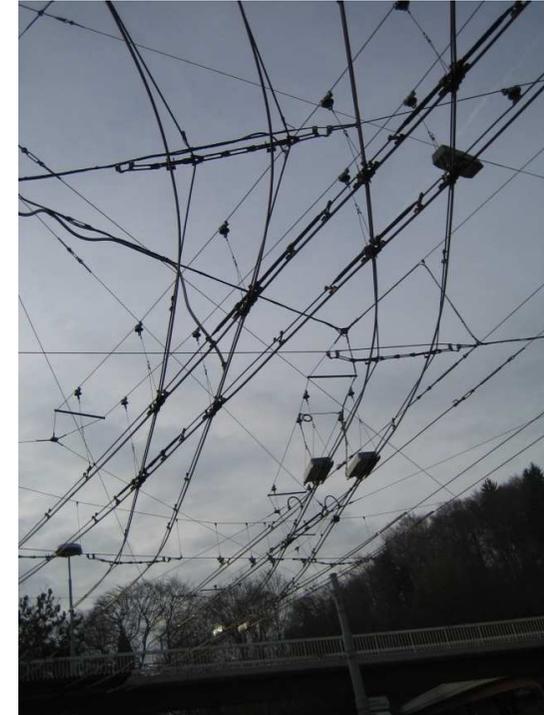


OpenPowerNet

Simulation von Bahnstromsystemen



Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

Institut für Bahntechnik GmbH

Warum Simulation von Bahnstromsystemen?

Die **Lastflüsse** und der **Energiebedarf** im Stromversorgungsnetz werden von den fahrenden Zügen und von der Gestaltung der Bahnstromversorgung bestimmt.

- Es gibt zeitlich und örtlich veränderliche Verbraucher.
- Netzstruktur und Spannung bestimmen den Lastfluss.
- Das Bahnstromsystem kann den Energiebedarf beeinflussen.

Mit der **Simulation** werden Analysen und Prognosen ermöglicht.

- zum Leistungs- und Energiebedarf
- für die technische Gestaltung und Dimensionierung der Anlagen

Anforderungen

Die **Spannungssituation** im Bahnenergieversorgungsnetz bestimmt die Lastflüsse und kann auf die Antriebe der Triebfahrzeuge zurückwirken:

- mit abnehmender Spannung steigen die Ströme und Verluste,
- bei geringer Spannung greifen Strom- bzw. Leistungsbegrenzungen der Antriebsregelung ein \Rightarrow Auswirkung auf die Fahrdynamik,
- die Netzspannung beeinflusst maßgeblich die Bremsenergie-rückspeisung (Energieaufnahmefähigkeit des Netzes).

Diese **Rückwirkungen** sind bei der Simulation zu erfassen.

- für AC-Netze weniger relevant durch meist stabile Spannung
- bei DC-Netzen mit starker Lastdynamik unumgänglich

Ausgangslage

Die **Simulation von Bahnstromsystemen** erfordert zeitgleich detaillierte Informationen zu folgenden physikalischen Prozessen:

- Fahrzustände aller Züge mit angeforderter Leistung,
- Positionen aller Züge im Streckennetz,
- Struktur, Schaltung und Leistungsfähigkeit des Bahnstromnetzes.

Aus diesem Grund wurden bisher **Kompromisse** eingegangen

- entweder zur Komplexität der Eisenbahnbetriebssimulation,
- oder hinsichtlich der Modellierungstiefe des elektrischen Netzes und der Fahrzeugantriebstechnik.

Anforderungen an die Simulation

Bahnbetrieb

- Linienführung/Trassierung
- Gleisplan
- Signalsystem
- Zugdaten
- Antriebsdaten
- Fahrplan
- Abschlussbeziehungen
- Bahnbetriebsregeln

Lastfluss und Energie

- Linienführung/Trassierung
- Gleisplan
- Signalsystem
- Zugdaten
- Antriebsdaten
- Fahrplan
- Anschlussbeziehungen
- Bahnbetriebsregeln
- Einspeisung / Unterwerke
- Speiseleitungen / Kabel
- Fahrleitung / Rückleitung

Trennung der Simulationsaufgaben

Bahnbetrieb

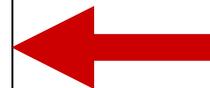
- Linienführung/Trassierung
- Gleisplan
- Signalsystem
- Zugdaten

OPEN TRACK

- Fahrplan
- Anschlussbeziehungen
- Bahnbetriebsregeln



Plug-in

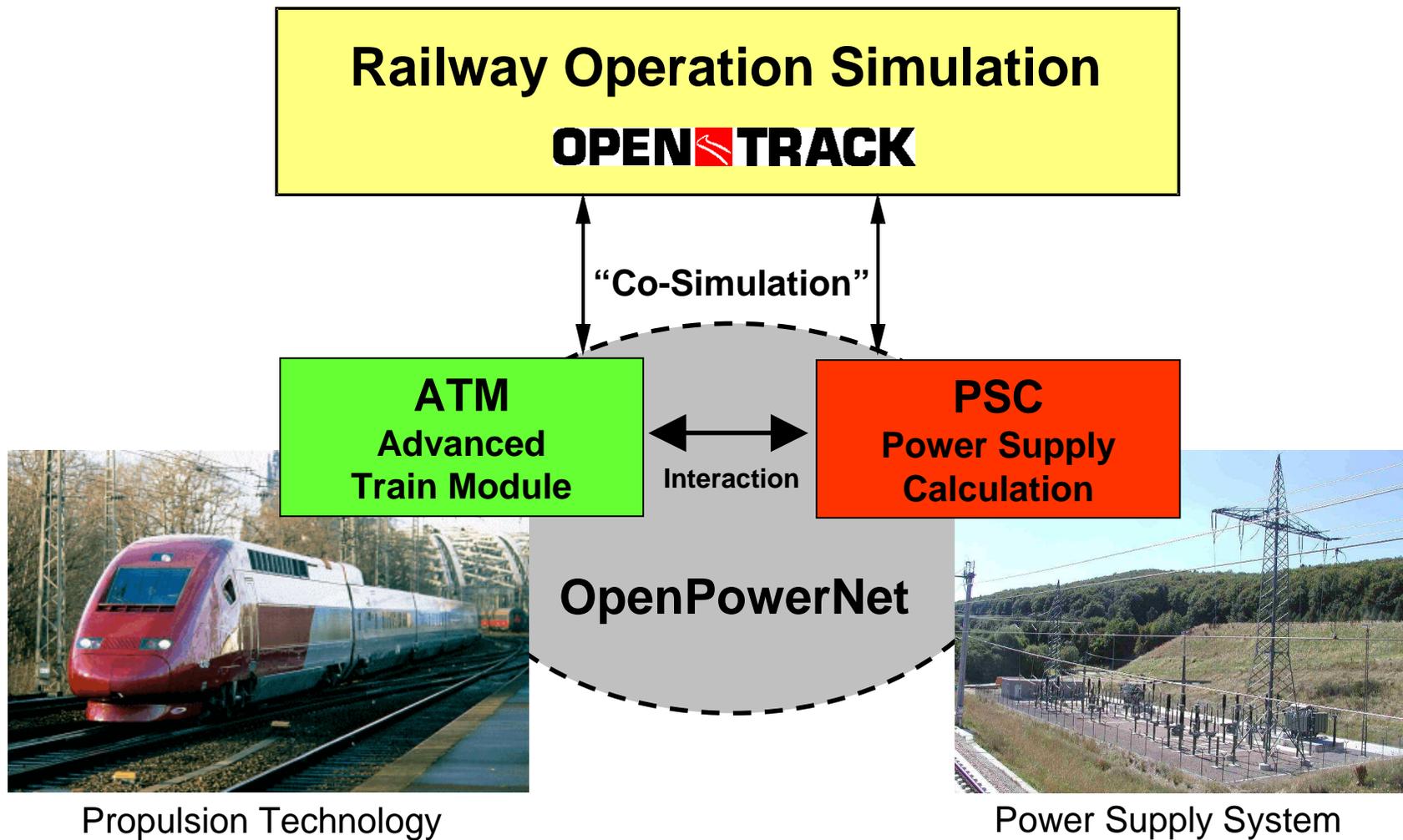


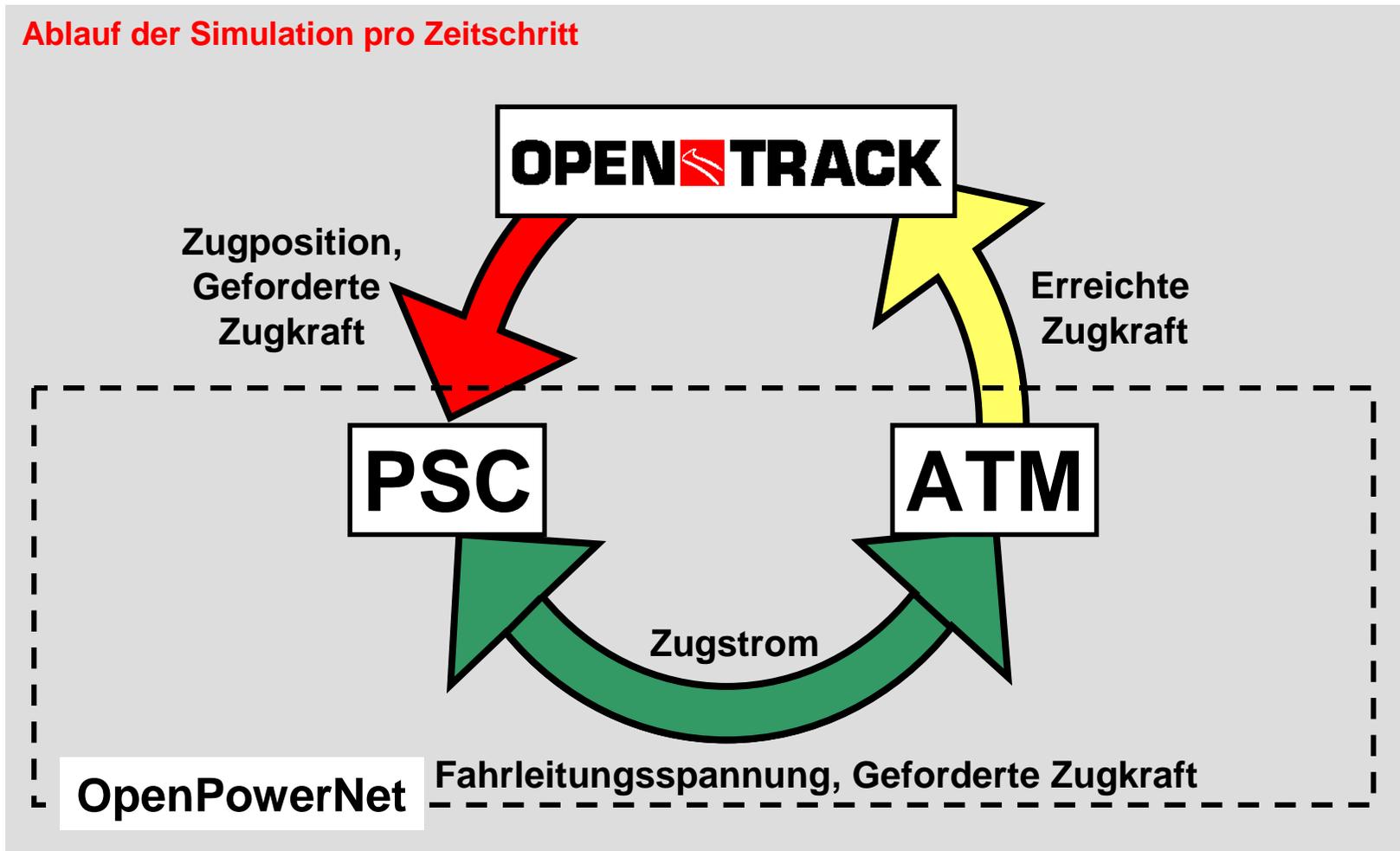
Lastfluss und Energie

OpenPowerNet

- Antriebsdaten

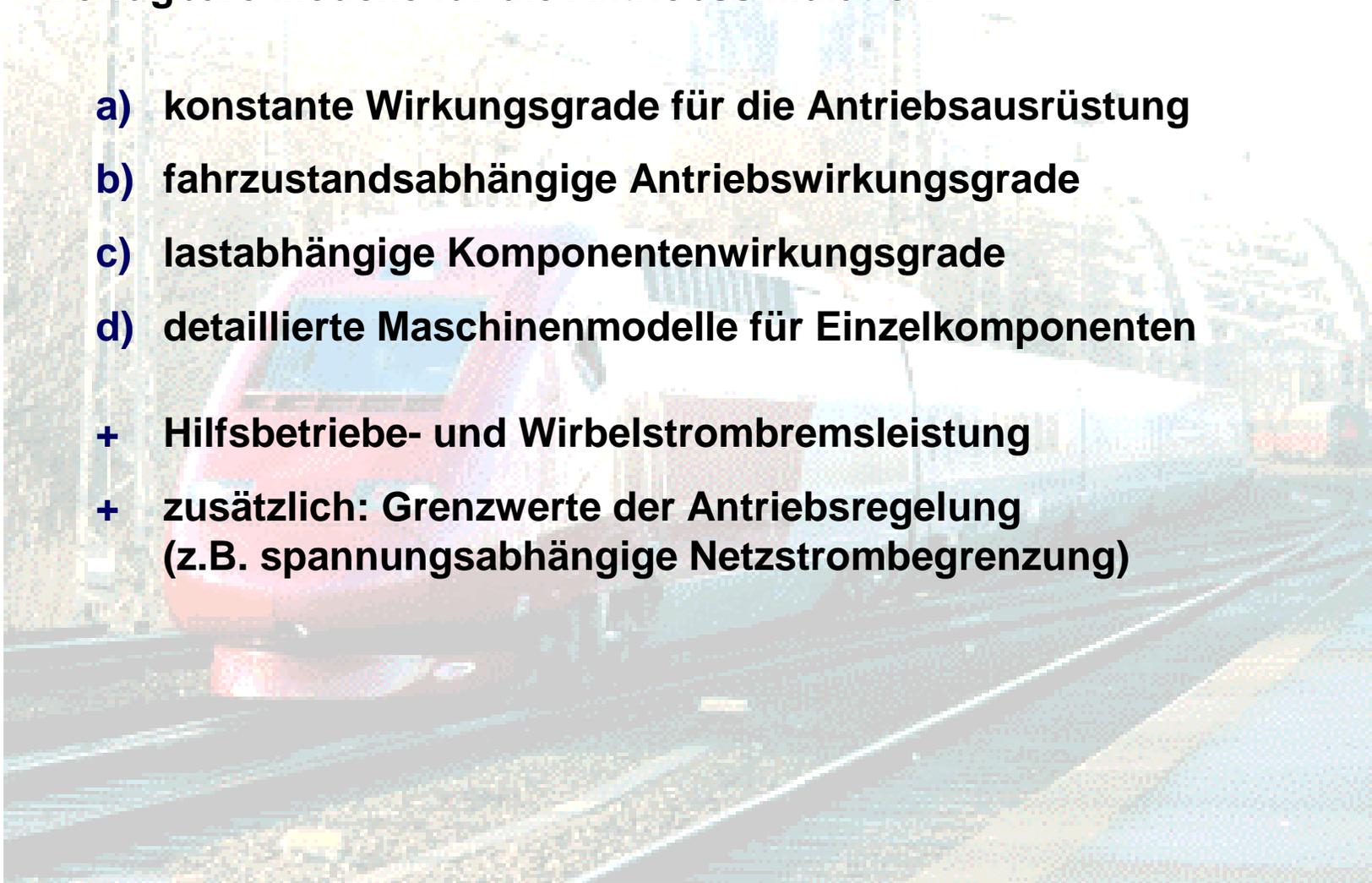
- Einspeisung / Unterwerke
- Speiseleitungen / Kabel
- Fahrleitung / Rückleitung



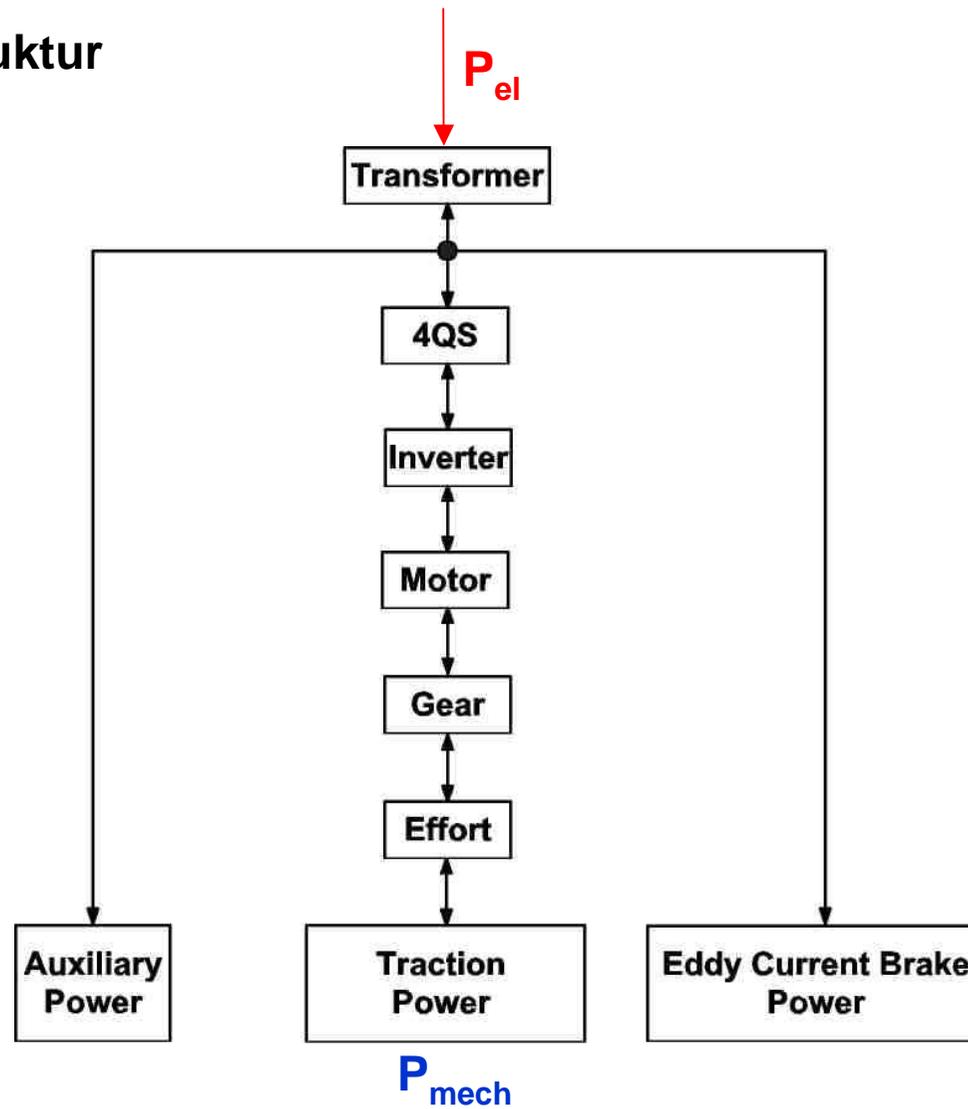


Verfügbare Modelle für die Antriebssimulation

- a) konstante Wirkungsgrade für die Antriebsausrüstung
 - b) fahrzustandsabhängige Antriebswirkungsgrade
 - c) lastabhängige Komponentenwirkungsgrade
 - d) detaillierte Maschinenmodelle für Einzelkomponenten
- + Hilfsbetriebe- und Wirbelstrombremsleistung
 - + zusätzlich: Grenzwerte der Antriebsregelung
(z.B. spannungsabhängige Netzstrombegrenzung)

