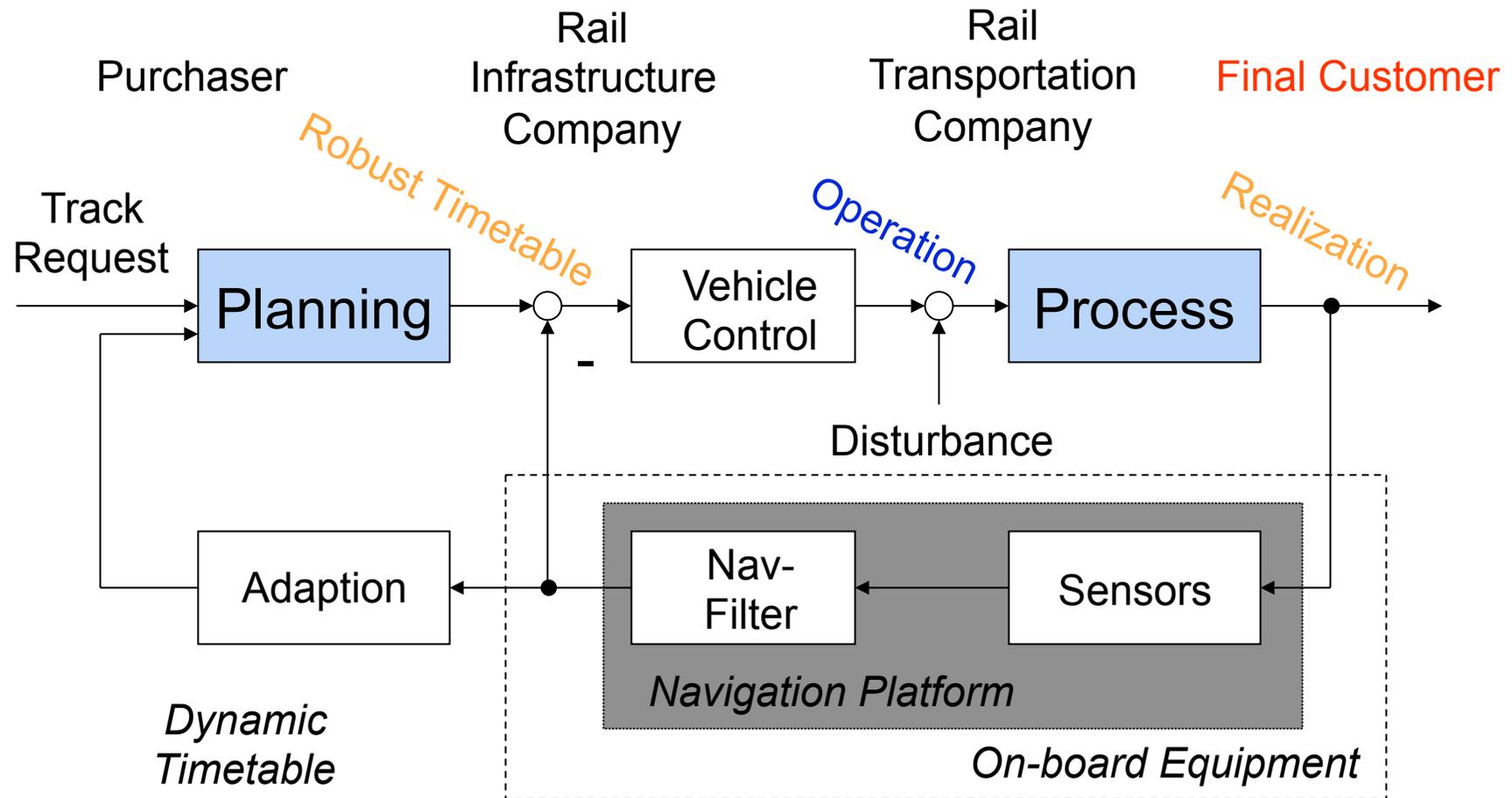
Control engineering approach

Directed Operation:



Source: Jürgen Beyer

Closed Loop Concept:



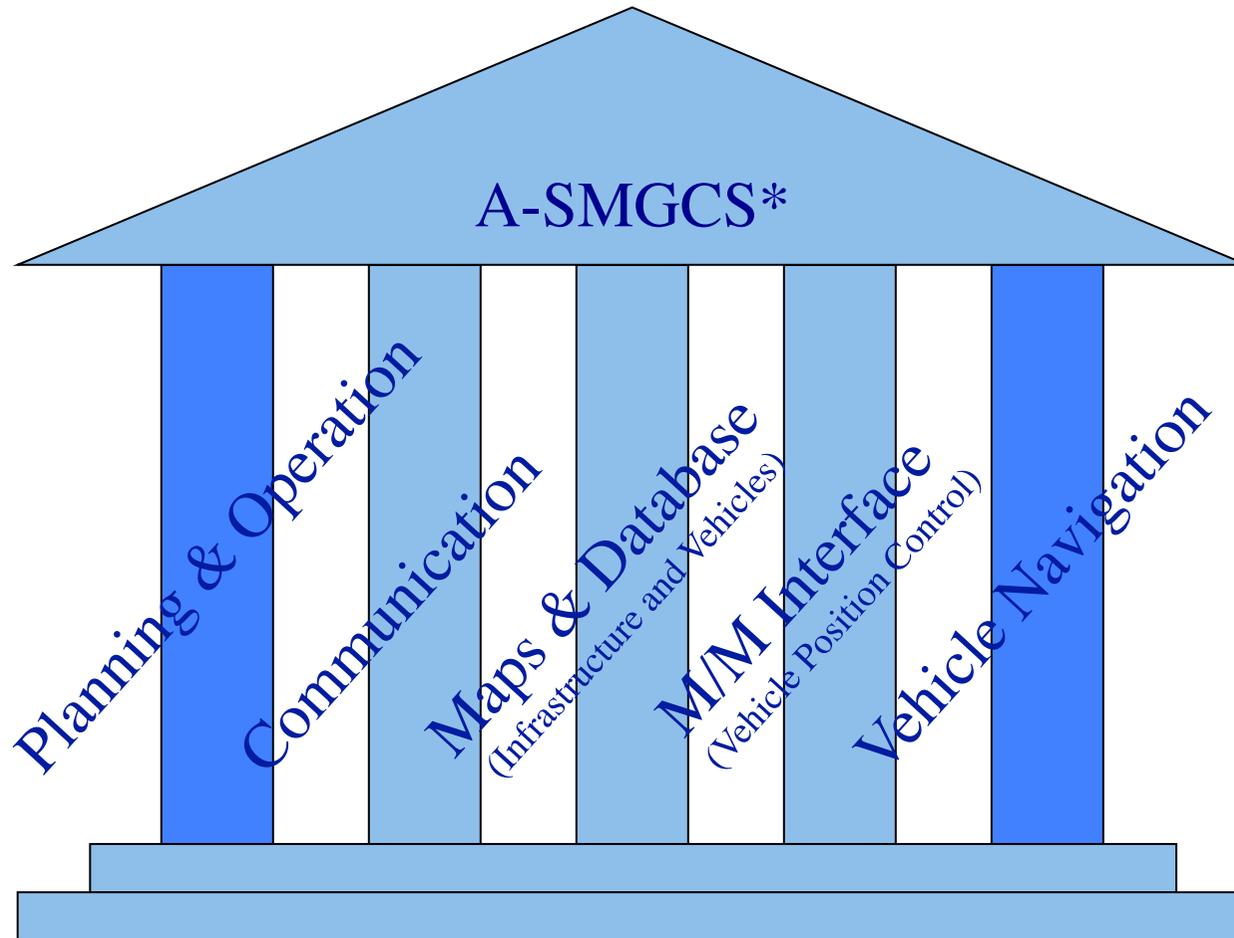
Source: Jürgen Beyer

- **Estimated Time of Arrival (ETA) = model calculation**
 - Time-table planning provides position with respect to time
- **Create reaction time = online model propagation**
 - If the process is in plan, the model in use is accurate
- **Accurate ETA = control loop organised operation**
 - Control disturbances and run process within the time-table
 - If the control loop is stable, the process will stay in plan
- **Requested Time of Arrival (RTA) = online guidance**
 - Control operation with minor online plan modifications
 - Organise optimal cooperation of involved fleet vehicles
 - RTA is the result of a fleet management planning process

Where is the Benefit ?

