

# TransMilenio goes green



## Die Elektrifizierung eines der größten Bus Rapid Transit Systeme (BRT) der Welt

Trolleymotion

4. Internationale E-Bus-Konferenz, 2014, Hamburg

Institut für Bahntechnik GmbH  
Dipl.-Ing. Sven Körner



- **Unabhängiger Ingenieurdienstleister**
- **Leistungsbereiche**
  - Sicherungssysteme und Betriebsleittechnik
  - Systemtechnik Fahrzeug / Fahrweg
  - Antriebstechnik und Energieversorgung
  - Fahrleitung, Rückstrom, Erdung
  - Fahrzeugdynamik
  - Projektsteuerung und –management
  - Consulting und Planung
  - Softwareentwicklung
  - Zulassung und Prüfstelle
- **Gutachter des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA)**

**ALSTOM**  
**Balfour Beatty**  
**BOMBARDIER**

 **KNORR-BREMSE**

**SIEMENS**

**THALES**

**VOITH**  
Engineered reliability.®

**vossloh**

**BVG**

**iABG**

  
INGENIEURBÜRO  
VÖSSING

 **LBB**

**DIE BAHNINDUSTRIE.**  
VDB VERBAND DER BAHNINDUSTRIE IN DEUTSCHLAND E.V.

**SPITZKE**   
EUROPEAN CLASS



## 1. Einleitung

## 2. Projekthintergründe

- Bus Rapid Transit System
- Kolumbien
- Energieerzeugung
- TransMilenio

## 3. Simulationssoftware

## 4. Einzelaspekte der Umsetzung

- Modellierung der Streckeninfrastruktur
- Modellierung der Fahrzeuge
- Modellierung des Fahrplans
- Elektrische Infrastruktur

## 5. Auswahl einzelner Ergebnisse

## 6. Zusammenfassung





- **Machbarkeitsstudie** Elektrifizierung des BRT TransMilenio in Bogotá
- Verschiedene Szenarien sollen die prinzipielle technische Machbarkeit eines **Oberleitungsbussystems** zeigen
- Verkehrsleistung des Systems: **47.000 paxphpd** in Spitzenstunde
- Auslegung des elektrischen Netzes hinsichtlich:
  - Anzahl und Position der Unterwerke
  - Auswahl geeigneter Fahrleitung
  - Dimensionierung elektrischer Betriebsmittel
  - Einhaltung normativer Grenzen
- Vorzugsvariante



Typische Verkehrssituation BRT



## Bus Rapid Transit System

- BRT auch Busway oder Metrobus
- Busliniensystem mit eigenem Fahrweg
- feste Haltestellenpositionen
- Busse mit sehr hohen Fahrgastkapazitäten
- Ticketkauf und Entwertung findet im Stationsbereich statt
- hohe Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Komfort eines schienengebundenen Systems sollen mit Flexibilität und den niedrigen Anschaffungskosten eines Dieselmotors kombiniert werden



TransMilenio, Schwachlaststunde



## Kolumbien

- im Norden Südamerikas
  - Anden im Hinterland
  - Großteil der Bevölkerung in Städten im Hinterland
  - gering besiedelte Waldgebiete
  - Hauptstadt: **Bogotá**
  - Einwohnerzahl: 715.000 (1951)  
7.6 Mio (2013)  
8.4 Mio (2020)
- ### Elektrische Energieerzeugung:
- 64 % aus Wasserkraft
  - 32 % fossile Brennstoffe
  - 4 % aus Erneuerbaren (kleine Wasserkraftwerke, Biomasse, Wind)



Verwaltungsbezirke Kolumbien, Quelle: WikiTravel



## TransMilenio

- 1998 Verkehrskonzept für Bogotá
  - Radwegenetz
  - Fußgängerzonen in der City
  - Autofreie Tage im Jahr
  - BRT: TransMilenio
- erfolgreiches PPP-Projekt
- Vorbildmodell in Kolumbien und weltweit (schnelle Einführung, geringe Kosten und Funktionalität)
- Nach Einführung 2000:
  - Verringerung Anteil MIV
  - Zunahme des Nichtmotorisierten Verkehrs
  - Rückgang der Unfallzahlen
  - Verringerung der Schadstoffemissionen
- Kapazitätsprobleme
- **Zukunftsweisende Transporttechnologien**  
→ **Trolleybussystem**