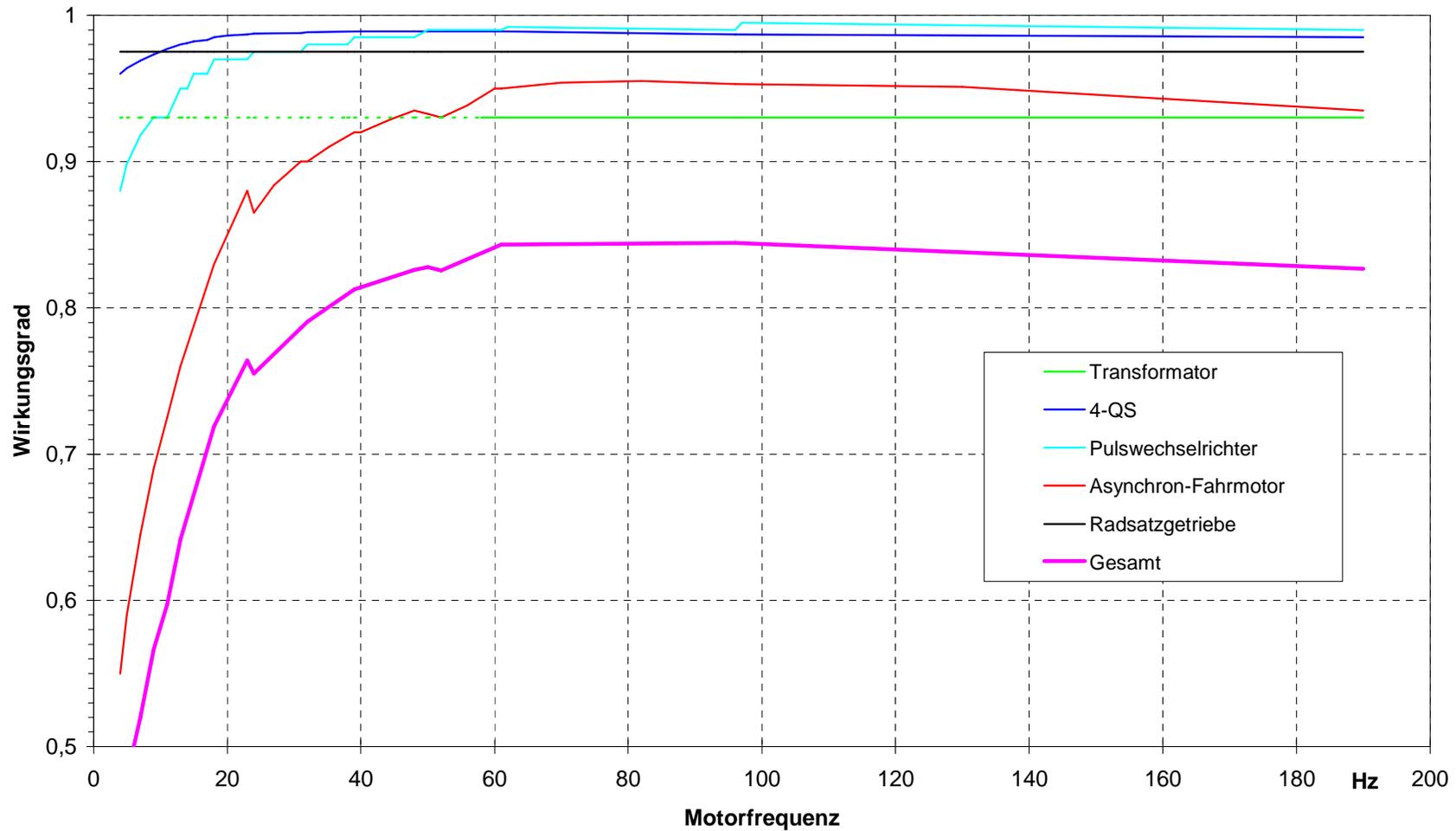


Antriebsstruktur

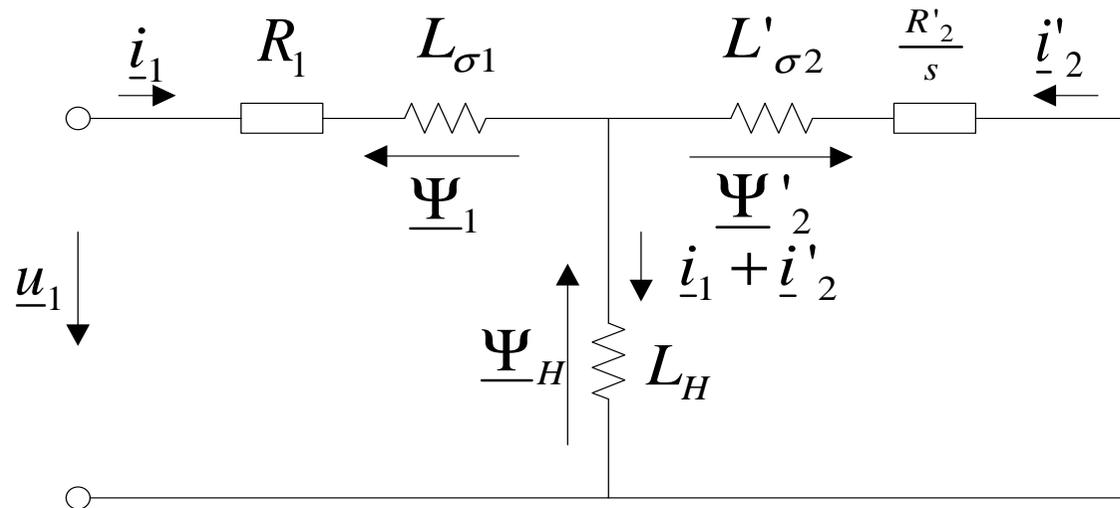


Wirkungsgradkennlinien (Beispiel: ICE3)

1 AC 15 kV 16,7 Hz



Modellierung von Antriebskomponenten (Beispiel: Asynchron-Fahrmotor)

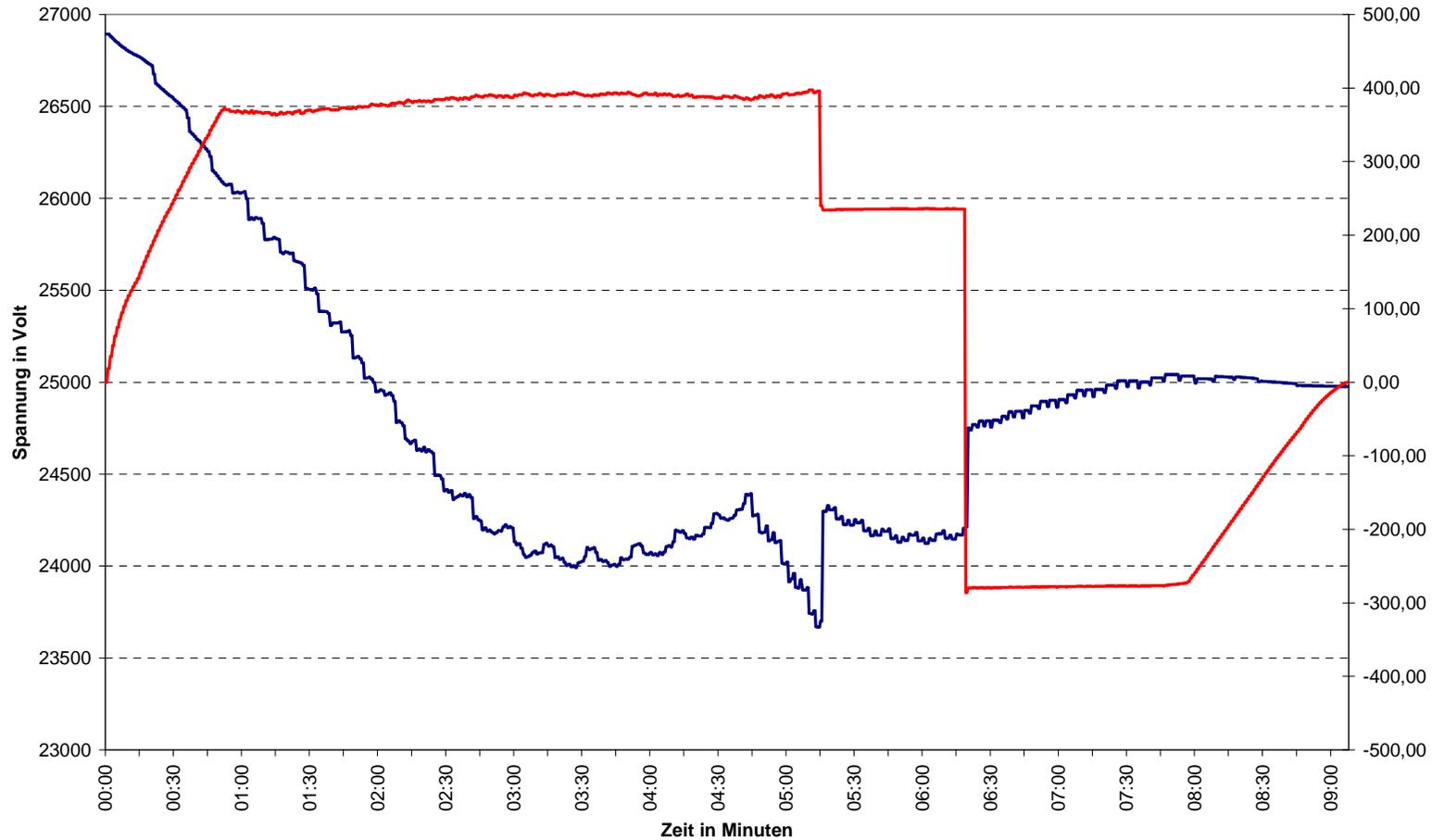


$$M_{\text{elekt}} = M_{\text{mech}} + M_{\text{Läuferverluste}}$$

$$M_{\text{Läuferverluste}} = \frac{P_{\text{Rotorverluste}}}{2\pi n} = \frac{\frac{3}{2} \underline{i}'_2{}^2 \cdot R'_2}{2\pi n}$$

Verifizierung des Antriebsmodells

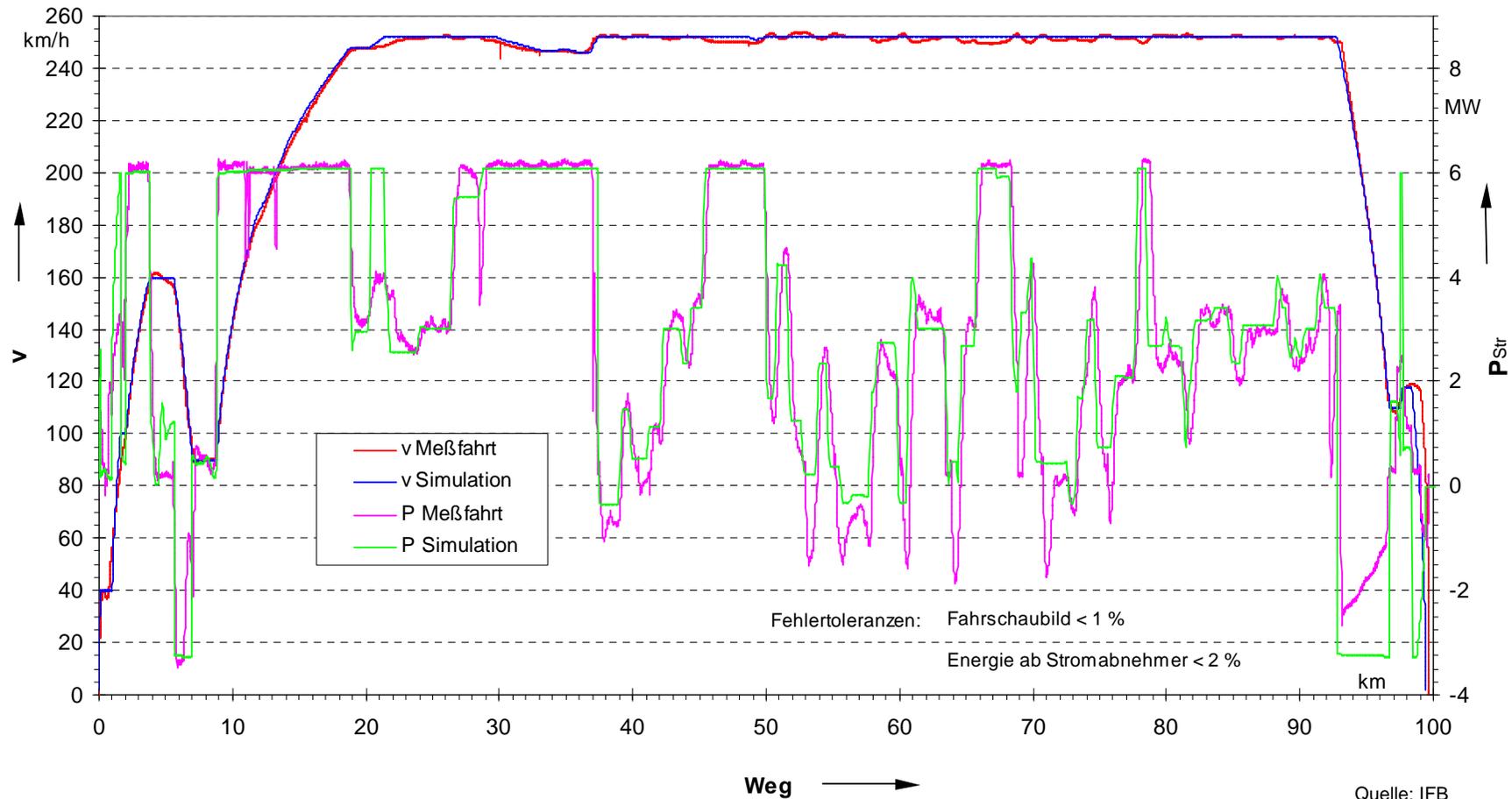
Strom and Spannung am Stromabnehmer



Geschwindigkeit und Leistungsverlauf

Messung und Simulation

ICE1 Hannover – Göttingen

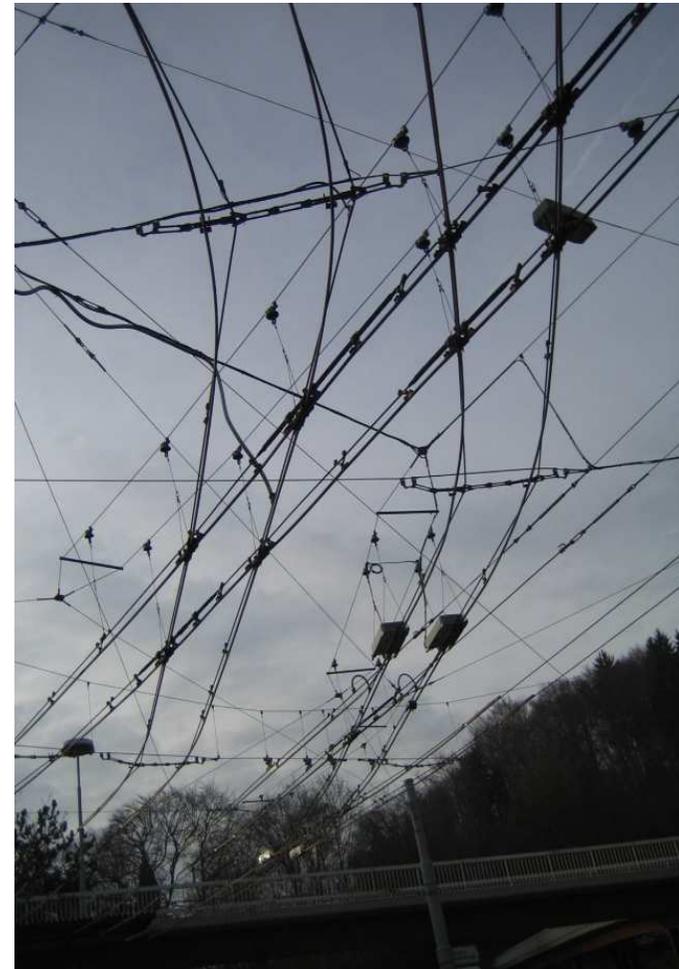


Anforderungen an das elektrische Netzmodell

- Simulation aller gängigen AC- und DC-Bahnstromsysteme
- Abbildung der kompletten elektrischen Netzinfrastruktur
- uneingeschränkte Wahl der Leiteranordnung entlang der Strecke
- Berücksichtigung der elektromagnetischen Verkopplungen zwischen den einzelnen Leitern bei AC-Bahnstromsystemen
- Schaltzustandsänderungen im Bahnstromnetz während der Simulation
- Rückwirkung auf die Fahrdynamik in der Bahnbetriebssimulation (OpenTrack)
- iterative Kommunikation mit der Antriebssimulation (ATM)
- konfigurierbare Datenausgabe
- Schnittstellen für Nachbearbeitung und Visualisierung