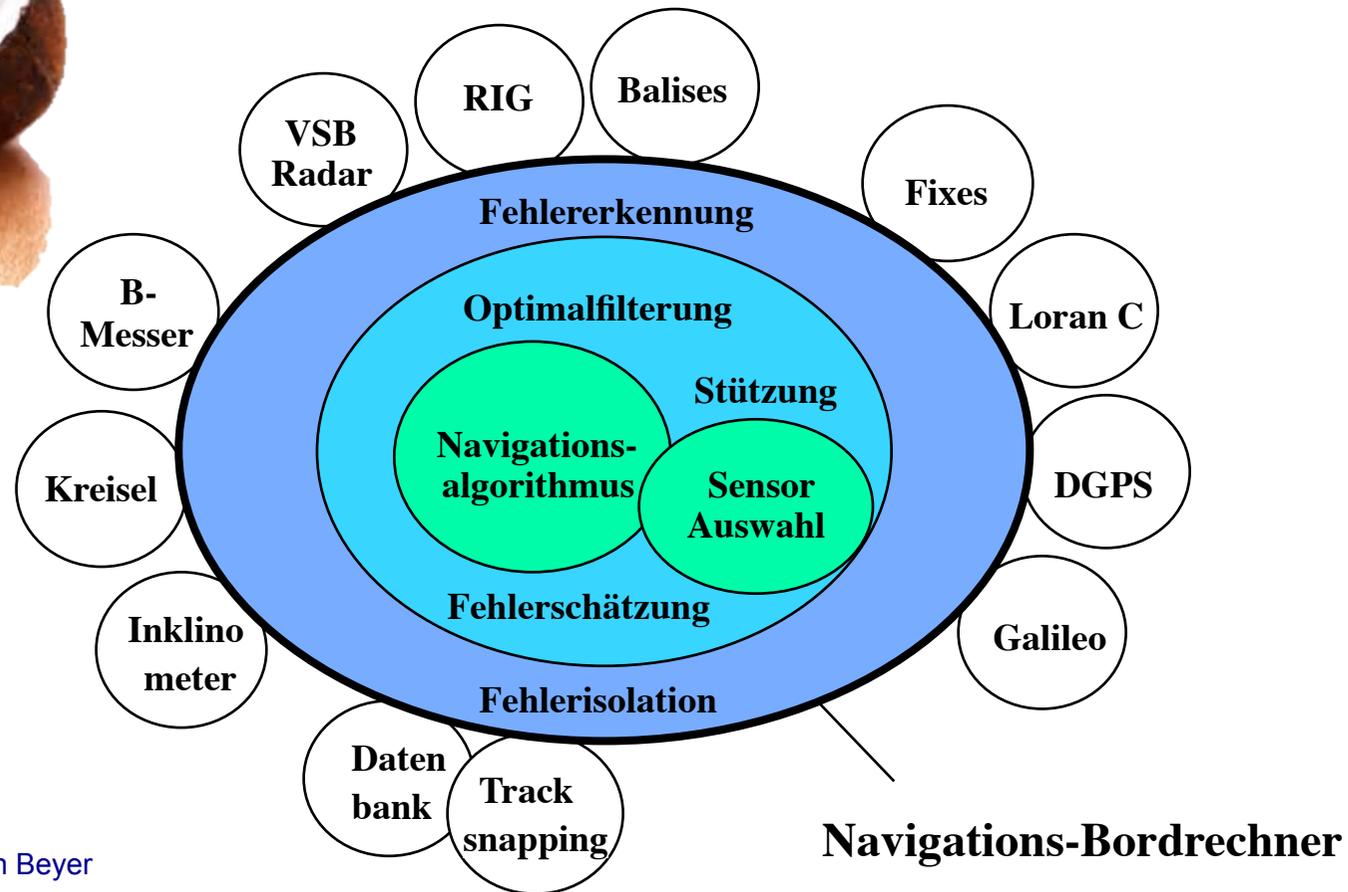
- **Benefit on the planning side**
 - Robust rail time-tables, which provide statistical information
 - Adequate estimated time of arrival (ETA) calculation
 - Short term reaction time and flexibility
 - Plans are 'in touch' with operation
- **Benefit on the rail operation side**
 - Stable and robust rail operation embedded in a control loop
 - Requested (Required) time of arrival (RTA) for guidance
 - Online time-table re-planning capability
 - Ad hoc crisis management
 - Maintenance 'en route'