Modellierung der Infrastruktur

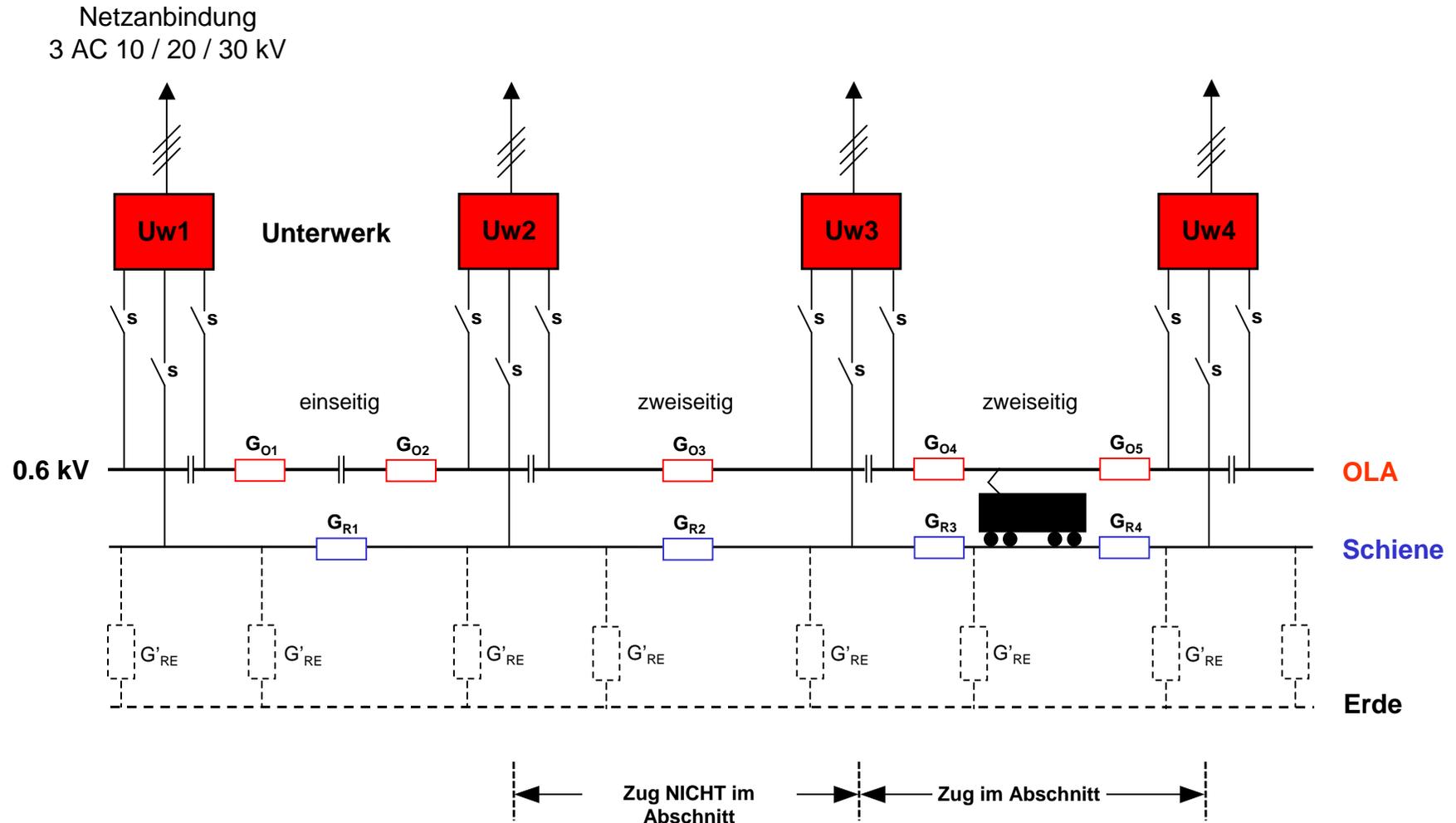
Fahrleitungsanordnung und -schaltung



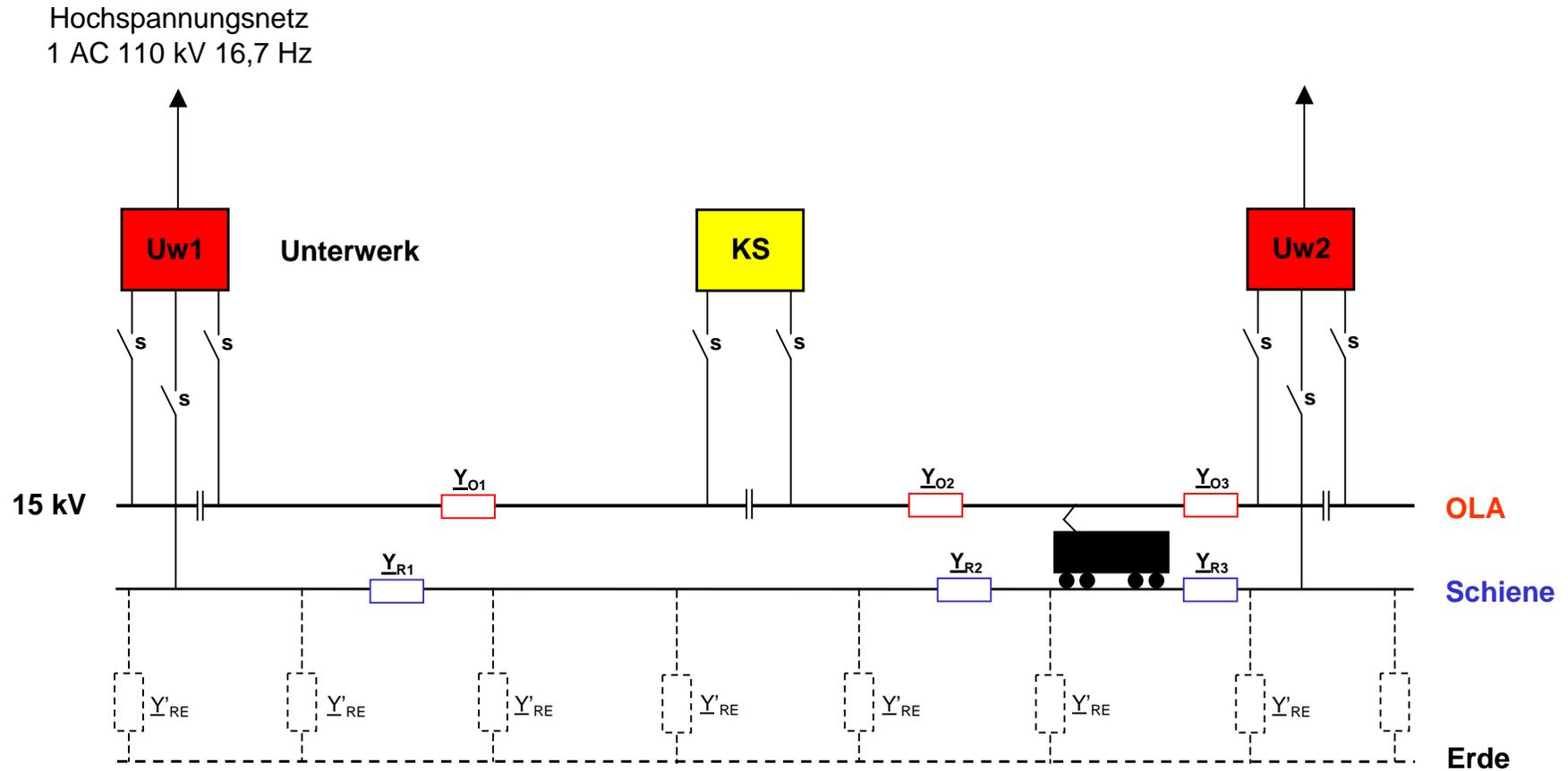
Modellierung Bahnenergieversorgung / Fahrleitungsnetz

- **Abbildung der elektrischen Netzstruktur (Sektoren, Speisepunkte, Schaltung) in Kongruenz zur Gleisnetztopologie**
- **Elektrische Eigenschaften des speisenden Netzes**
- **Elektrische Eigenschaften der Unterwerke**
- **Elektrische Eigenschaften der Leiter (Kabel, Fahrleitung, Gleise)**
- **Elektrische Eigenschaften Gleis – Erde**
- **Modellierung von Zusatzverbrauchern (z.B. Weichenheizungen)**
- **Belastbarkeit (Leiter und Unterwerke)**
- **Schutzeinstellungen**

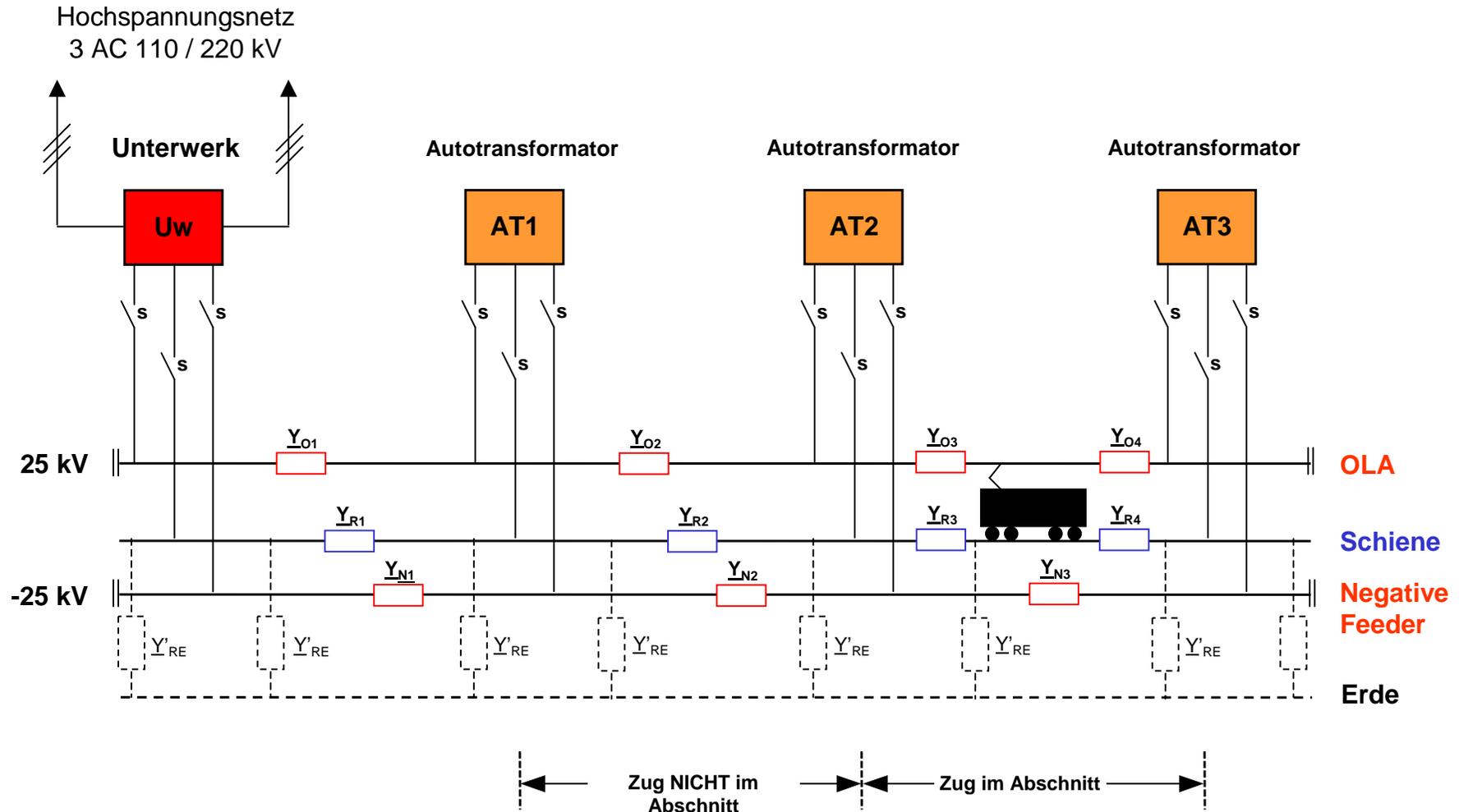
Aufbau der Bahnenergieversorgung (DC 0,6 ... 3,0 kV)



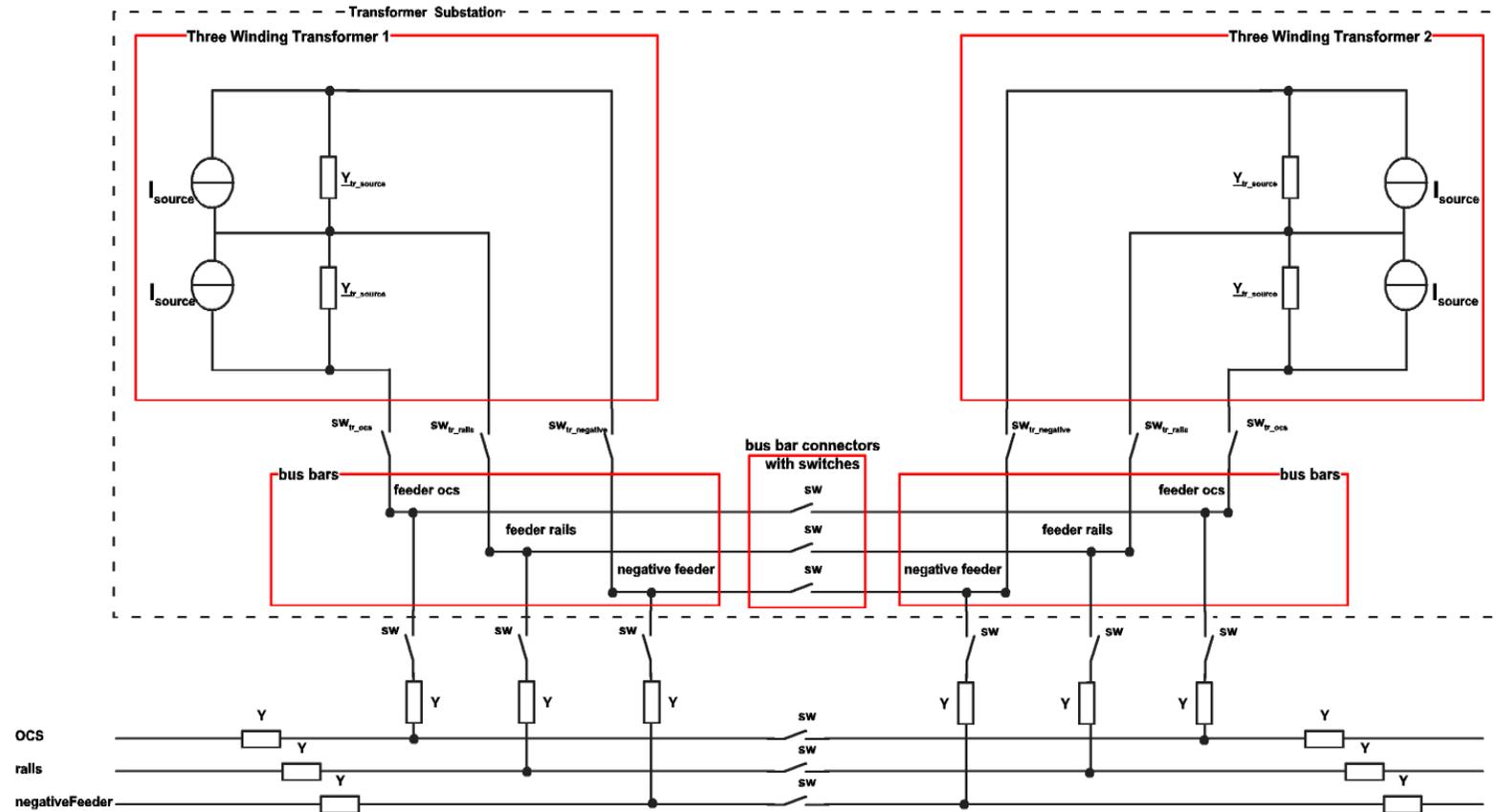
Aufbau der Bahnenergieversorgung (1 AC 15 kV 16,7 Hz)



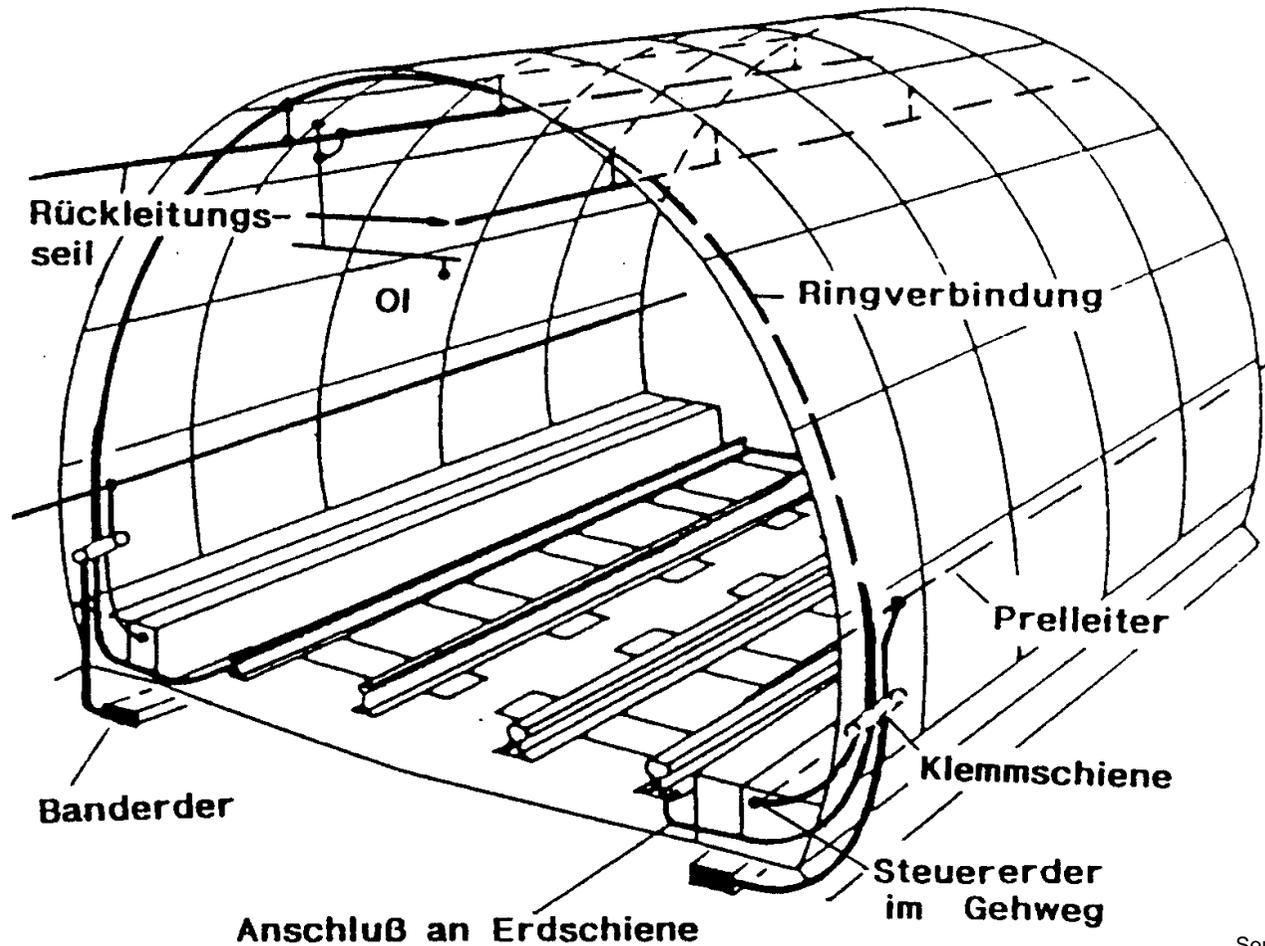
Aufbau der Bahnenergieversorgung (2 AC 25 kV ~ 50 / 60 Hz)



Aufbau des Unterwerkes (2 AC 25 kV ~ 50/60 Hz)

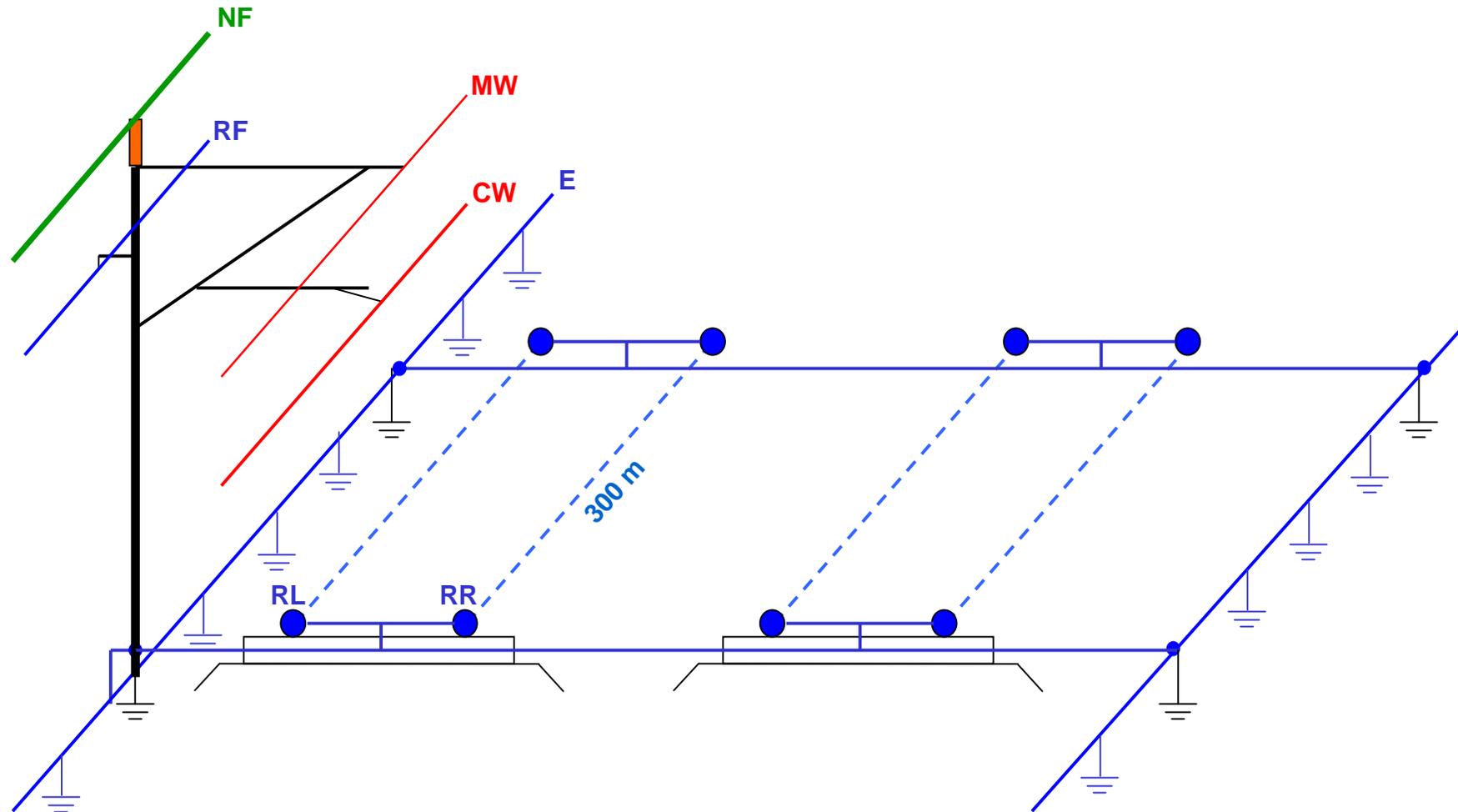


Streckenseitige Leiteranordnung (z.B. Tunnel)