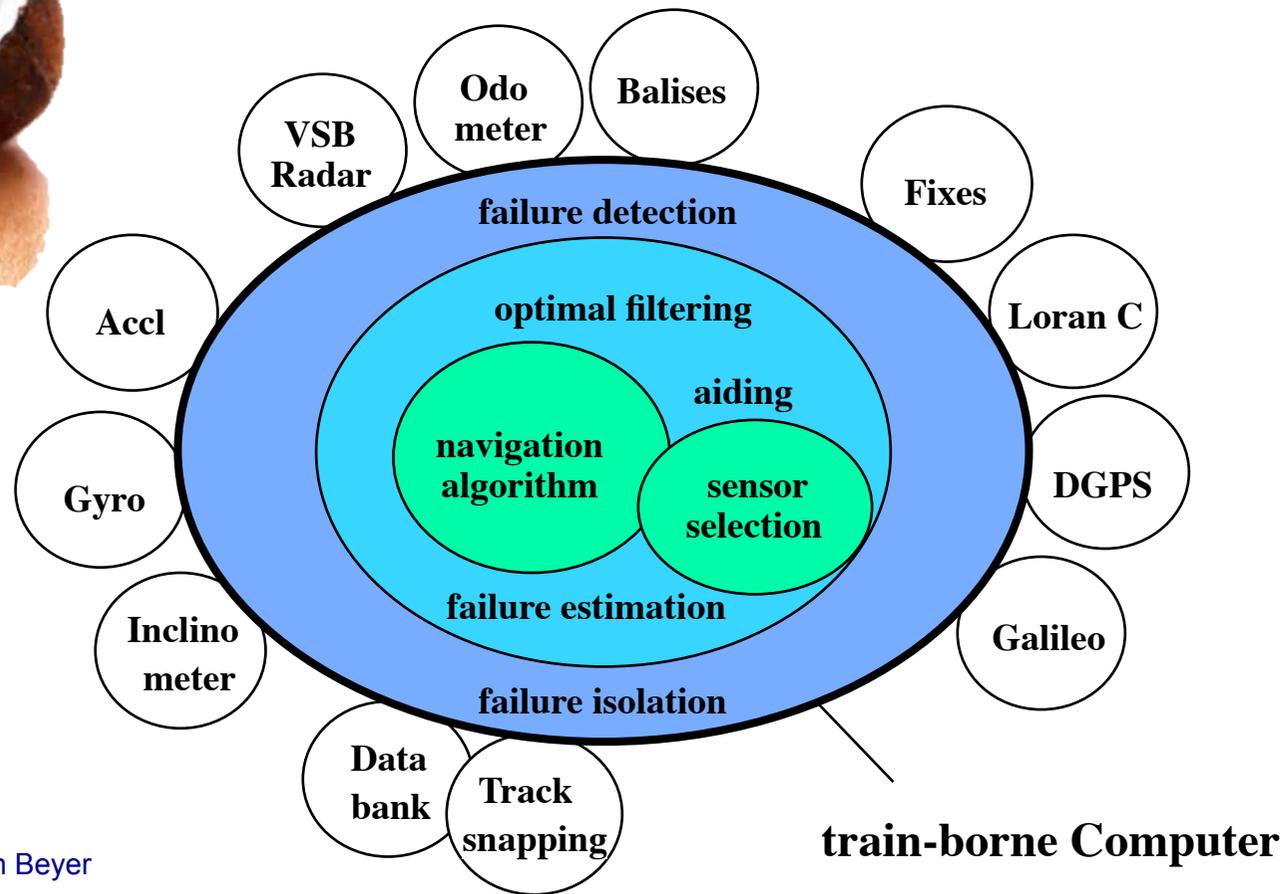
Surface Movement Guidance and Control

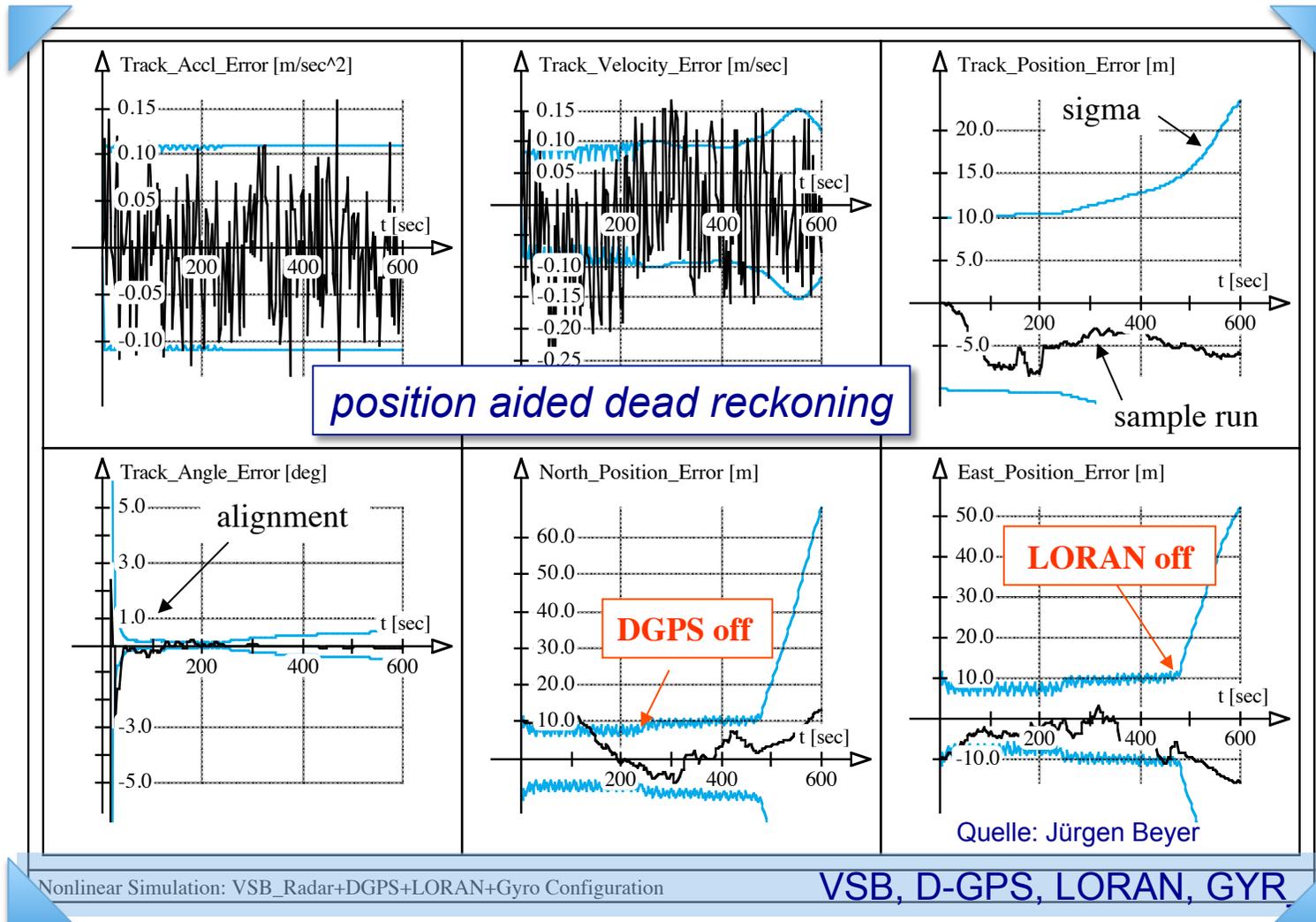


* advanced surface movement guidance & control system

Quelle: Jürgen Beyer



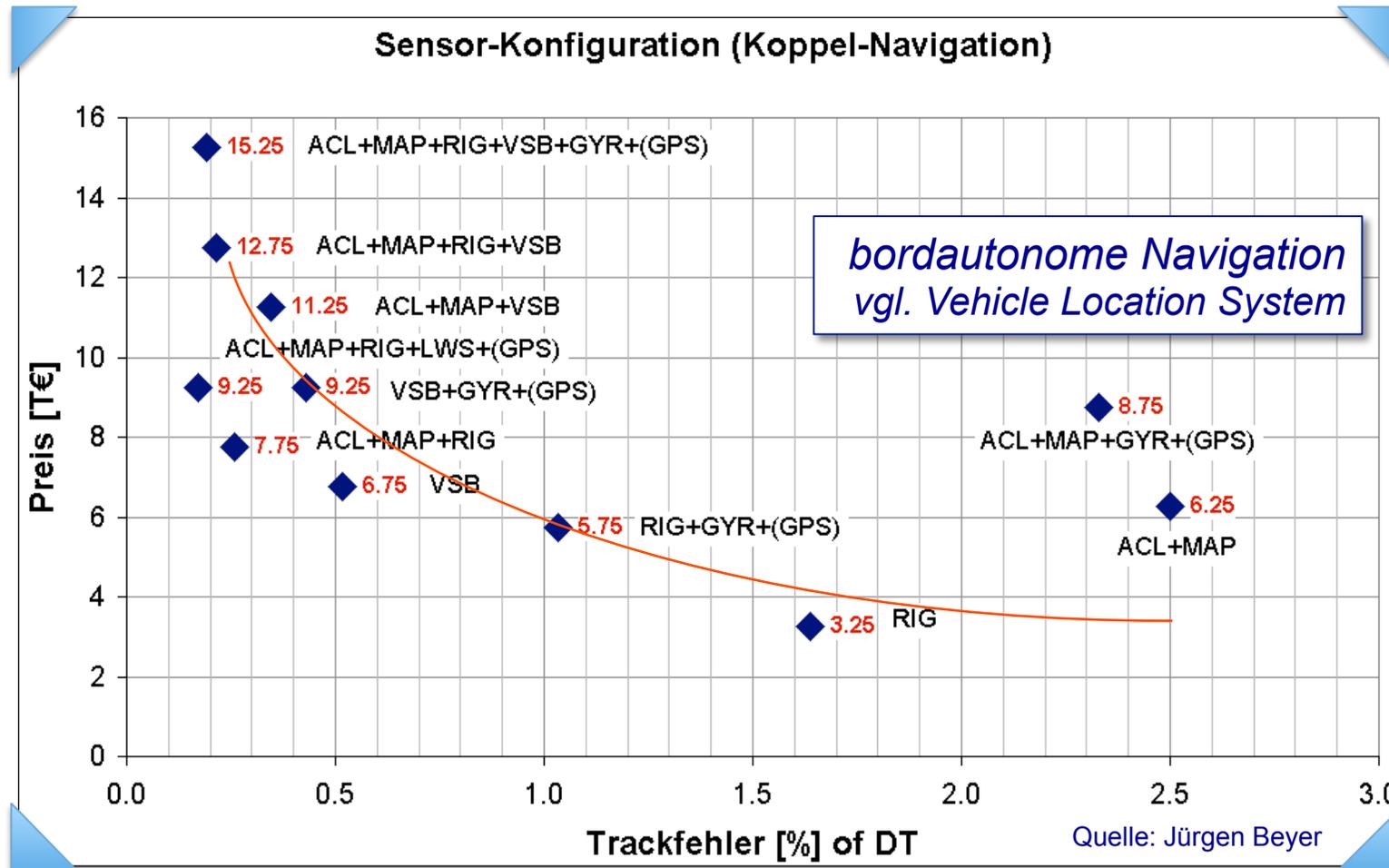


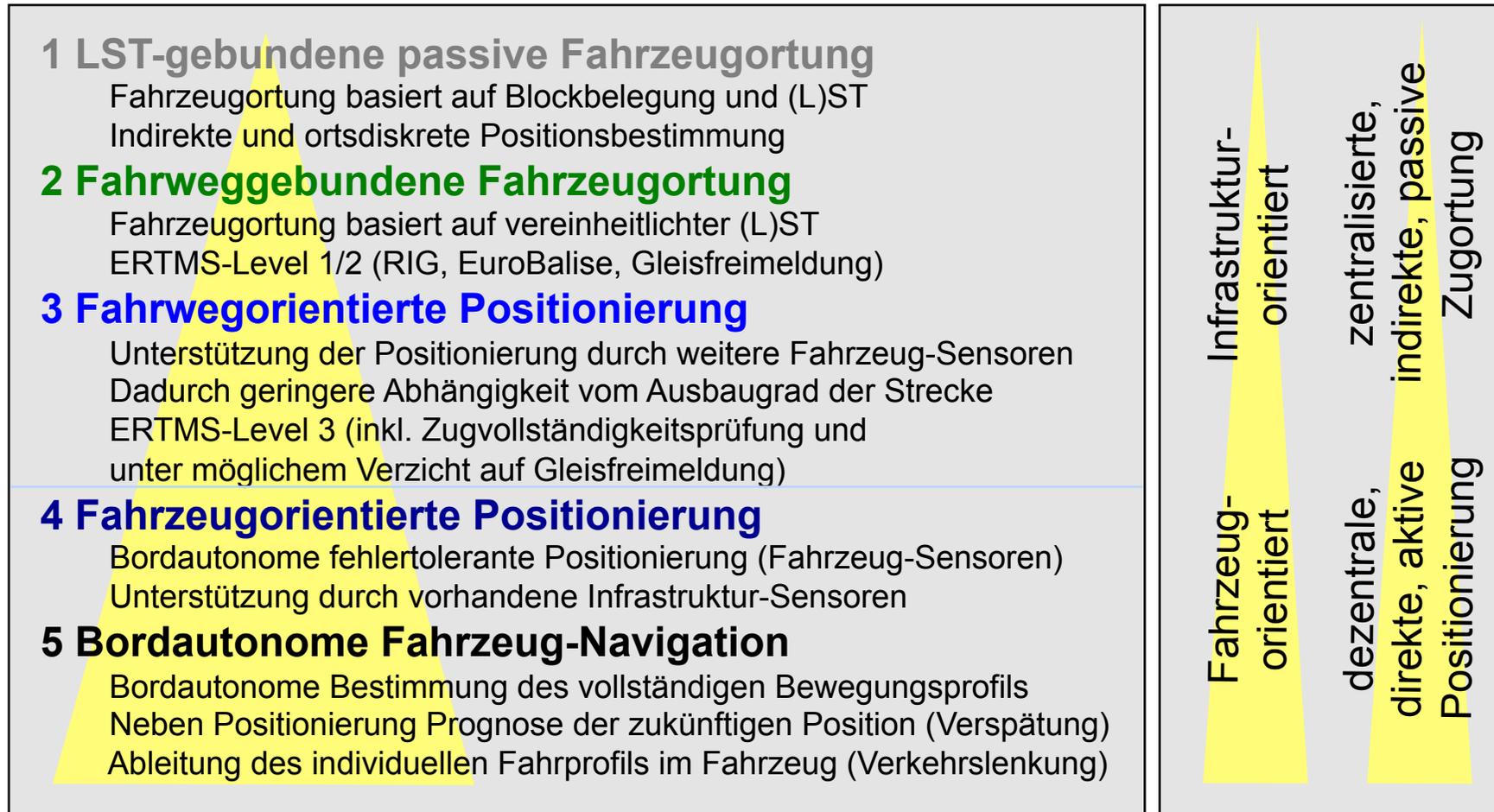


| $\Delta t = 4 \text{ sec}$; $DT = 11.6 \text{ km}$; GPS_Ausfall nach 360 sec Vel = 20 m/sec bis 540 sec; Vel = 2 m/sec bis 900 sec Lat = 50.13338 deg; Lon = 8.860758 deg Azi = 45.0 deg; Alt = 0.0 m | | Kroton Datei Test.Dat 24.03.08 | | |
|---|--|---|------|-------|
| ACL: SIG = 1.0 [mg] MAP: SIG = 1.0e-2 [deg] RIG: SIG = 1.0e-3 [m/sec]; eSKF = 1.0 [%] VSB: SIG = 1.0e-1 [m/sec]; eSKF = 0.5 [%] GYR: SIG = 0.1 [deg/ $\sqrt{\text{hr}}$]; RC = 1.0 [deg/hr] LWS: SIG = 0.1 [deg] GPS: SIG = 25 [m] | | T€ 2.50 Pitch 2.00 Acl-abhängig 1.50 5.00 2.00 1.00 0.50 | | |
| Index | Sensor-Konfiguration (Koppel-Navigation) | SIG [m] @ 900 [sec] | % DT | T€ |
| 1 | RIG | 190 | 1.6 | 3.25 |
| 2 | VSB | 60 | 0.5 | 6.75 |
| 3 | ACL + MAP | 290 | 2.5 | 6.25 |