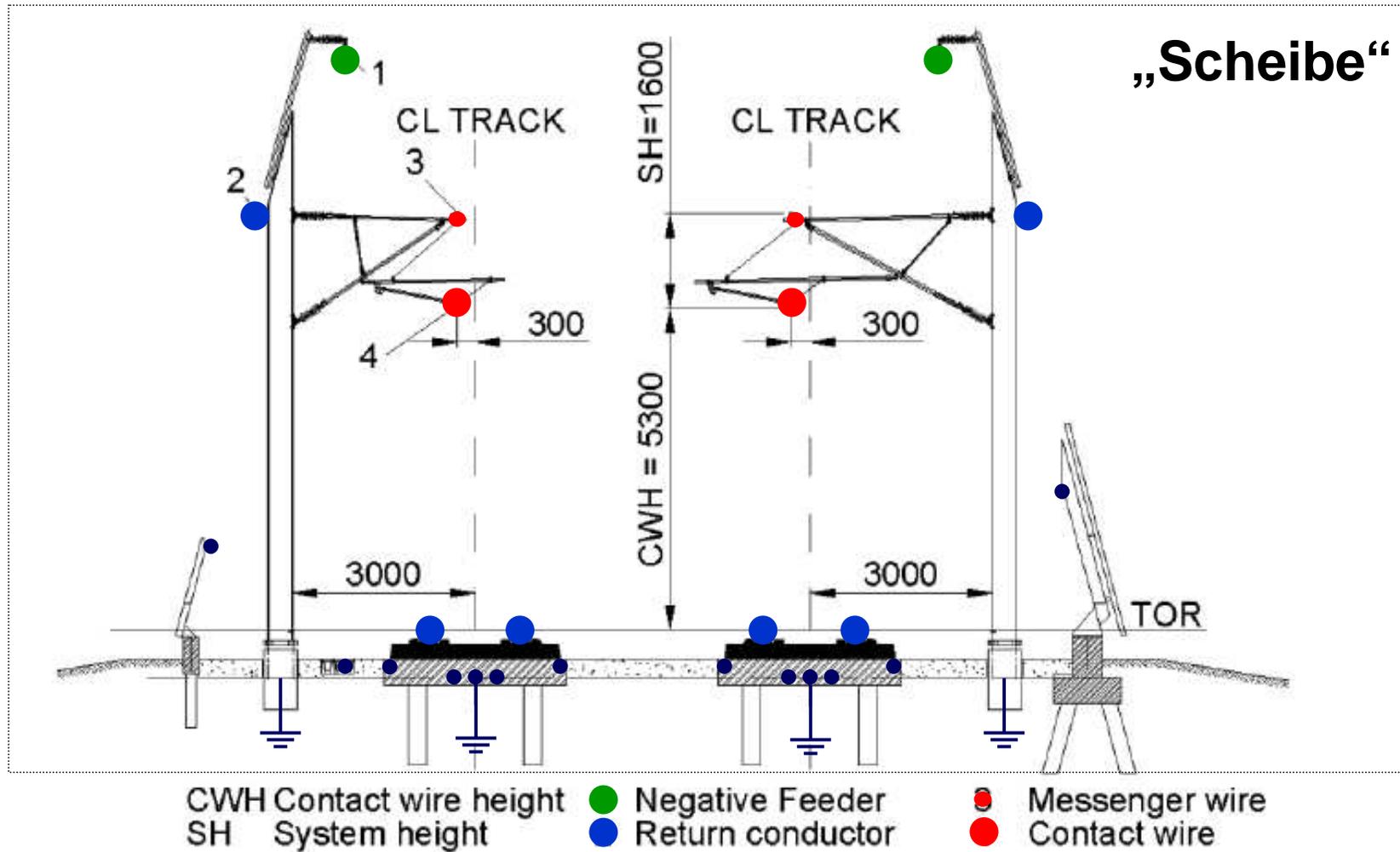


Source: DB KoRiL 997

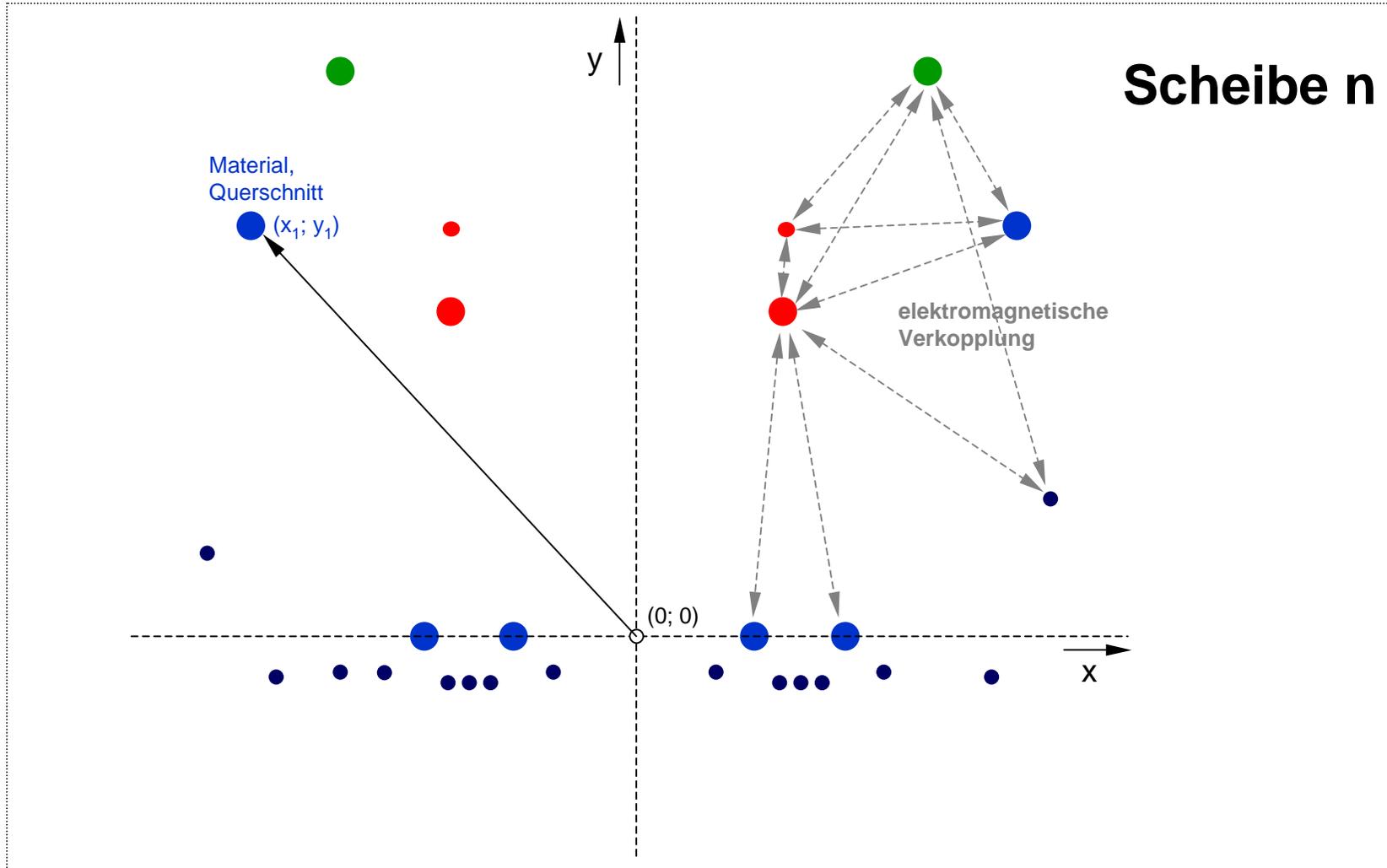
Streckenseitige Leiteranordnung (z.B. freie Strecke)



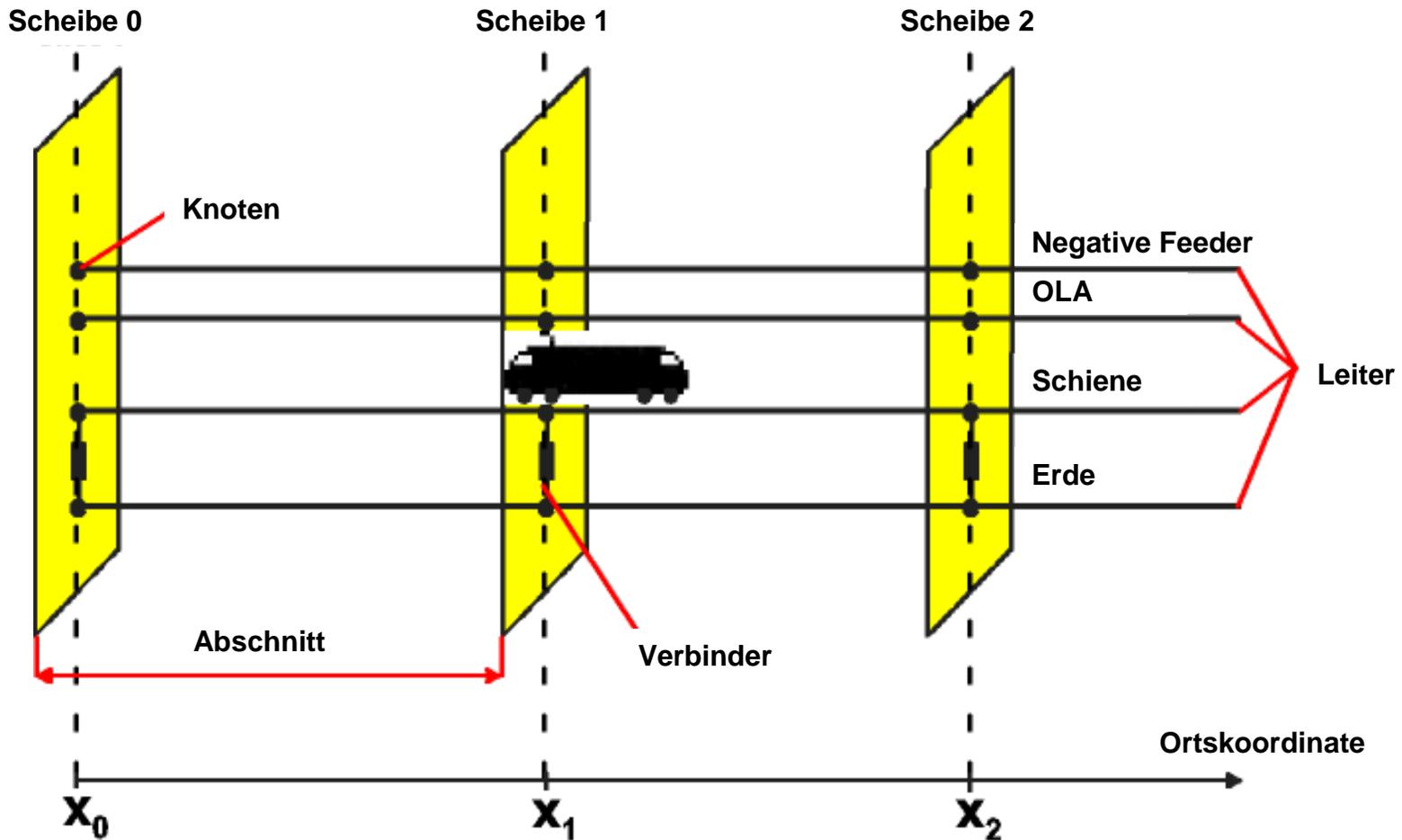
Geometrische Anordnung der Oberleitung



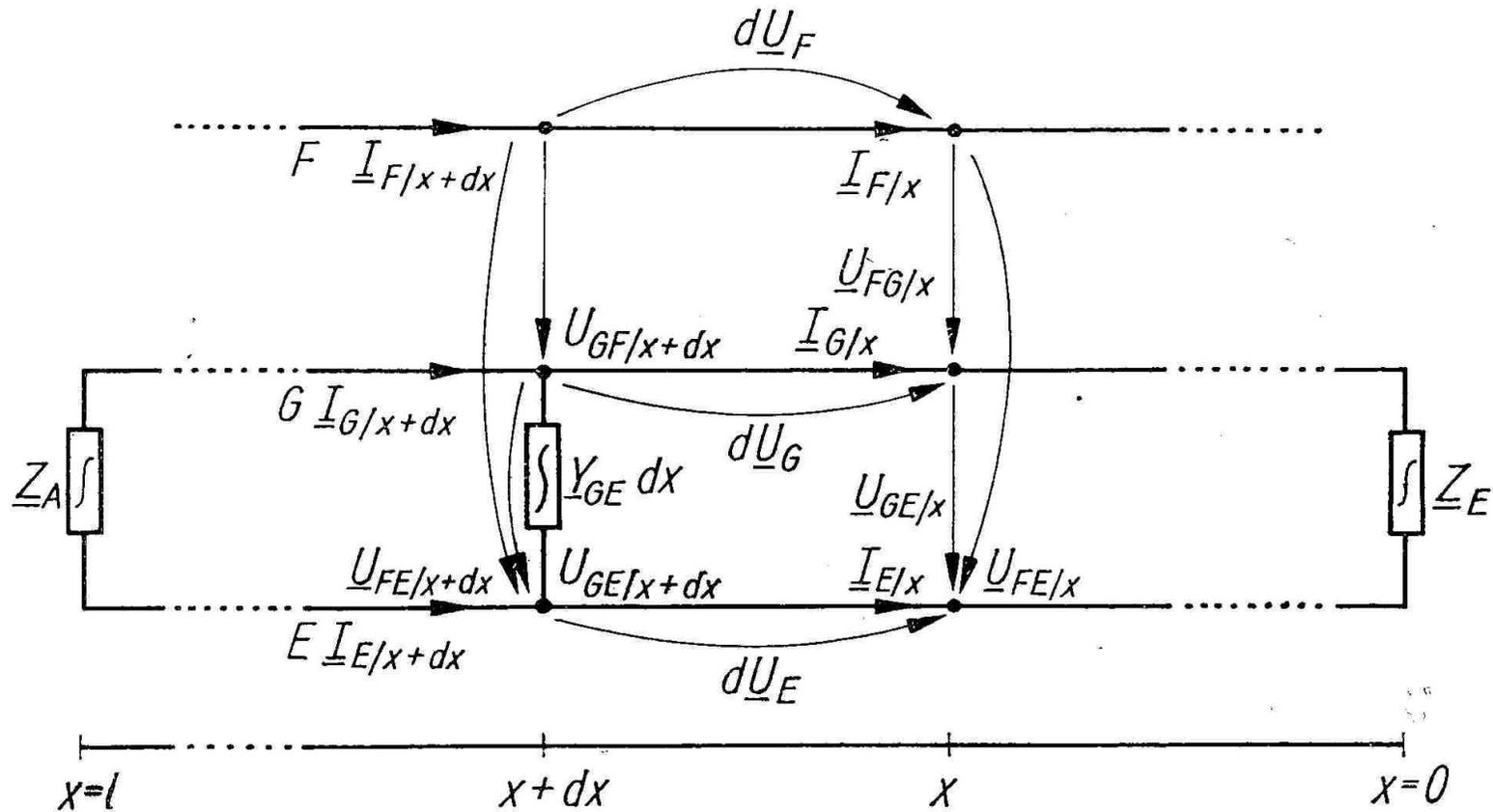
Geometrisches Leitermodell der Oberleitung

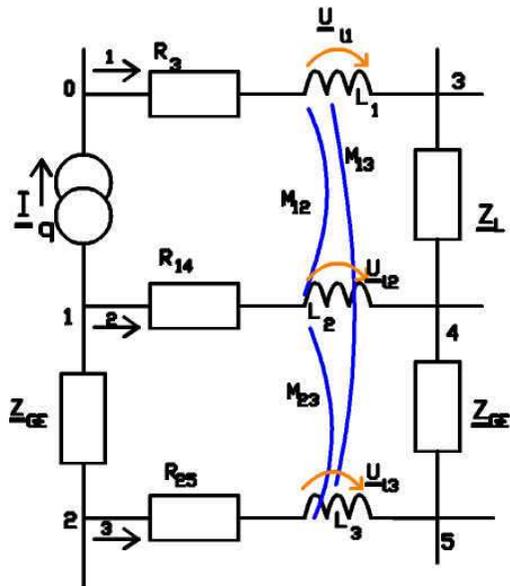


Abfolge der Scheiben



Mathematisches Netzwerkmodell





Elektrische Netzberechnung durch Erweiterte Knotenspannungsanalyse

$$[\underline{Y}]_{(v,v)} (\underline{U}_{v0})_{(v,1)} - [\underline{Y}_2]_{(v,LL)} (\underline{U}_L)_{(LL,1)} = (\underline{I}_q)_{(v,1)}$$

Spannungsfälle über den Selbst- und Gegeninduktivitäten

Knoten	Knotenspannungen					Induktive Spannungen			Einströmungen
	\underline{U}_{10}	\underline{U}_{20}	\underline{U}_{30}	\underline{U}_{40}	\underline{U}_{50}	\underline{U}_{12}	\underline{U}_{13}	\underline{I}_q	
1	$G_{14} + \underline{Y}_{GE}$	$-\underline{Y}_{GE}$		$-G_{14}$				$-\underline{I}_q$	
2	$-\underline{Y}_{GE}$	$G_{25} + \underline{Y}_{GE}$			$-G_{25}$			0	
3			$G_{30} + \underline{Y}_L$	$-\underline{Y}_L$		G_{30}		0	
4	$-G_{14}$		$-\underline{Y}_L$	$G_{14} + \underline{Y}_L + \underline{Y}_{GE}$	$-\underline{Y}_{GE}$		G_{14}	0	
5		$-G_{25}$		$-\underline{Y}_{GE}$	$G_{25} + \underline{Y}_{GE}$		G_{25}	0	

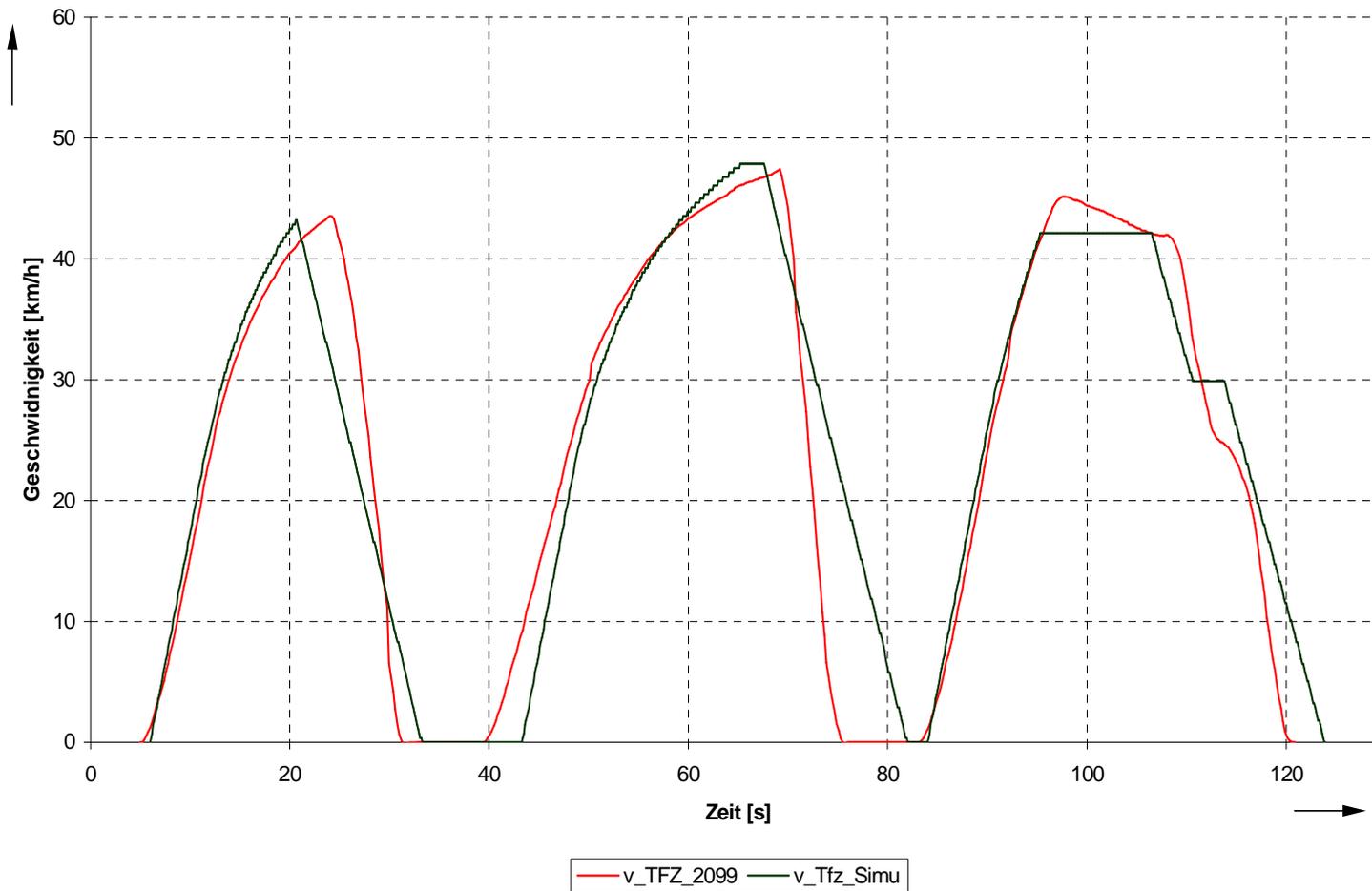
Verifizierung der Simulation

- **punktuelle theoretische Prüfung**
 - **Stromsumme Null für Netz-Schnitte**
 - **Energieabgabe gleich Energieaufnahme**
 - **Korrespondenz von Spannungs-Minima/Maxima/Sprüngen mit der Netzstruktur bei Konstantlastfahrt**