| 4 | ACL + MAP + RIG | 30 | 0.3 | 7.75 |
| 5 | ACL + MAP + VSB | 40 | 0.3 | 11.25 |
| 6 | ACL + MAP + RIG + VSB | 25 | 0.2 | 12.75 |
| 7 | RIG + GYR + (GPS-Pos) | 120 | 1.0 | 5.75 |
| 8 | VSB + GYR + (GPS-Pos) | 50 | 0.4 | 9.25 |
| 9 | ACL + MAP + GYR + (GPS-Pos) | 270 | 2.3 | 8.75 |
| 10 | ACL + MAP + RIG + VSB + GYR + (GPS-Pos) | 22 | 0.2 | 15.25 |

Quelle: Jürgen Beyer

Fehlerabschätzung – Ein-dimensionales Bewegungsmodell





Quelle: Jürgen Beyer

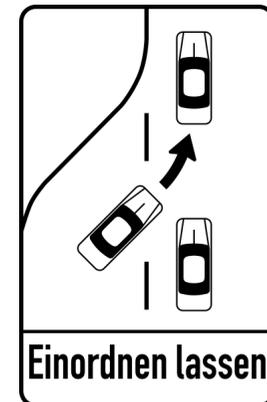
- Die **Zulaufsteuerung** basiert auf einer aufwandsoptimalen Bestimmung einer Fahrzeug-Beschleunigung unter frei wählbaren zusätzlichen Randbedingungen.
- Die Sollwertberechnung integriert dabei die vorgegebene Beschleunigung eines Fahrzeugs zur Geschwindigkeit und diese wiederum zur Position. Das Prozessmodell besteht somit im einfachsten Fall aus zwei Integratoren.
- Falls zur Bestimmung der Beschleunigung ein quadratisches Integralkriterium minimiert wird entspricht die optimale Steuerfunktion dabei einer Geraden.

Quelle: Jürgen Beyer

- Wird der robuste Fahrplan als Sollwert verstanden, so müssen in den Zügen die Abweichungen zwischen Istzustand und Sollwert bestimmt und ausgeglichen werden.
- Hierzu wird eine laufende Positionsbestimmung benötigt. Verwendet werden können Informationen aus den Streckenmarkierungen (z.B. Balisen), die mit den Signalen der Radimpulsgeber in den Zügen kombiniert werden.
- Liegen solche Positionsinformationen nicht vor, lassen sich auch andere Verfahren wie bspw. Satellitennavigationsverfahren (GPS, GALILEO) oder Langwellenortung (LORAN-C, EUROFIX usw.) einsetzen. Eine Unterstützung der Geschwindigkeitsmessung über VSB-Radar ist aus Redundanzgründen ebenfalls denkbar.
- Ein Bordrechner verarbeitet alle zur Verfügung stehenden Navigations-Informationen und speist sie in einen Regelalgorithmus, der durch Vergleich mit den Sollwerten die notwendigen Geschwindigkeitsänderungen des Zuges vornimmt. Die **Zuglaufregelung** hält den realen Zeit/Wegverlauf eines Zuges nahem am Fahrplan.
- Die Sollwerte liegen typischerweise als Fahrplan vor, oder sie werden über eine Telekommunikationseinrichtung (z.B. GSM-R) aus einer Leitstelle übertragen. Wichtige Zuginformationen werden umgekehrt an die Leitstelle zurückgesendet und können bspw. zur Dynamisierung des Fahrplans (Adaption) verwendet werden.

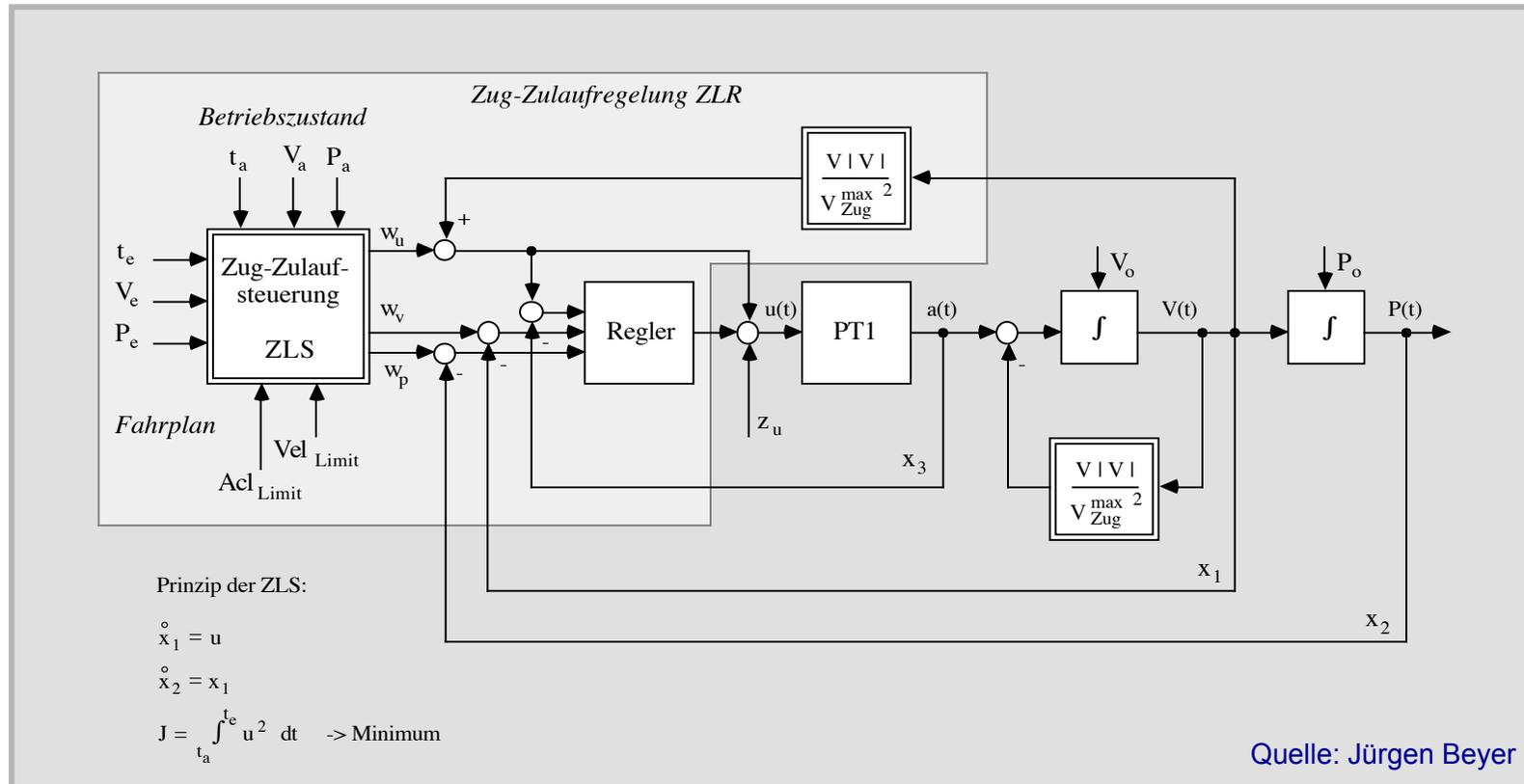
Quelle: Jürgen Beyer

- Bei der Untersuchung des Verspätungsverhaltens in Großknoten fällt auf, dass die Nutzung von Fahrzeitreserven im Fahrplan heute eher dazu führt, Ankunftsverteilungen auf Zulaufstrecken zu verschleifen, d.h. die Streuungen am Ende der Strecke nehmen zu statt ab. Zudem ist interessanterweise eine Tendenz zu Verfrühungen zu erkennen.
- Eine **Knotenzulaufregelung** sichert die geforderte Ankunftszeit eines ausgewählten Zuges (ETA estimated time of arrival), so dass dieser Zug ohne Behinderung und ohne zu behindern in den Knoten einfahren kann.
- Die Einführung der geforderten Ankunftszeit (RTA required time of arrival) kann als ein Mittel zur Verkehrslenkung im Betriebsprozess eingesetzt werden.
- Sie liefert auch einen Beitrag für ein effizientes Störfallmanagement, bspw. über eine Durchlaufsteuerung von Zügen in Knoten im „Reißverschluss Verfahren“.



Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Reißverschlussverfahren>

Neue Betriebsführungsmethode aus einer Knotensicht heraus



Anmerkung: Eine Zug-Zulaufregelung wird heute in der Disposition nicht verwendet
Zur Umsetzung fehlen wesentliche technische Voraussetzungen

Rendezvous Problem mit Endbedingung(en)

$$\begin{array}{lll} \dot{x}_1 = u & x_1(t_a) = x_{1a} & x_1(t_e) = x_{1e} \\ \dot{x}_2 = x_1 & x_2(t_a) = x_{2a} & x_2(t_e) = x_{2e} \end{array}$$

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_a}^{t_e} u^2(t) dt$$

Lösung des hamiltonschen kanonischen Systems

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1 \\ x_1 \\ -\lambda_2 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \lambda_1(t) \\ \lambda_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t_a) - c_1 t + \frac{1}{2} c_2 t^2 \\ x_2(t_a) + x_1(t_a) t - \frac{1}{2} c_1 t^2 + \frac{1}{6} c_2 t^3 \\ c_1 - c_2 t \\ c_2 \end{bmatrix}$$

$$u_{opt}(t) = -\frac{2}{\Delta t} \left[2x_1(t_a) + x_1(t_e) + \frac{3}{\Delta t} (x_2(t_a) - x_2(t_e)) \right] + \frac{6}{\Delta t^2} \left[x_1(t_a) + x_1(t_e) + \frac{2}{\Delta t} (x_2(t_a) - x_2(t_e)) \right] t$$

Fahrzeugmodell mit Windwiderstand und PT1-Verhalten der Beschleunigung

$$\dot{x}_1 = x_3 - \frac{x_1 |x_1|}{V_{\max}^2}$$

$$x_1(t_0) = V_0$$

$$\dot{x}_2 = x_1$$

$$x_2(t_0) = P_0$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{T} x_3 + \frac{1}{T} u_1$$

$$x_3(t_0) = \frac{V_0 |V_0|}{V_{\max}^2}$$

„Grundbeschleunigung“ für V_0

Zulaufsteuerung plus Zustandsregler mit „Störgrößenaufschaltung“

$$u_1 = u_1^w + \frac{x_1 |x_1|}{V_{\max}^2} + K_1 (x_1^w - x_1) + K_2 (x_2^w - x_2) + K_3 \left(u_1^w + \frac{x_1 |x_1|}{V_{\max}^2} - x_3 \right) + K_4 \int_{t_a}^{t_e} (x_2^w - x_2) dt$$