- **Vergleich Messfahrt / Simulation für definierte Betriebsfälle**
 - **fahrdynamisches Verhalten**
 - **Strom- und Spannungsverläufe**

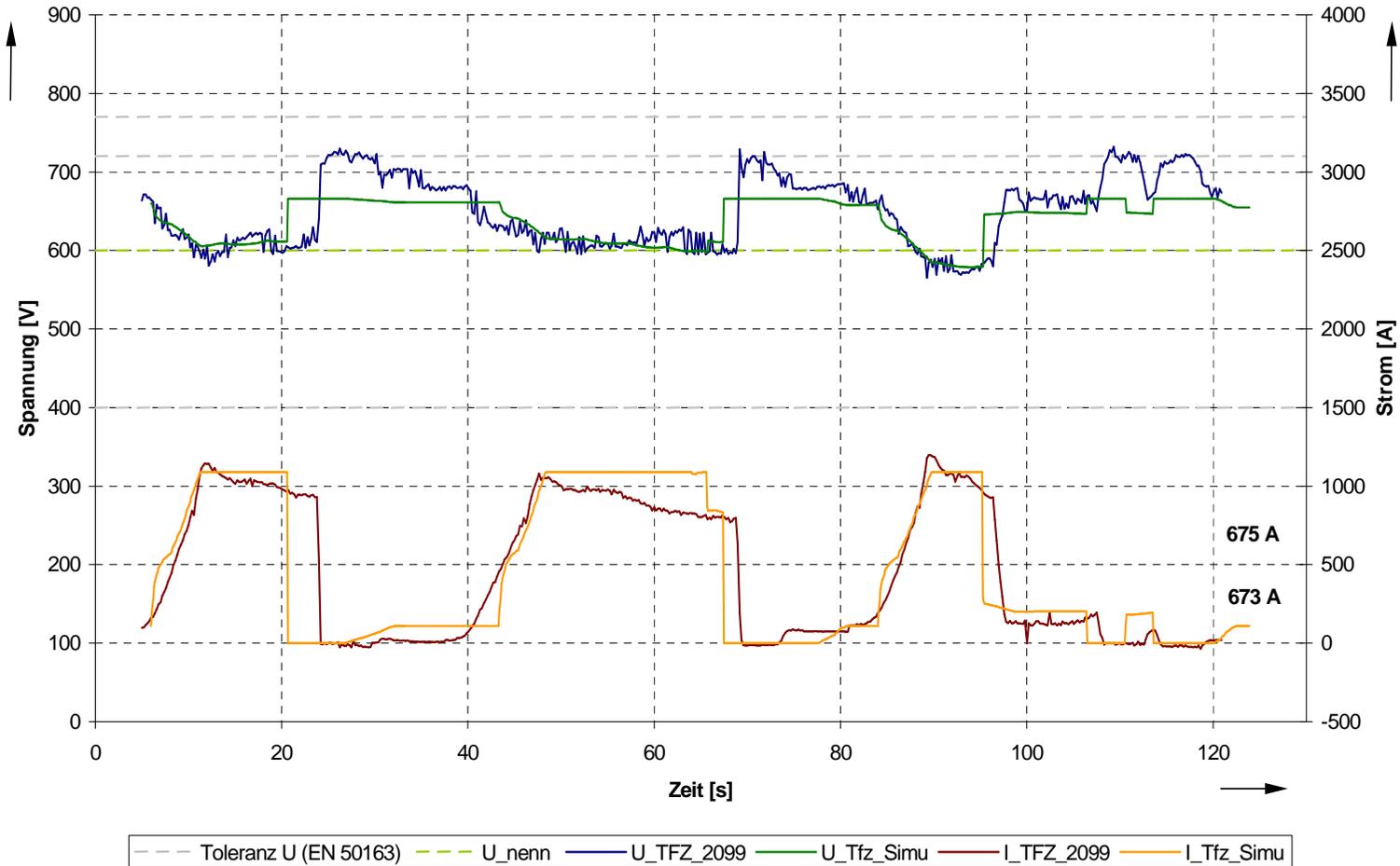
Verifizierung: Messfahrt und Simulation

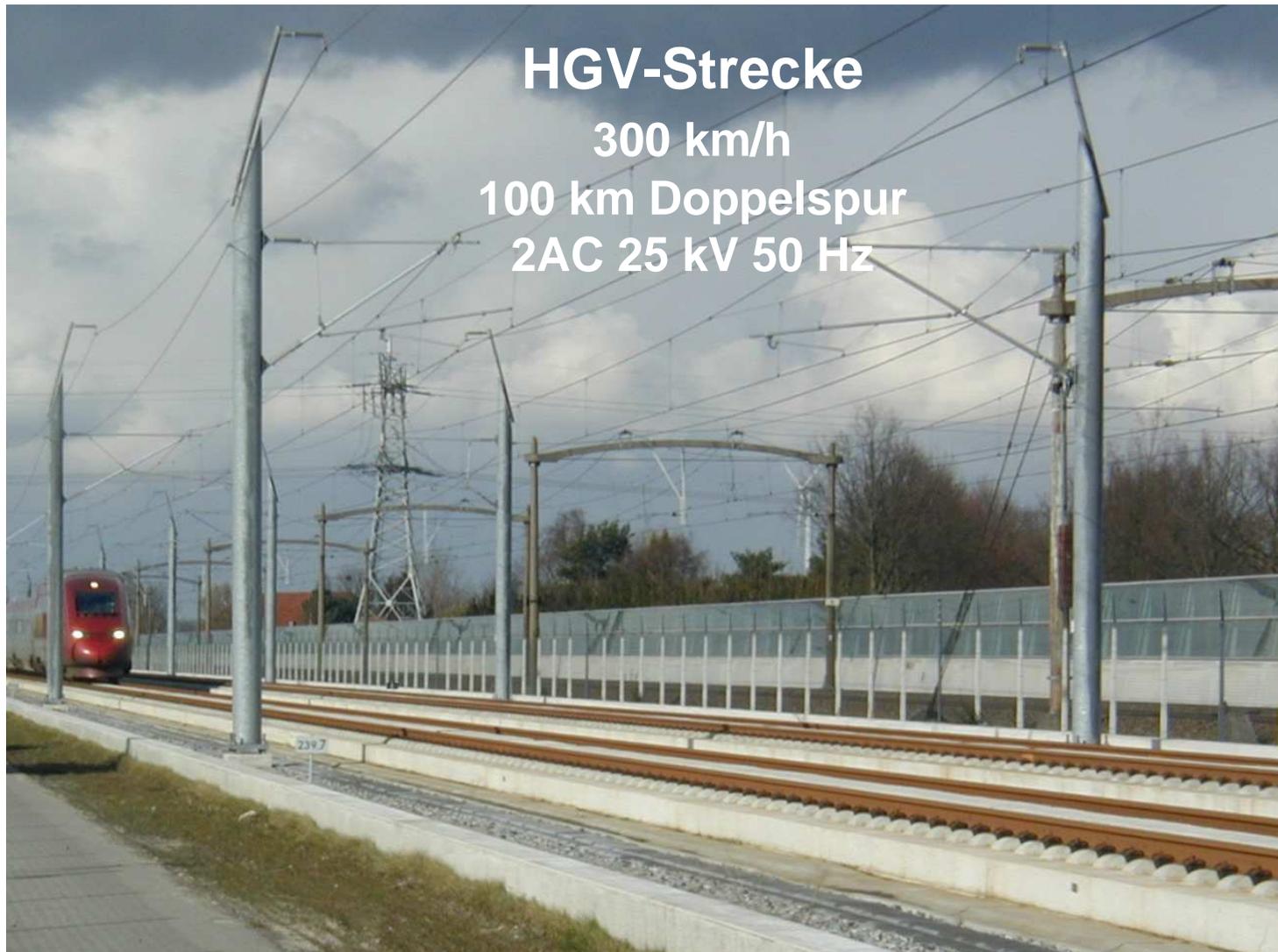
AB07, Messfahrt F8, mit Halt



Verifizierung: Messfahrt und Simulation

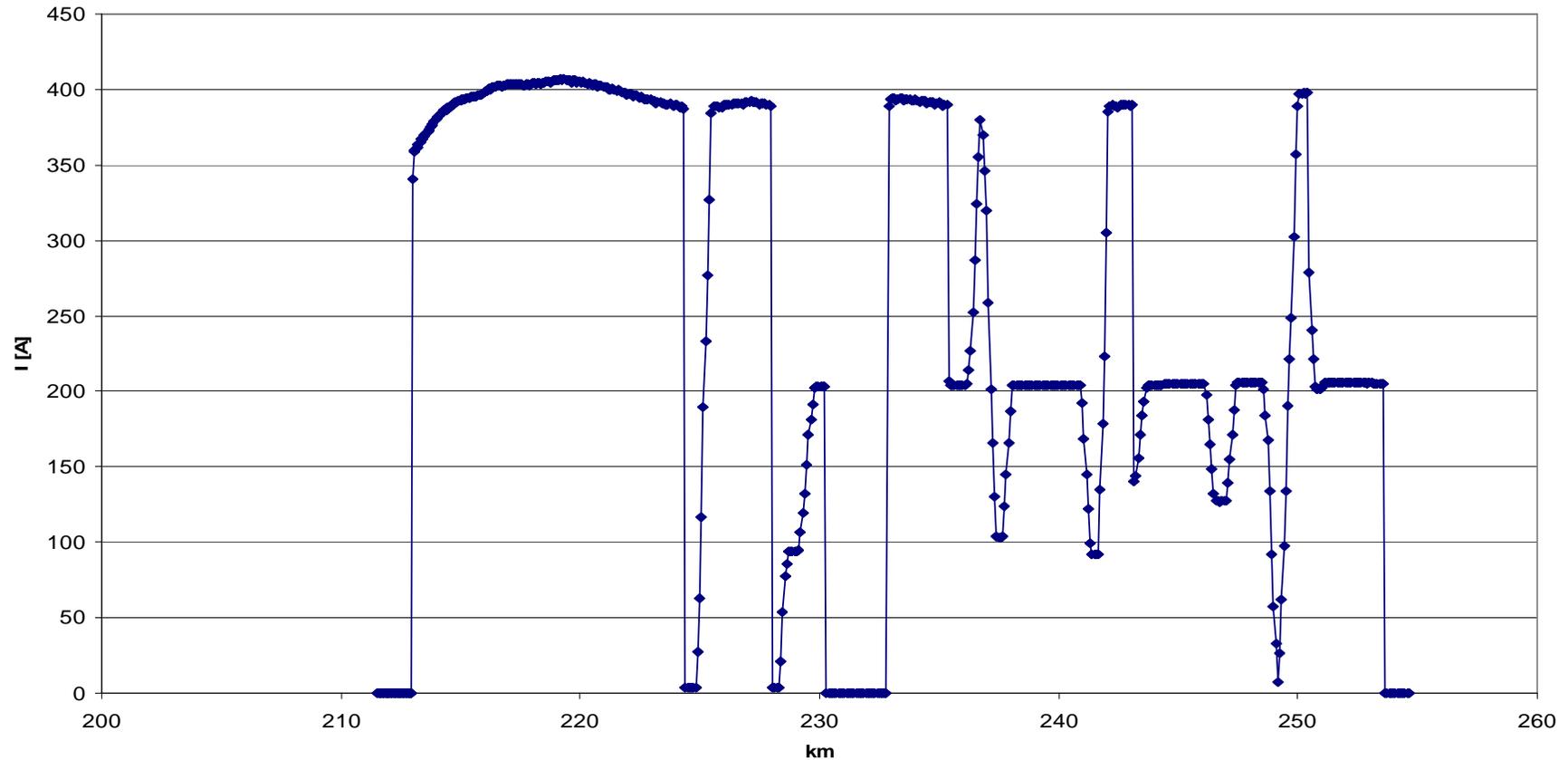
AB07, Messfahrt F8, mit Halt





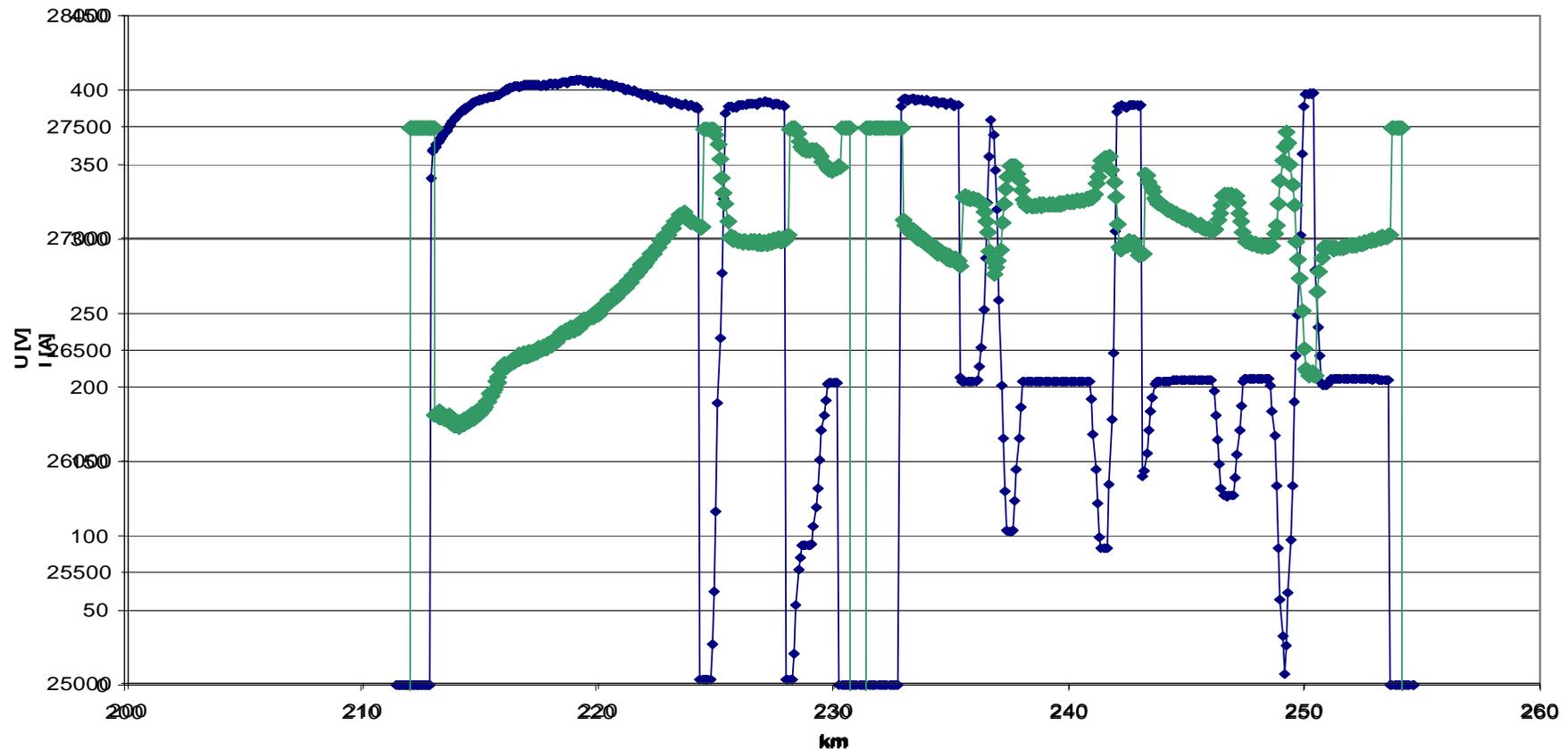
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Zugstrom $I = f(s)$



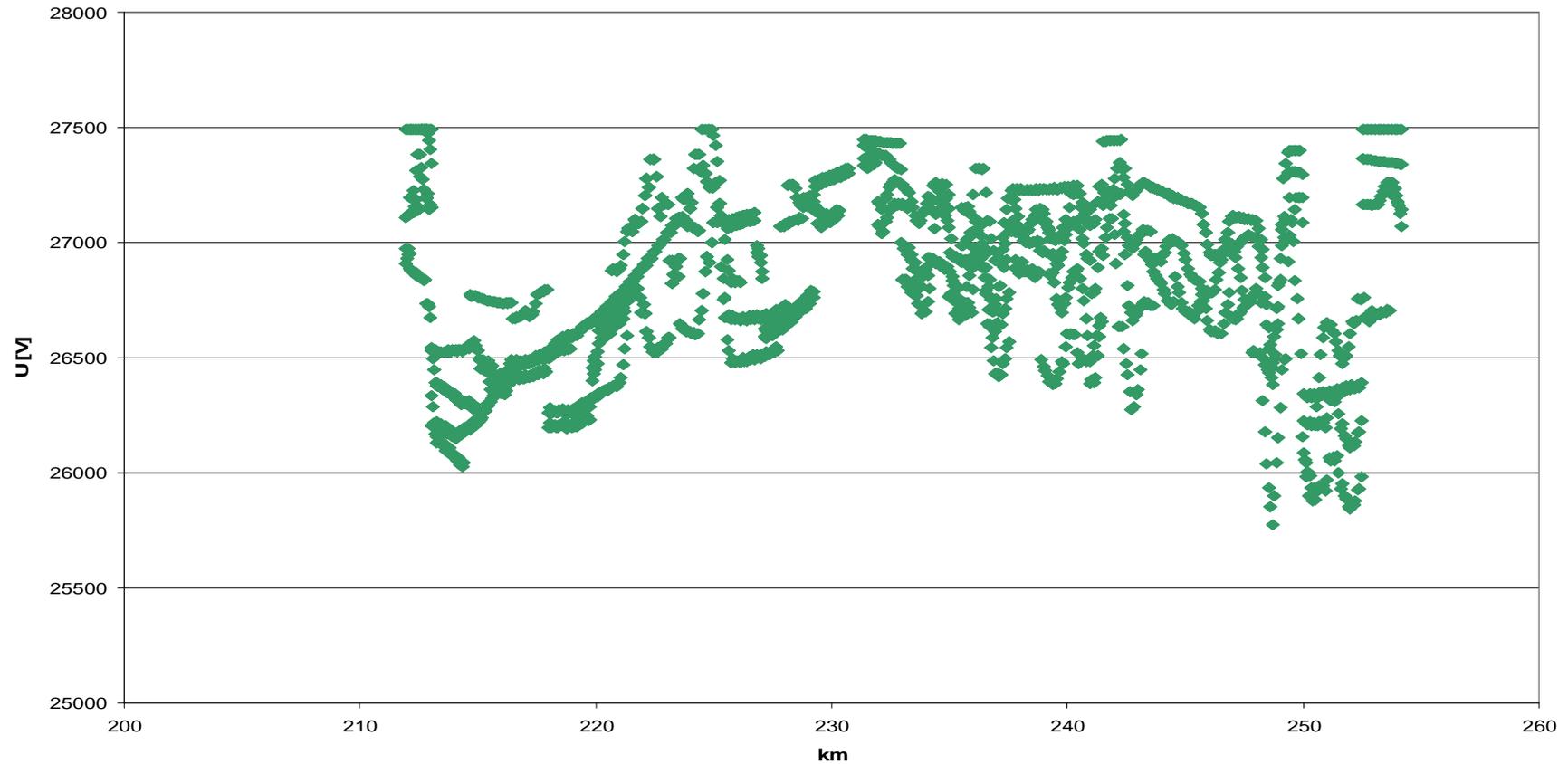
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Zugstrom $I = f(s)$, Fahrdrabtspannung am Stromabnehmer $U = f(s)$



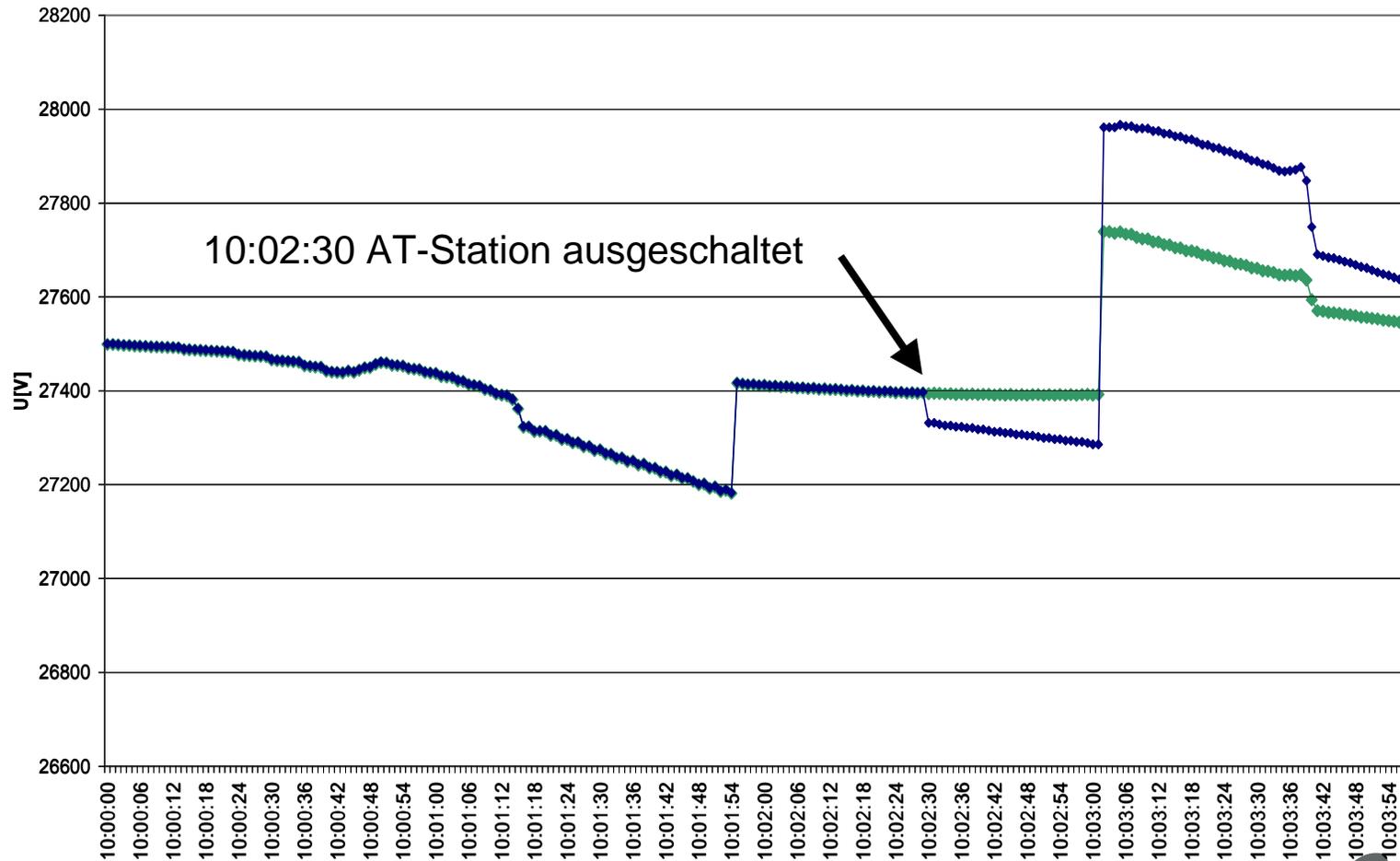
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Spannungen am Stromabnehmer aller Züge $U = f(s)$



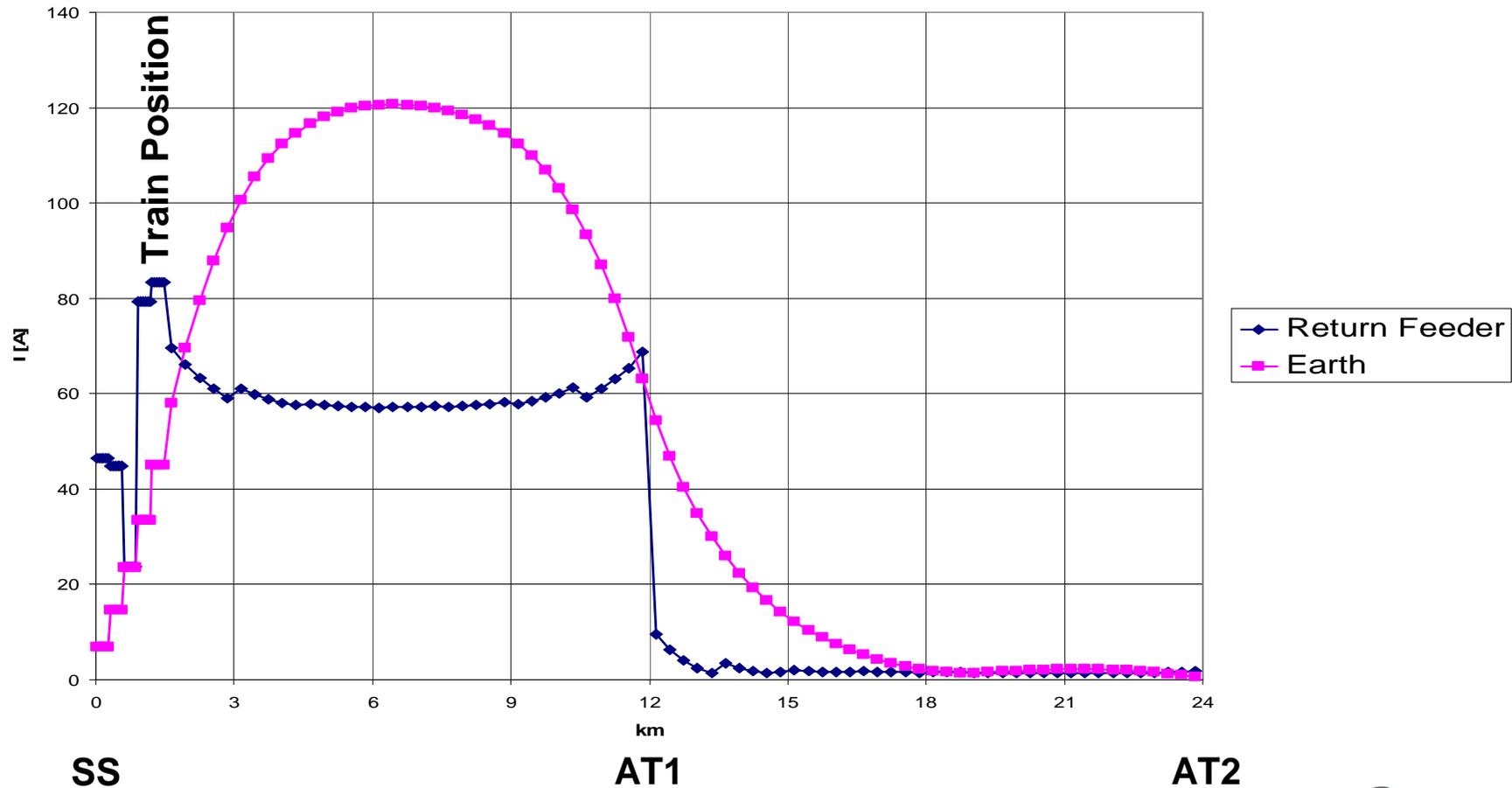
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Fahrleitungsspannung $U = f(t)$



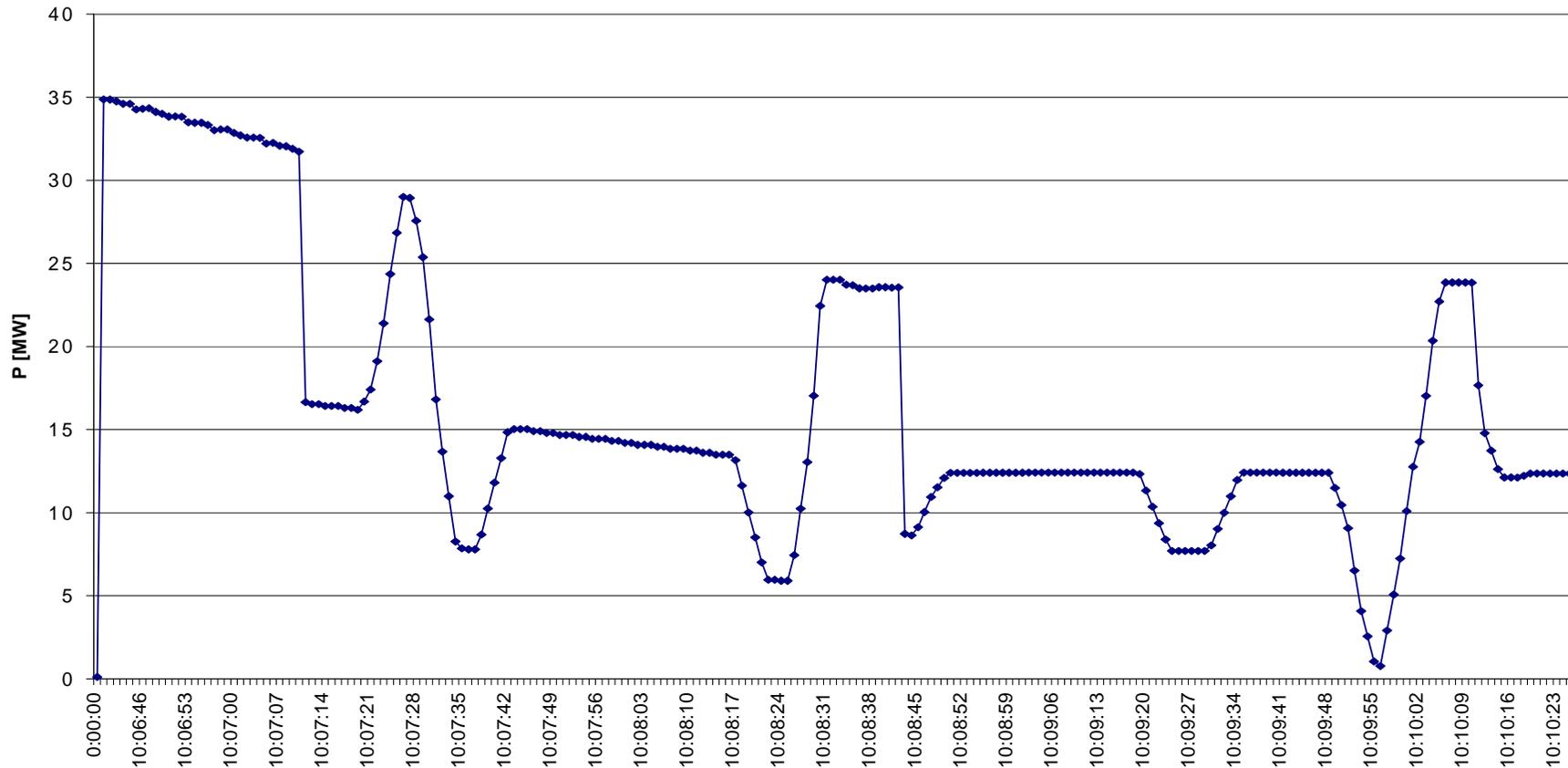
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Erdstromverteilung $I = f(s)$



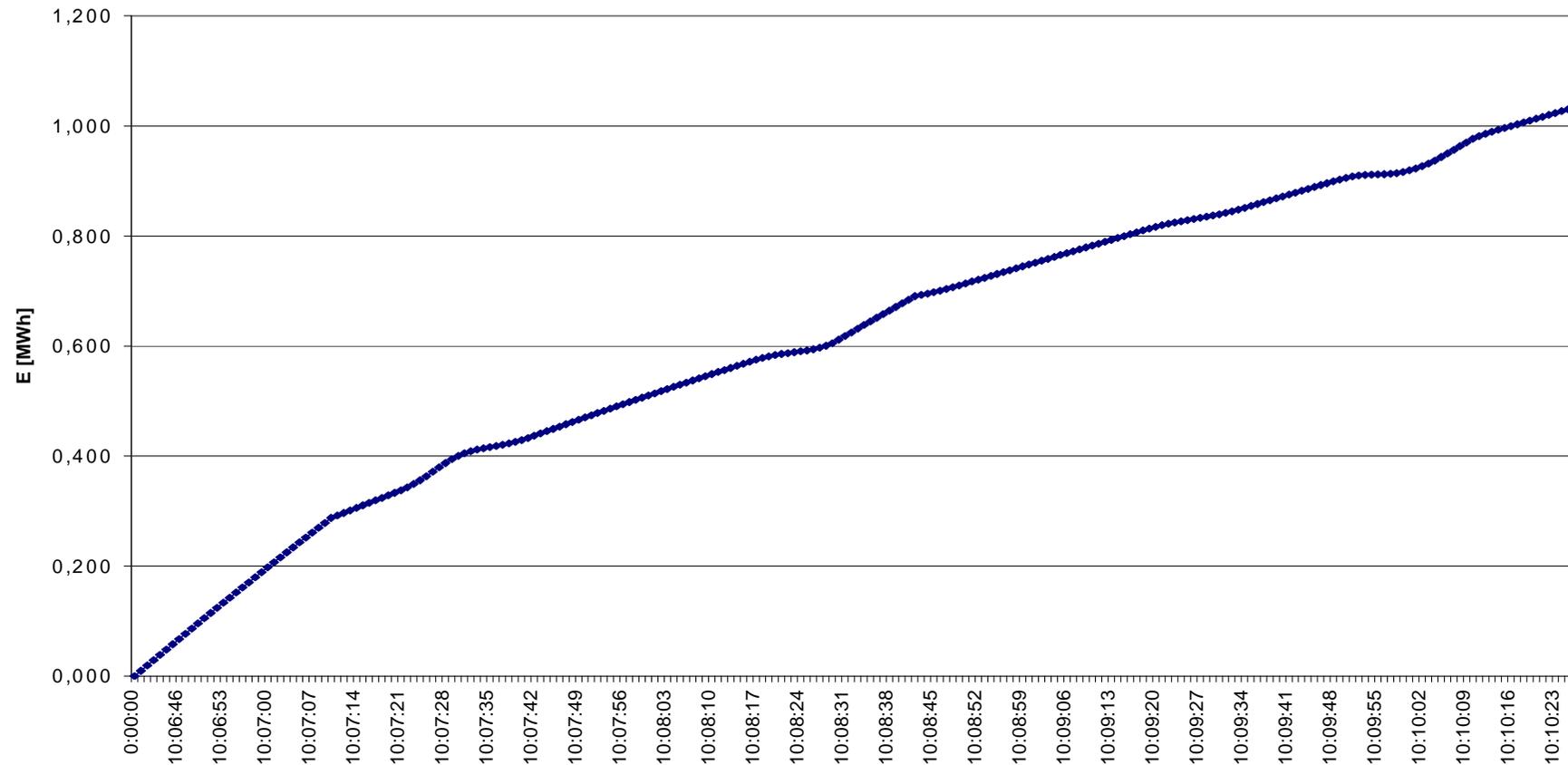
Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Transformatorleistungsgang im Unterwerk P = f(t)



Simulationsergebnisse: HGV-Strecke 2AC 25 kV

Energiebezug ab Sammelschiene Unterwerk E = f(t)