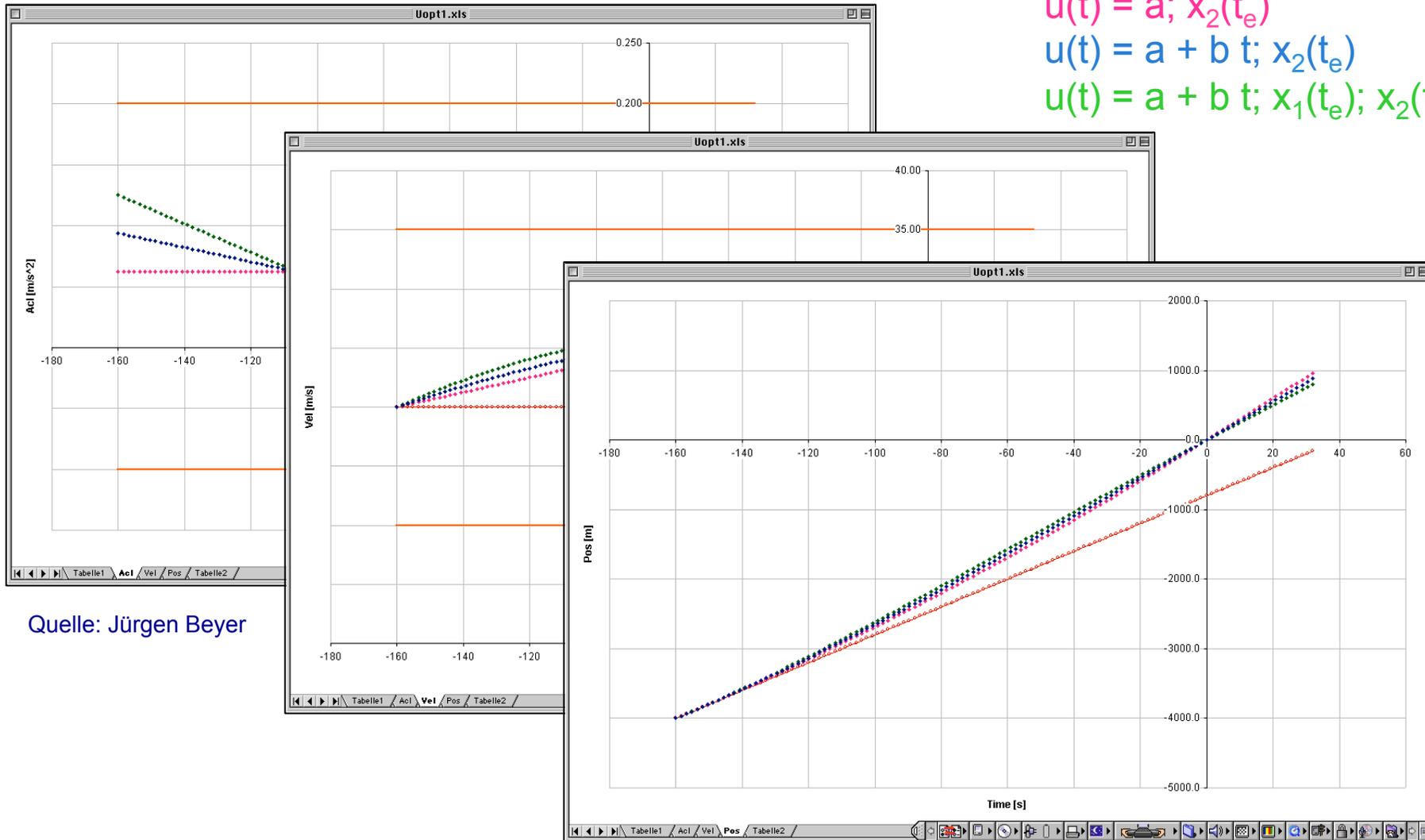
Quelle: Jürgen Beyer

Optimale Zulaufsteuerung

$$u(t) = a; x_2(t_e)$$

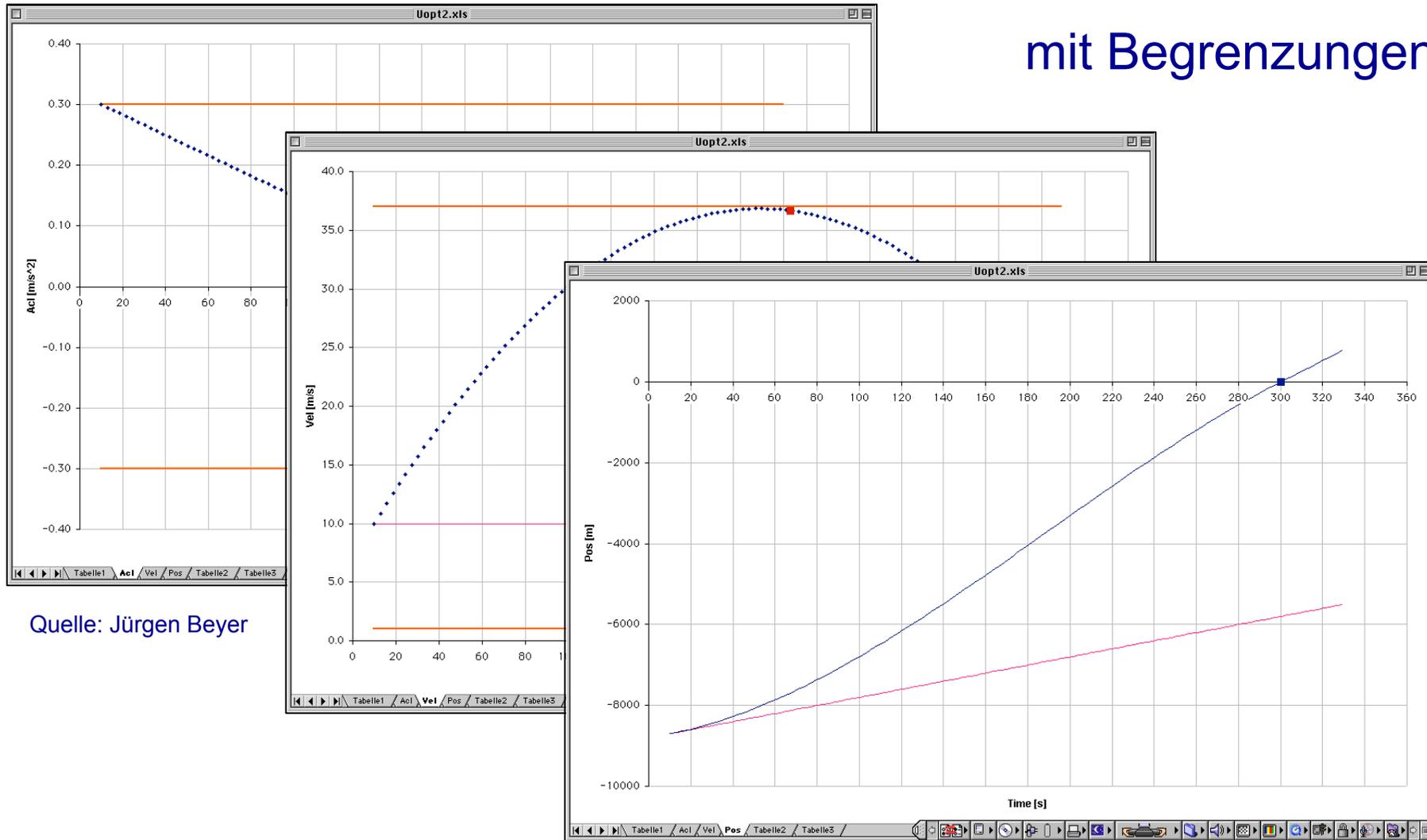
$$u(t) = a + b t; x_2(t_e)$$

$$u(t) = a + b t; x_1(t_e); x_2(t_e)$$

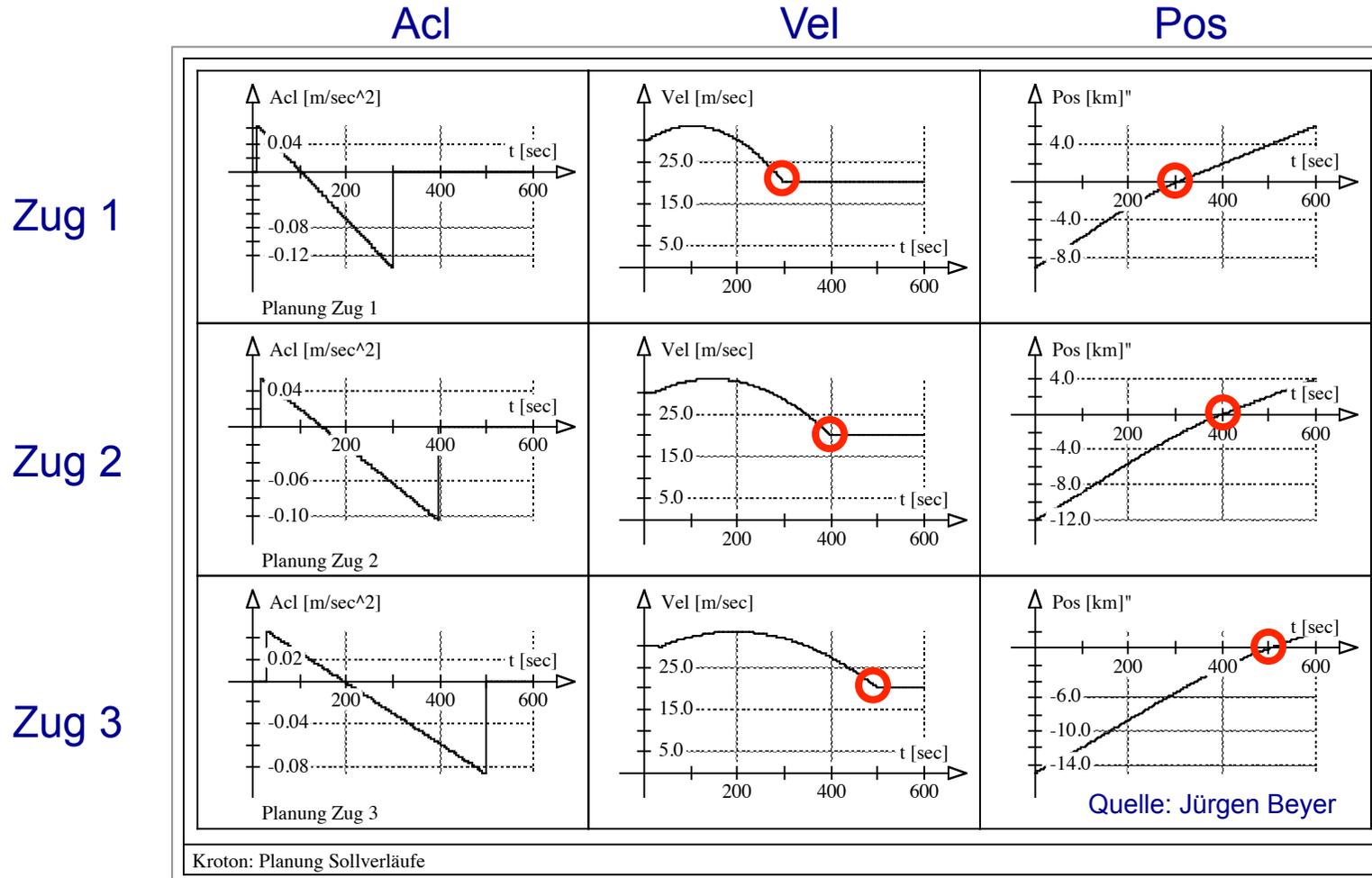


Quelle: Jürgen Beyer

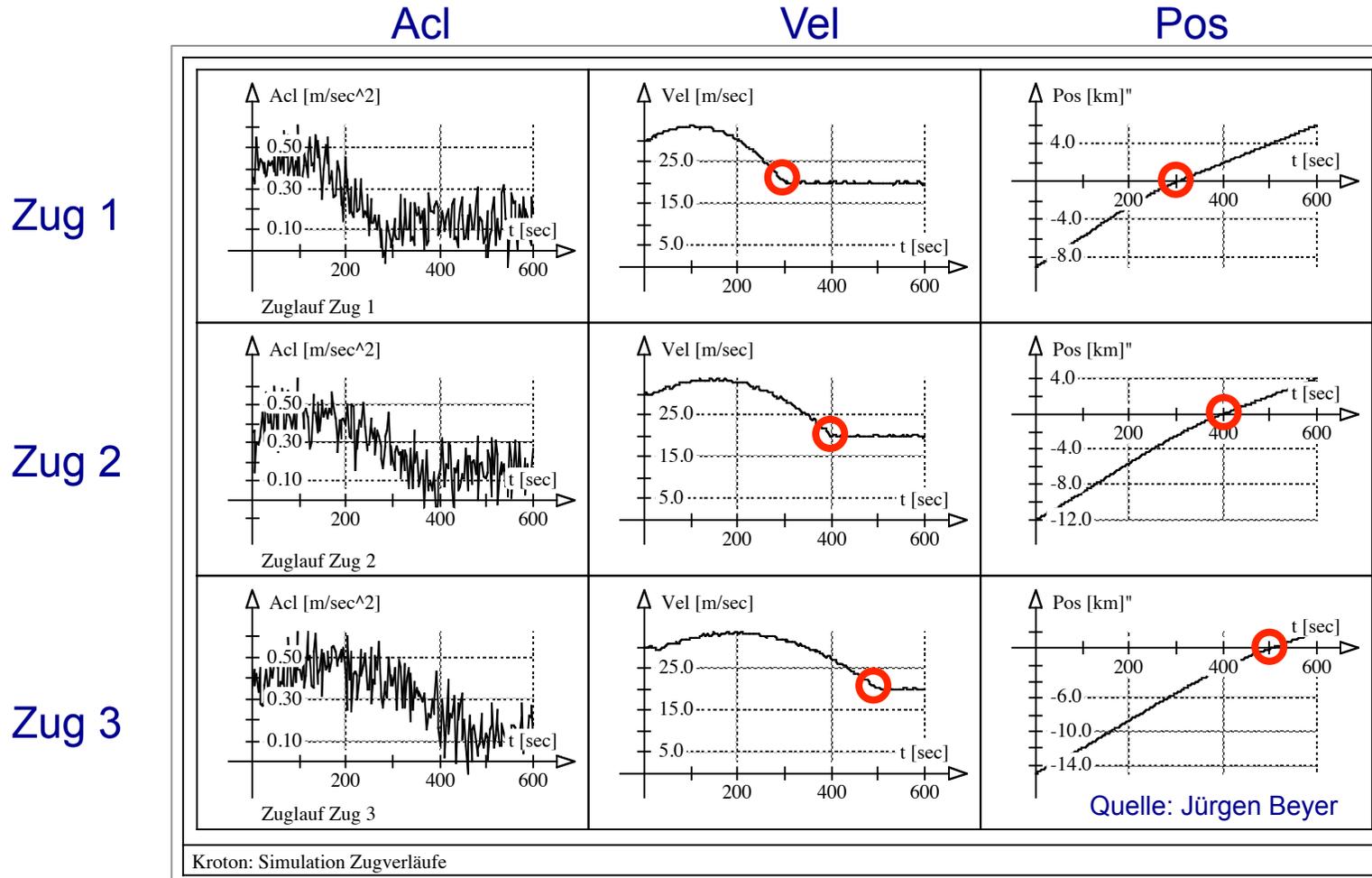
mit Begrenzungen



Quelle: Jürgen Beyer



Zeitlicher Verlauf der Sollwerte für die Fahrzeuglenkung dreier Züge



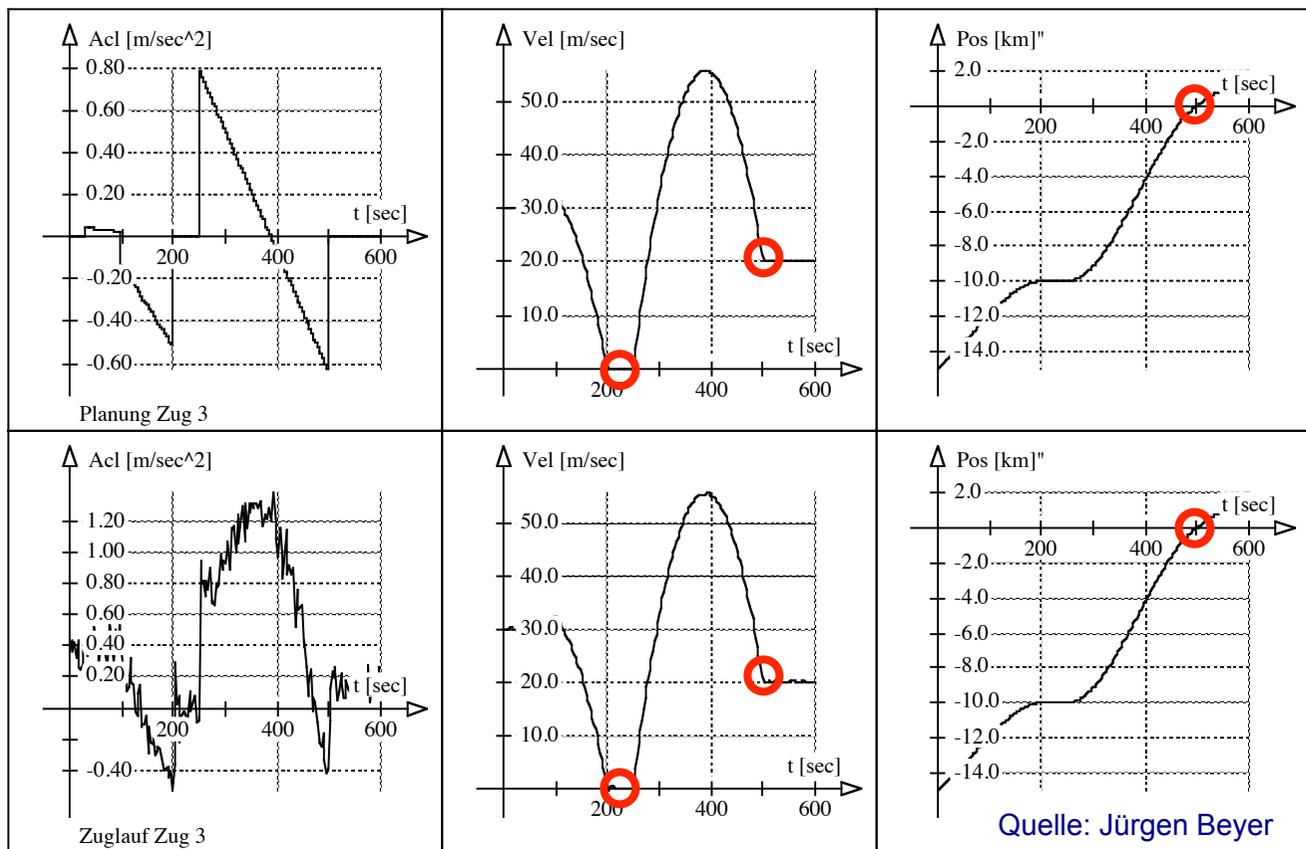
Zeitlicher Verlauf der realen Zustände bei der Fahrzeuglenkung dreier Züge

Acl

Vel

Pos

Soll
Zug 3



Kroton: Simulation Zugverläufe

Sollwerte und realer Verlauf bei spezieller Beeinflussung von Zug 3

- Bei ungestörtem Betrieb & konfliktfreiem Fahrplan erfolgt kein Eingriff
 - Alle Zugfahrten verlaufen entsprechend ihrem Fahrplan
- Normale Störungen führen zu Abweichungen des Betriebsablaufs
 - Zuglaufregelung versucht unter Ausnutzung der Fahrzeitreserven den Fahrtverlauf kurzfristig auf den vorhandenen Fahrplan zurückzuführen