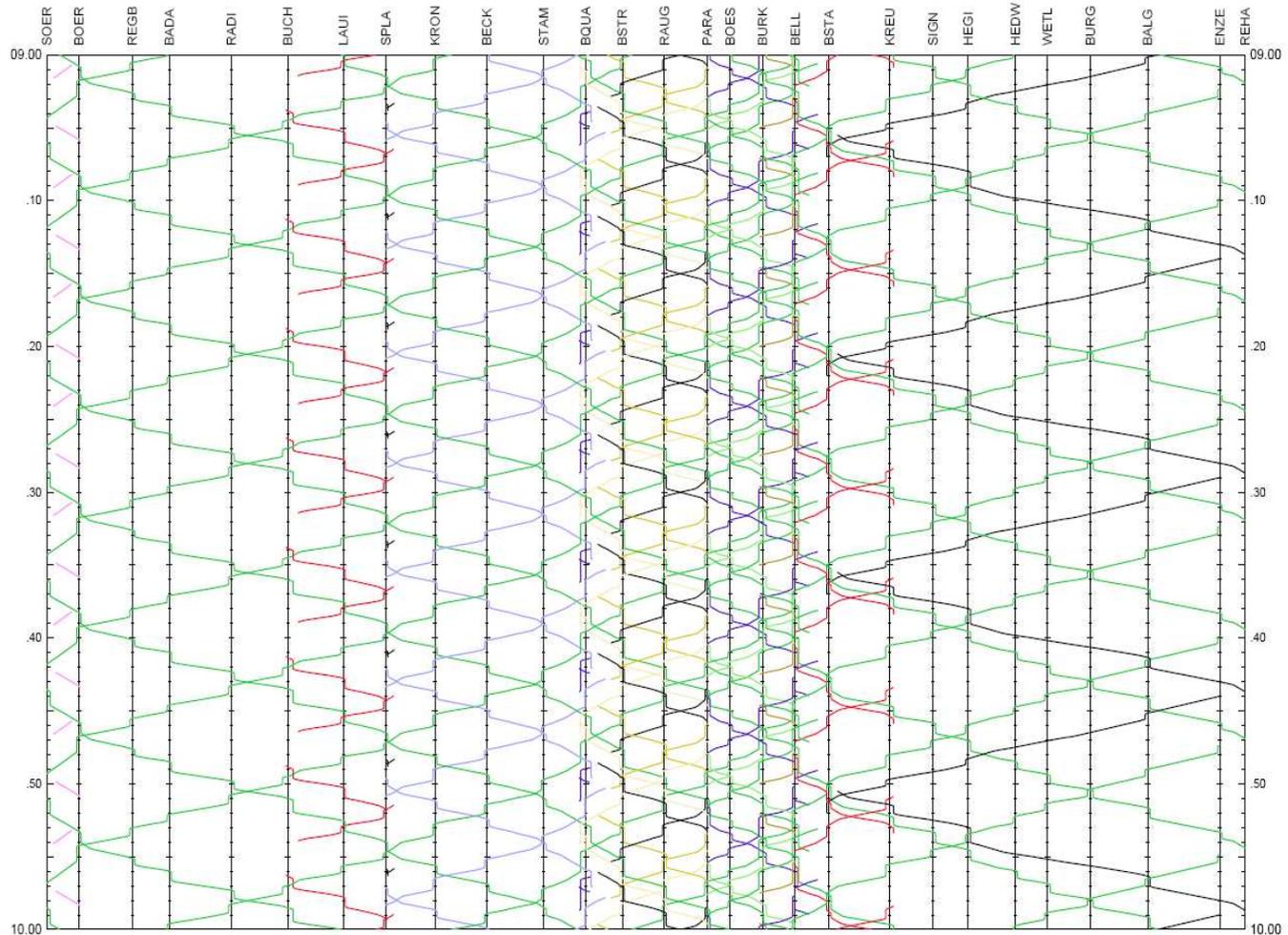


Fahrzeugmodellierung TRAM und Trolleybus



Bildfahrplan

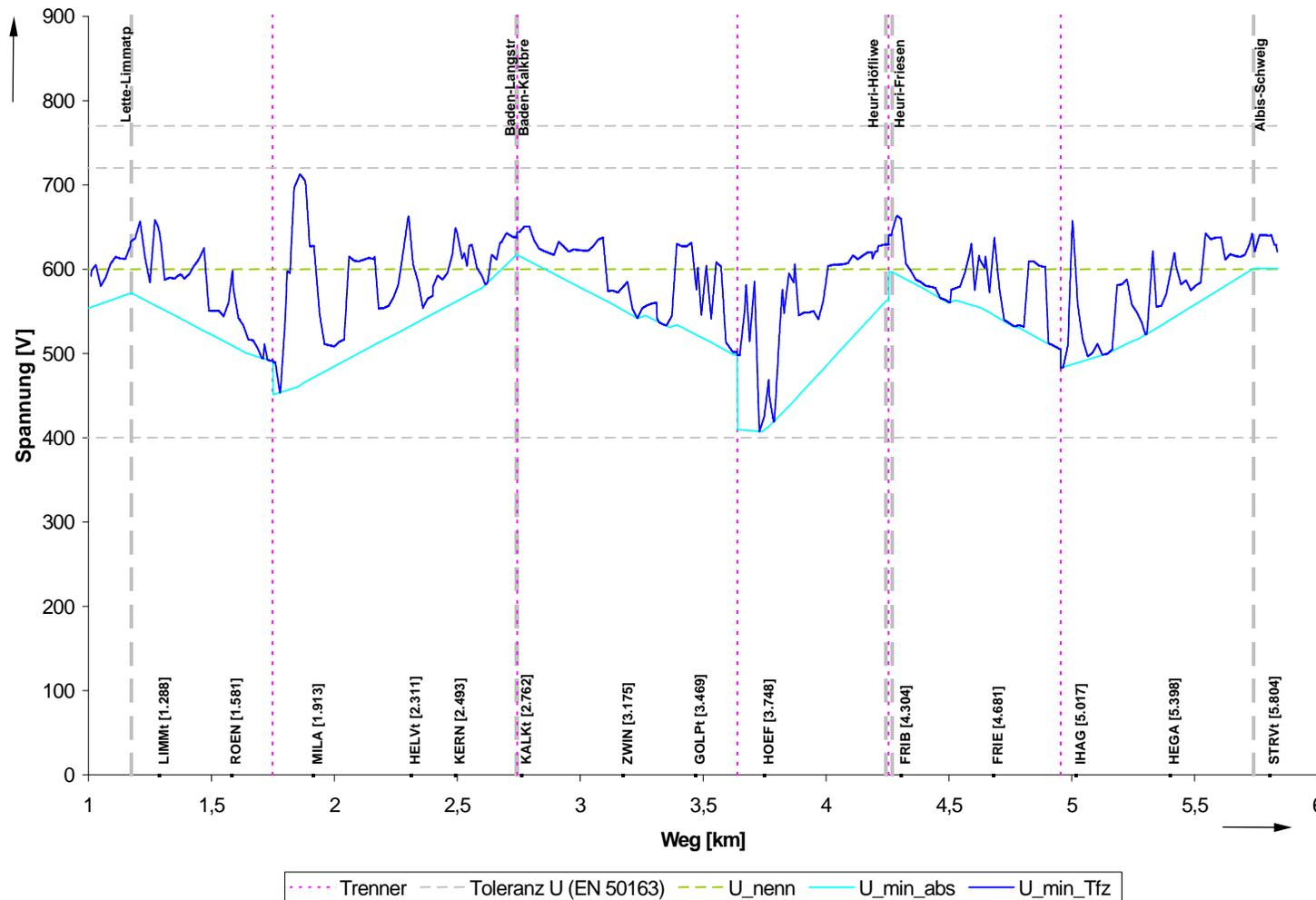
Strecke A



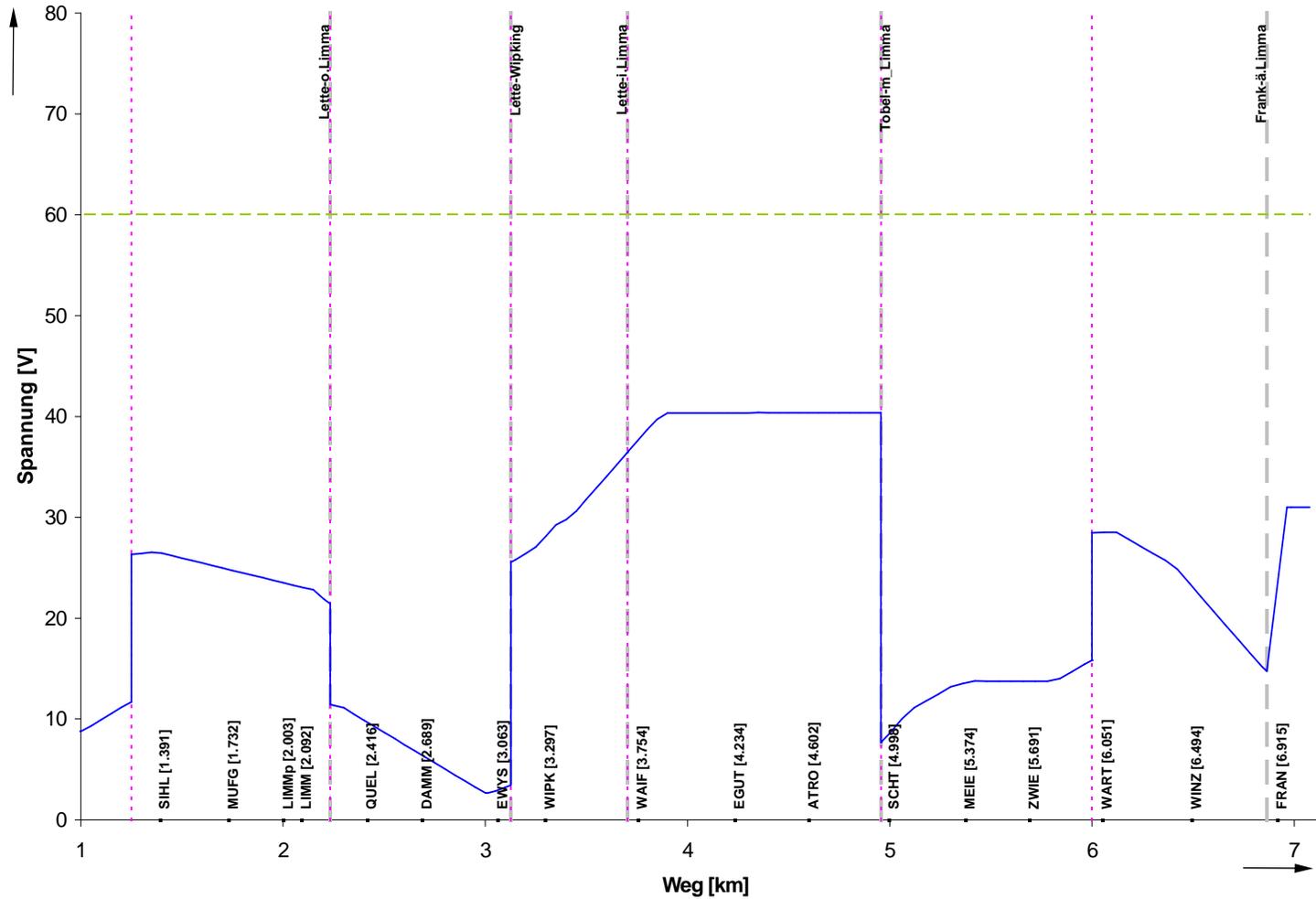


minimale Spannung an der Fahrleitung und am Stromabnehmer

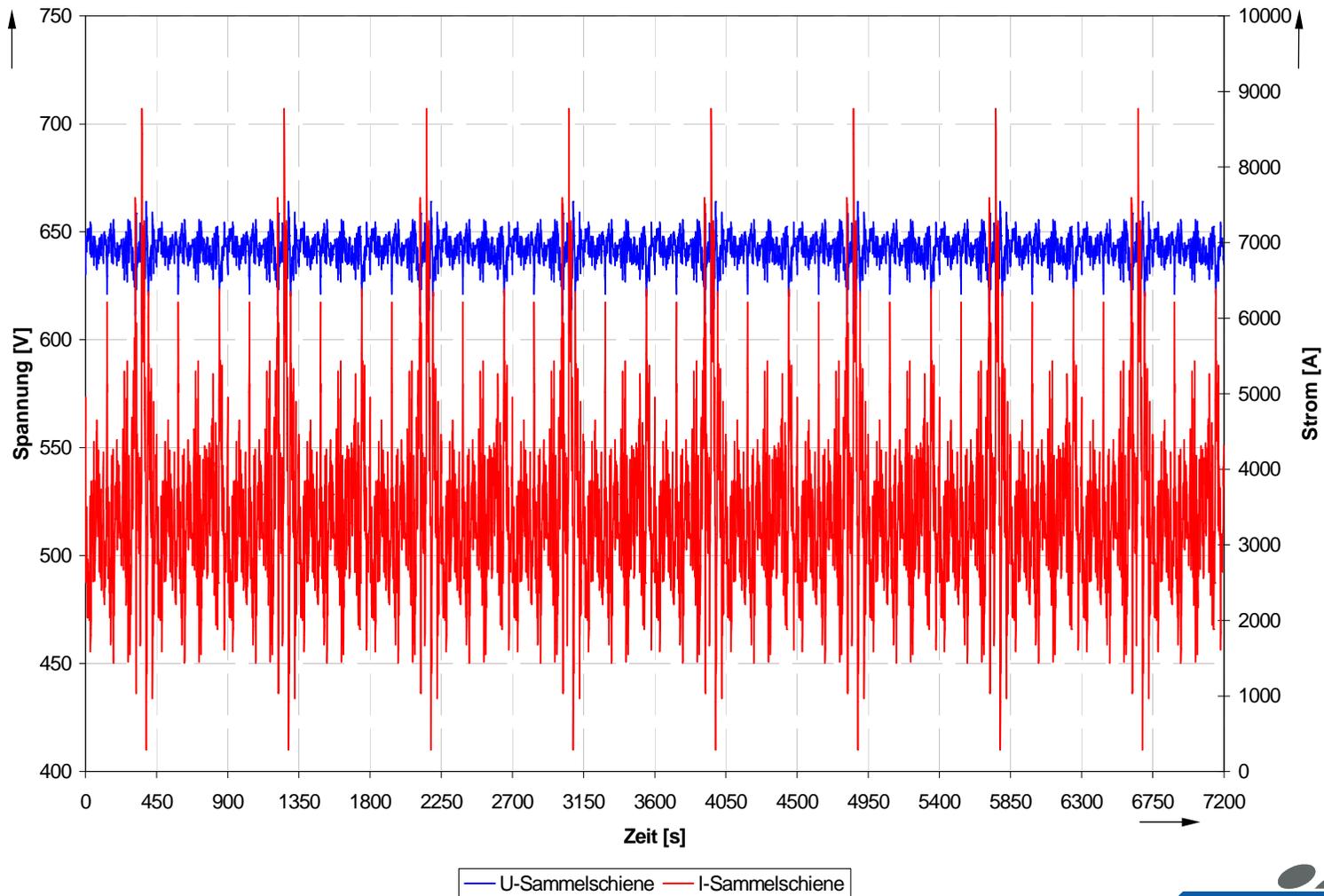
Normalbetrieb



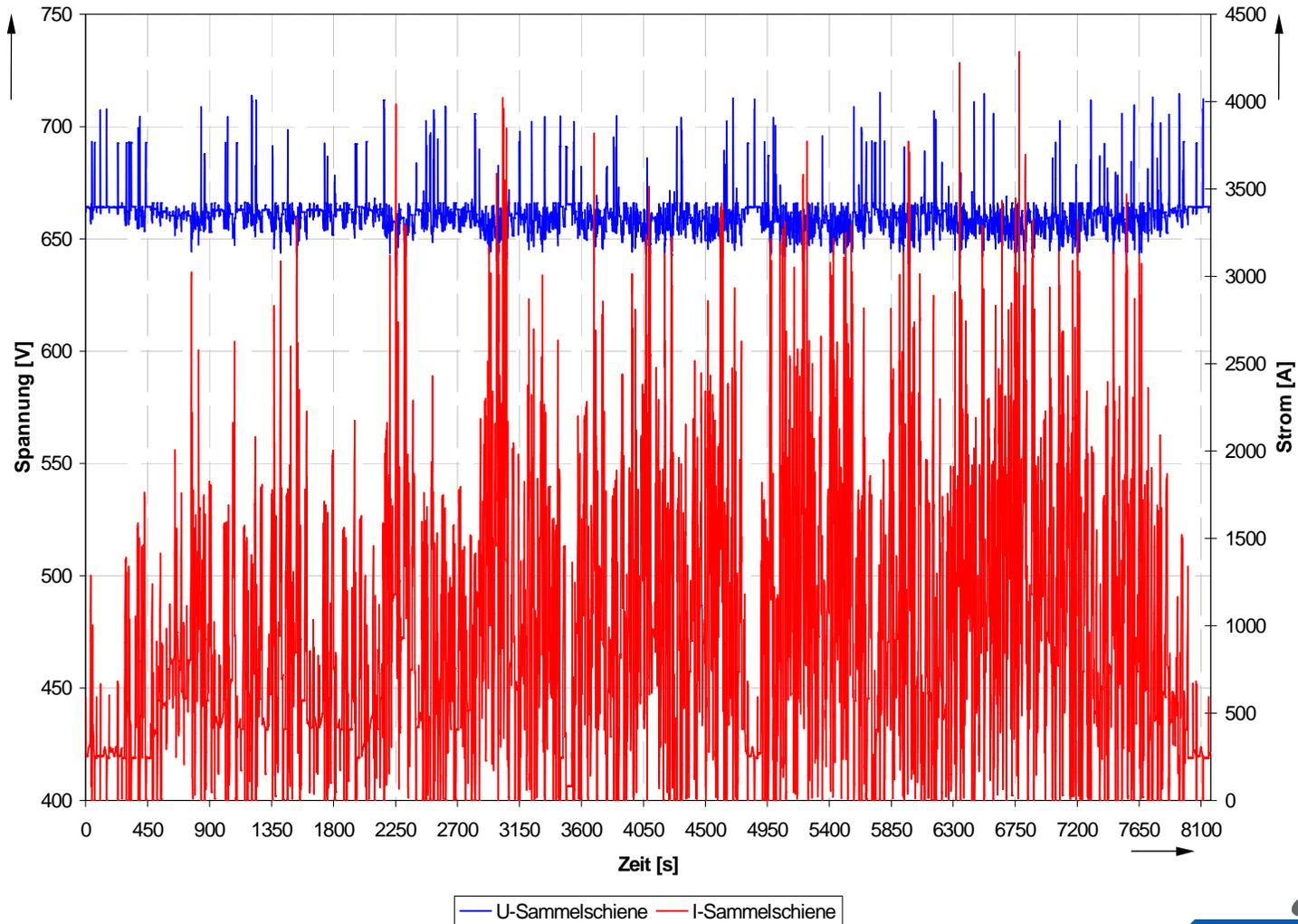
Gleis-Erde-Potenzial Normalbetrieb



Gleichrichterbelastung und Sammelschienenspannung Normalbetrieb



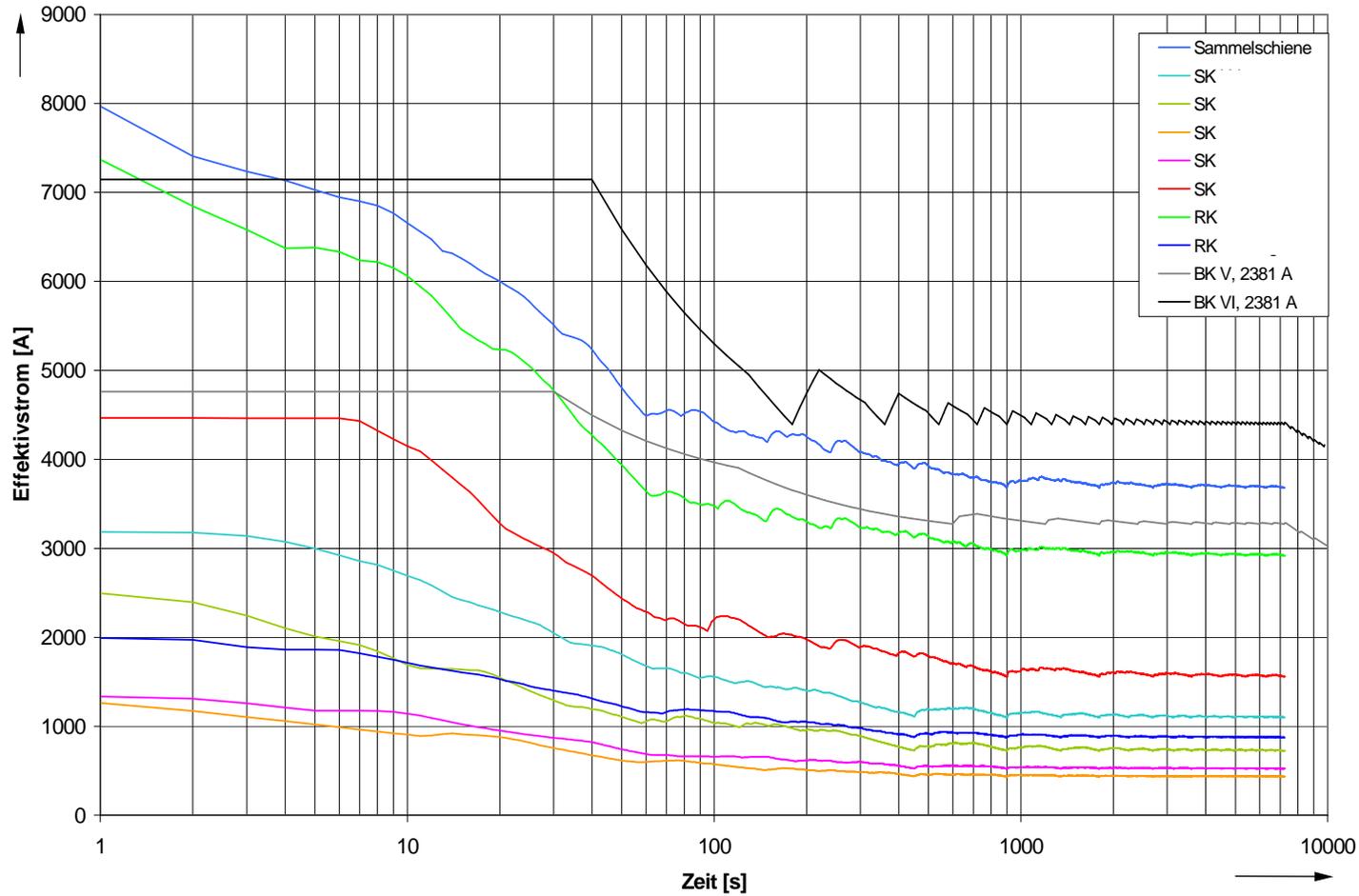
Gleichrichterbelastung und Sammelschienenspannung Depotausfahrt



Belastung und Belastbarkeit

Unterwerk

Normalbetrieb, Ausfall Nachbarunterwerk



Belastungsgrößen

Unterwerk, Normalbetrieb ohne Ausfälle

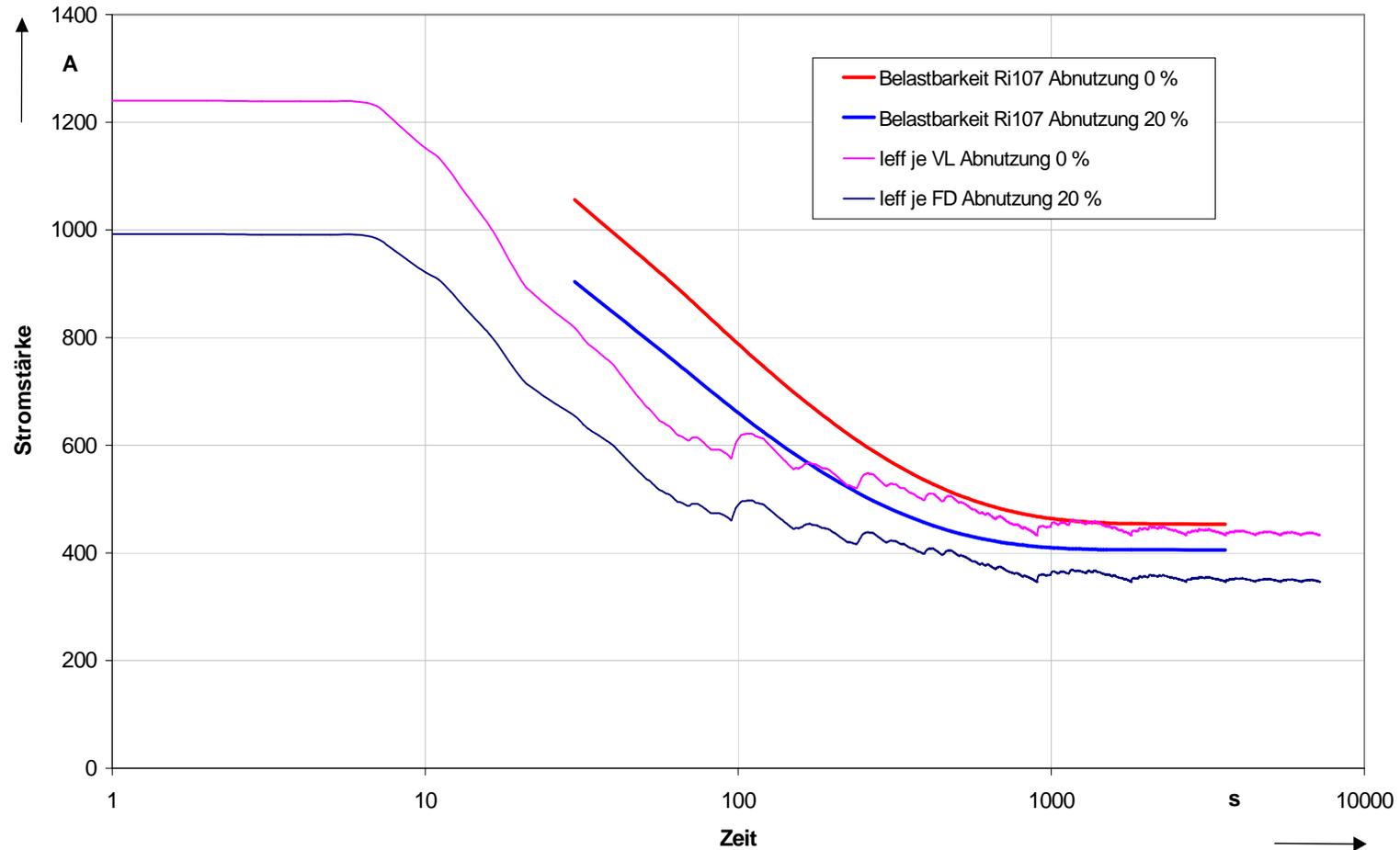
Station	Sektor	I_{\max}	I_{eff}	P_{\max}	E_{ab}	E_{auf}	E_{verl}	I_{Einst}	I_{Kmin}	$I_{\text{Kmin}}/I_{\text{Einst}}$	$I_{\max}/I_{\text{Einst}}$
		[A] 1 s	[A] 7200 s 2 h	[kW]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kA]	[kA]	soll > 110%	soll < 90%
	SK -	1915	588	1221	520	-10	4	3,5	14,0	400%	54,7%
	SK -	1686	404	1072	264	0	2	3,0	11,7	390%	56,2%
	SK -	1961	475	1252	417	0	3	3,0	10,4	347%	65,4%
	SK -	1665	332	1048	257	0	4	3,5	10,4	297%	47,6%
	SK -	3710	1018	2312	1000	-33	36	4,2	12,7	302%	88,3%
	SK -	1128	310	720	290	0	1	3,0	34,0	1133%	37,6%
	SK -	172	50	111	36	0	0	3,0	23,0	767%	5,7%
	SK -	1145	316	738	220	0	1	3,0			38,2%
	SK -	2824	1075	1770	1226	-6	18	3,5	16,6	474%	80,7%
	SK -	912	279	582	153	-28	1	2,5	2,7	108%	36,5%
	RK -	-1242	513	-749	0	-627	3				
	RK -	-2164	678	-1324	2	-789	8				
	RK -	-649	238	-393	0	-281	2				
	RK -	-3425	1375	-2065	0	-1683	8				
	RK -	-1742	657	-1050	0	-804	7				
	RK -	-912	279	-582	28	-153	1				
	gesamt	8773	3527	5289	4305	0	97				

SK: Speisekabel
 RK: Rückleiterkabel

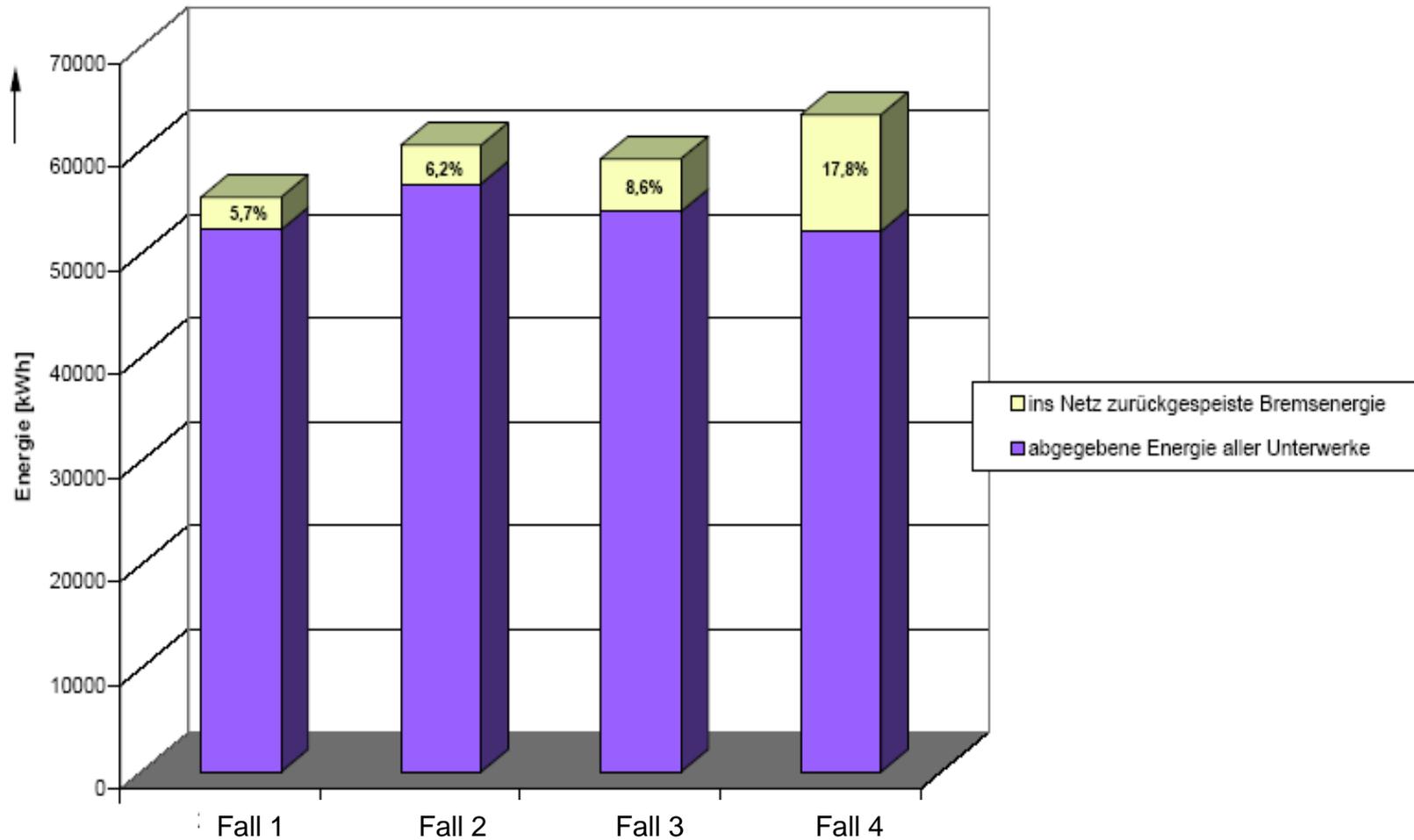
Belastung und Belastbarkeit

Fahrdraht am Speisepunkt

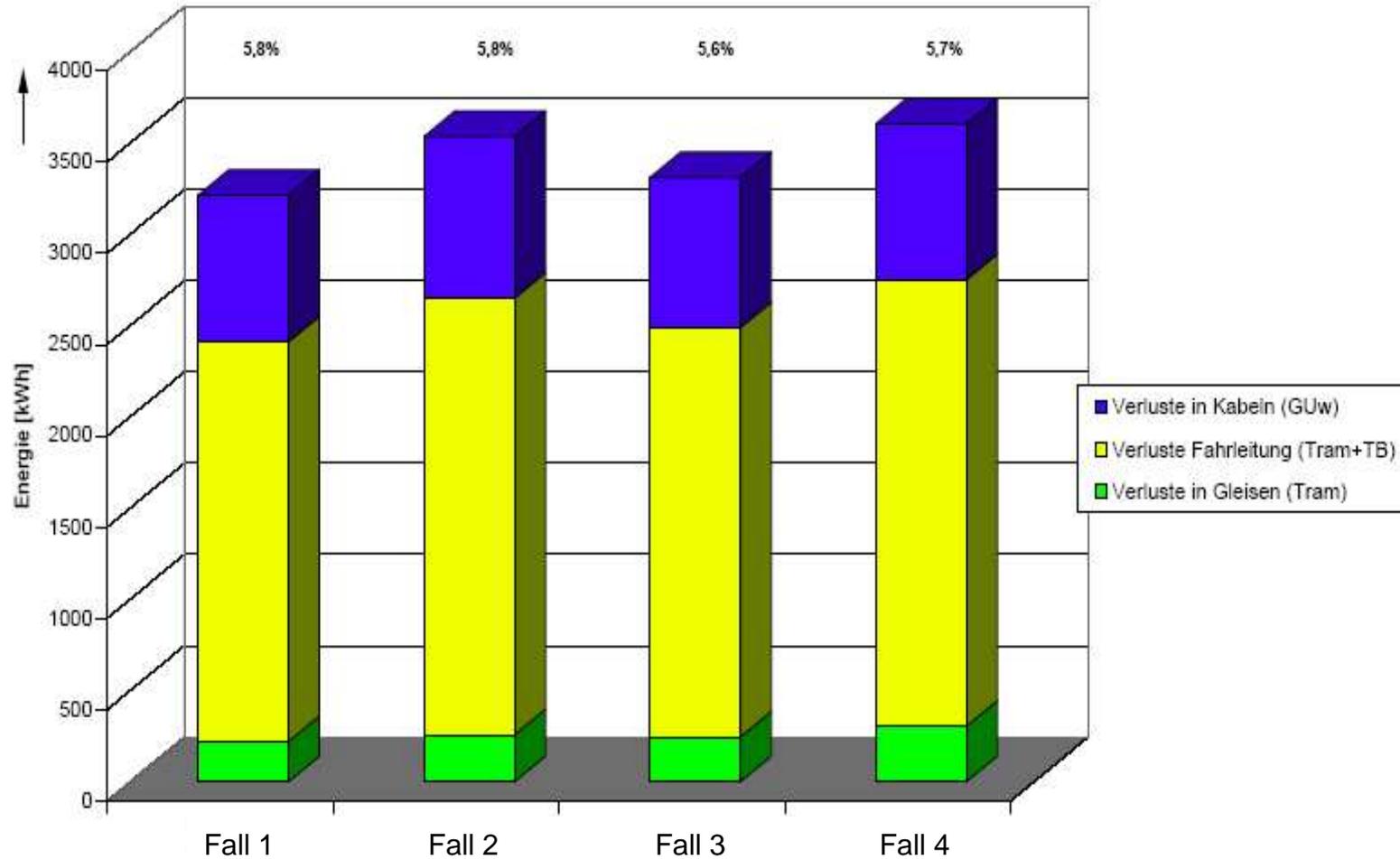
Normalbetrieb, Ausfall Nachbarunterwerk



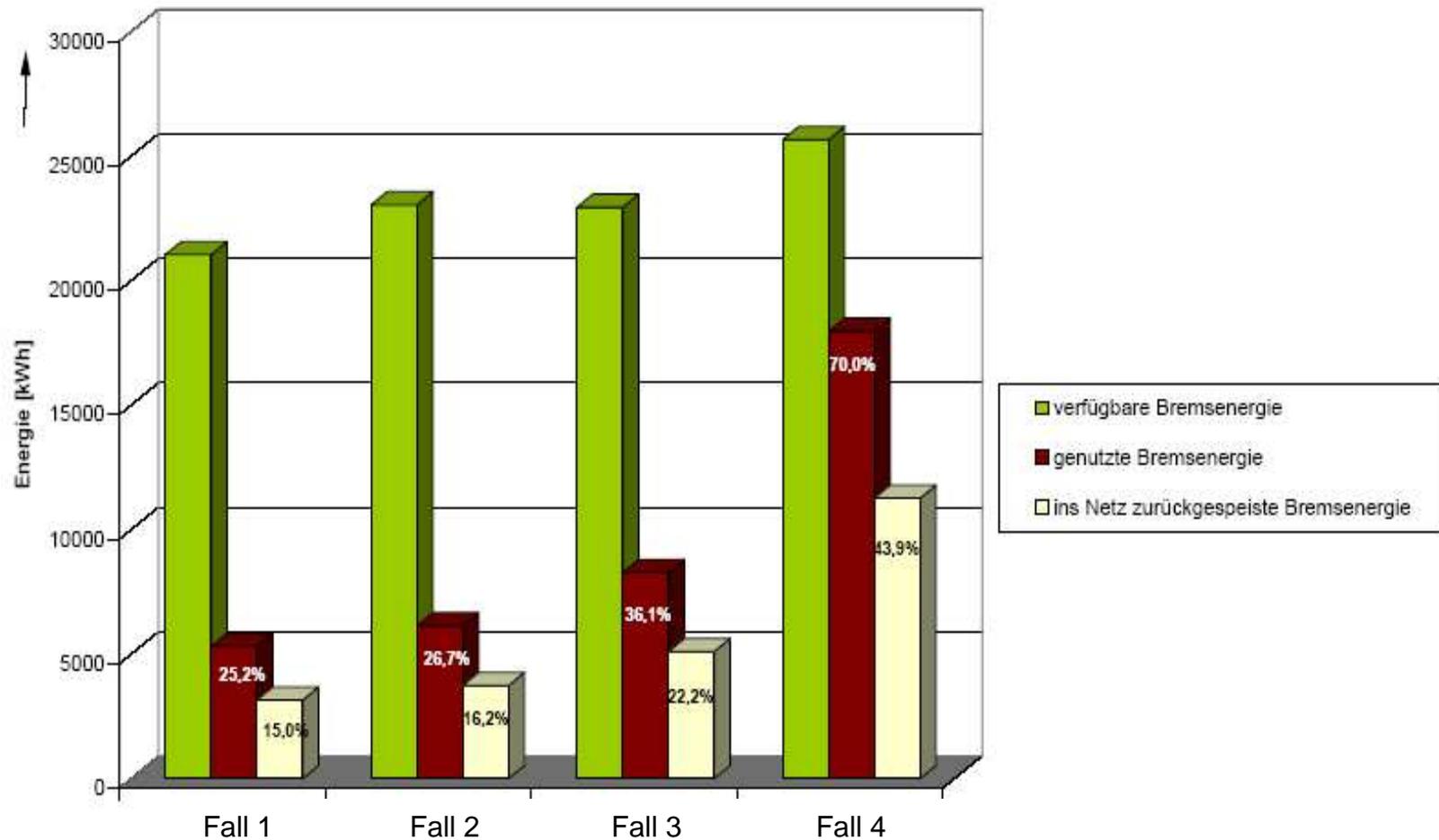
Energiebilanz



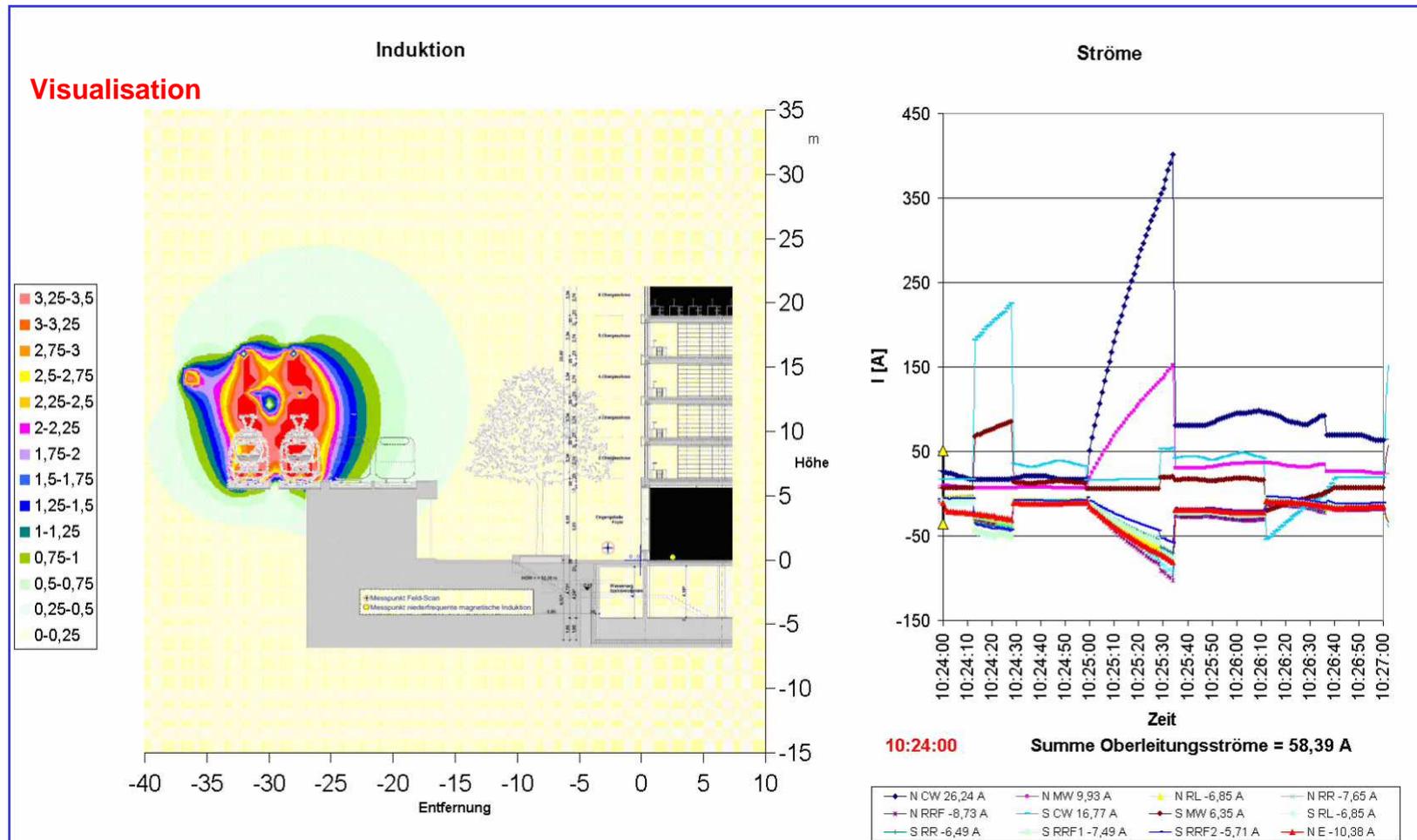
Verlustbilanz



Bremsenergiebilanz



Weiterverarbeitung: Elektromagnetische Felder bei 1AC 15 kV 16,7 Hz



Zusammenfassung

1. Bahnbetriebssimulation (OpenTrack)

- Co-Simulation mit dem elektrischen Netzsimulator OpenPowerNet
- Online-Kommunikation zwischen Bahnbetriebs- und Netzsimulation über ein SOAP-Interface
- Rückwirkung der elektrischen Netzberechnung auf die Fahrdynamik der Züge
- zusätzlich: automatische / interaktive Generation von Störzuständen

2. Lastfluss- und Energieberechnung (OpenPowerNet)

- Vollständige elektrische Netzberechnung im Modul PSC
- Vorgabe der elektrischen Netzparameter über Leiteranordnung und Materialeigenschaften
- Schaltzustandsänderungen im elektrischen Netz während der Simulation
- konfigurierbare Modellierungstiefe für die Antriebssimulation
- Umfangreiche Analysemöglichkeiten (Energie, Lastfluss, Ströme, Spannungen, zeitlich / örtlich)
- Datenexport für Post-Processing



Eine Expertenrunde für das Gesamtsystem Bahn
The Expert Team for the Complete Railway System

IFB Niederlassung Dresden, Wiener Str. 114-116, 01219 Dresden, Germany
Phone: +49 351 87759-0 E-Mail: ifb-dresden@bahntechnik.de www.bahntechnik.de