 - Ausgleich von Störungen innerhalb der Variationsbreite des Fahrplans
 - Minderung der Auswirkungen von Ur- und Folgeverspätungen durch unmittelbare Ausregelung von Fahrplanabweichungen
 - Reduktion des Auftretens von Folgeverspätungen, da Ist-Fahrtverlauf nun enger dem Sollverlauf folgt und weniger Folgekonflikte auftreten
- Bei mittleren Abweichungen liefert Zuglaufsteuerung neue lokale Sollwerte
 - Lokale Sollwerte dienen als neue Zielfunktion der Zuglaufregelung
- Große Fahrplanabweichungen (bspw. bei Infrastruktur-Baumaßnahmen, Fahrzeugschäden) können nicht mehr ausgeglichen werden
 - Neuberechnung des Sollfahrplans (Re-Scheduling) wird erforderlich

Quelle: Jürgen Beyer
+ Ekkehard Wendler

Geht man von der konservativen Zahl von
25.000 Zügen pro Tag im Netz der DB AG
aus und bewertet (ebenfalls konservativ) die
Kosten einer **Verspätungsminute mit 50 EUR**,
so würde eine Zuglaufregelung,
die bei nur **10% der Züge**
eine Verminderung der Verspätung von
nur **1 Minute** erzielt,
einen Effekt von
125.000 EUR pro Tag
erzielen.