Busverkehr in Bogotá vor der Einführung des TransMilenio-Konzepts, [5]



Überlastung TransMilenio, [7]



## Simulation elektrischer Netze mit ortsveränderlichen Verbrauchern

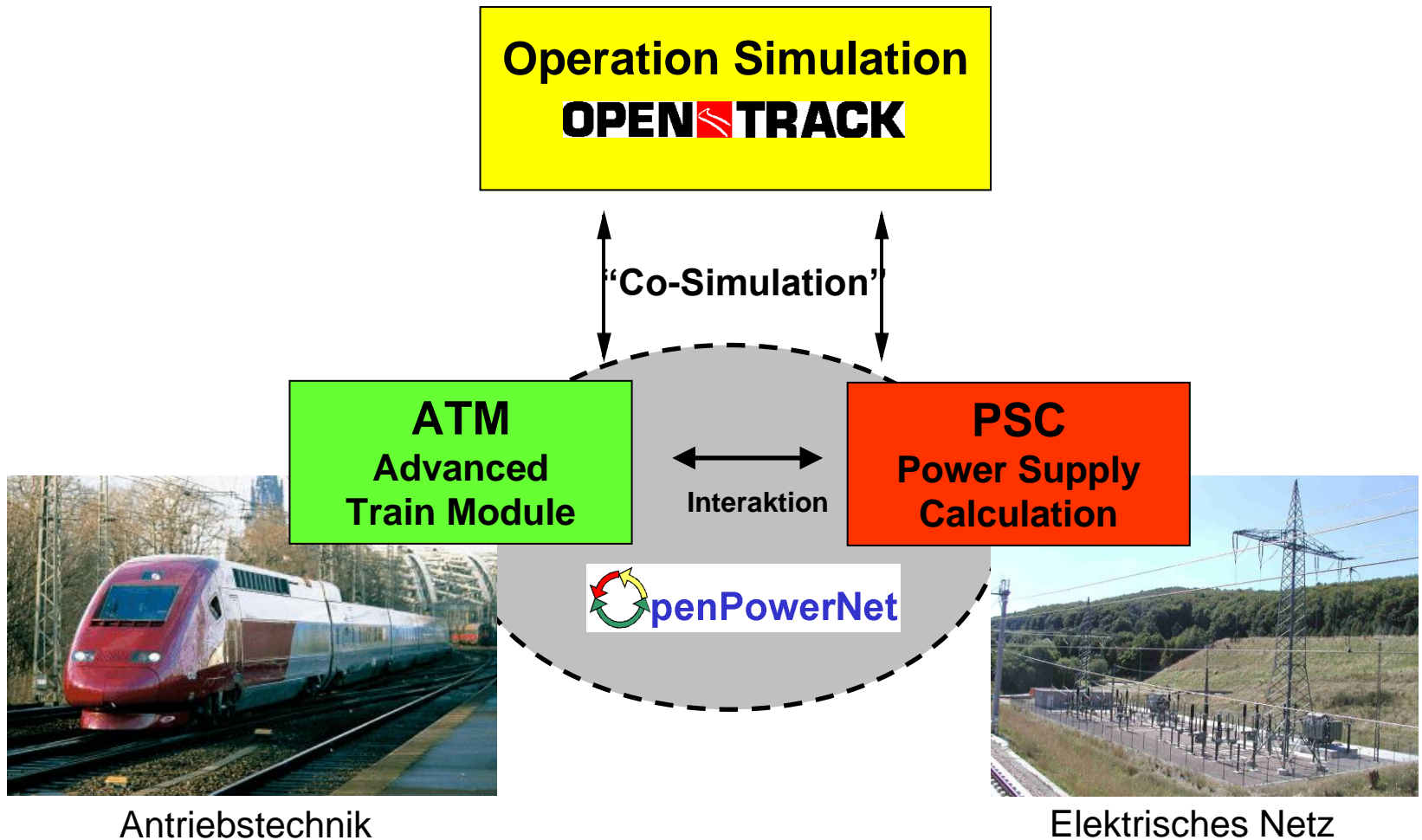
Die **Lastflüsse** und der elektrische **Energiebedarf** werden von Fahrzeugen und von der Gestaltung des elektrischen Netzes bestimmt:

- 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





Simulationsmodule der gekoppelten Online-Simulation



## Modellierung des Streckeninfrastruktur

- Aufbereitung der GPS-Daten
- 116 Stationen auf ca. 110 km
- Implementierung von Lichtsignalanlagen
- 11 Korridore werden zu 25 Hauptlinien kombiniert
- 100 Buslinien verkehren von 05:00 bis 23:00





## Modellierung der Fahrzeuge

- zwei Fahrzeugtypen
- Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramme
- Fahrwiderstandskurven
- weitere Parameter
  - Masse, Adhäsionsmasse
  - Massenfaktor
  - Länge, ...
- elektrische Parameter
  - Grundparameter
  - Antriebsstrang
  - Hilfsbetriebe



Doppelgelenktrolleybus

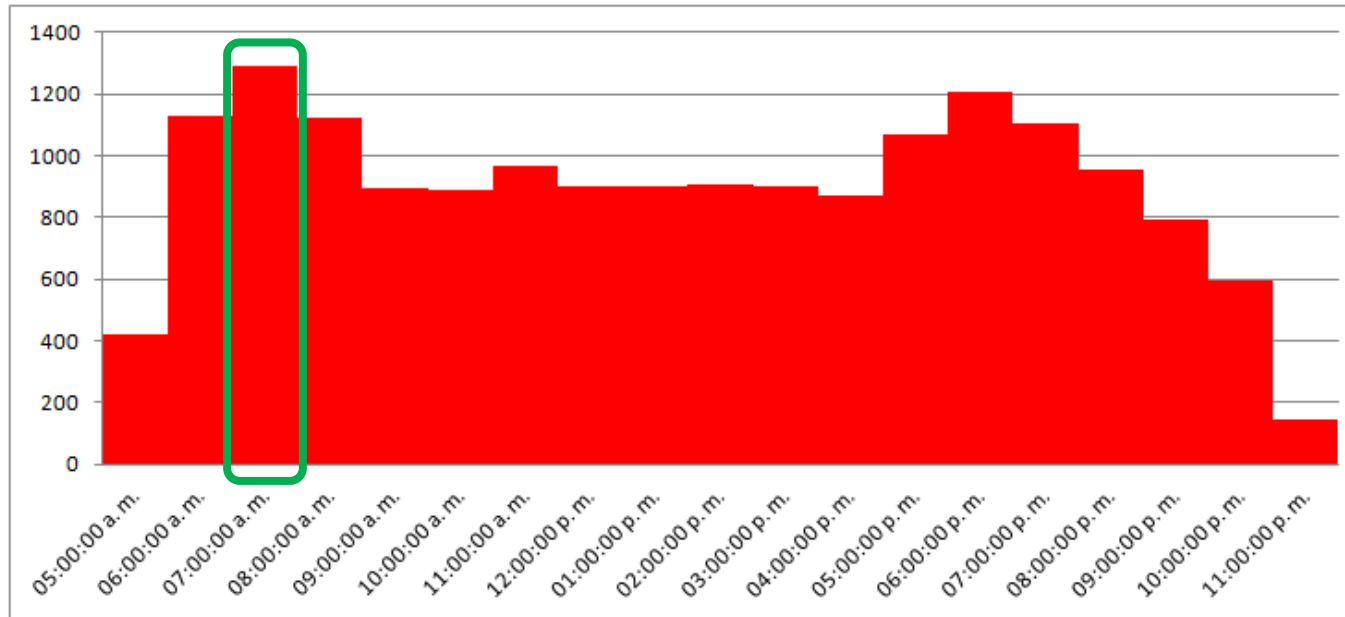


Gelenktrolleybus



## Modellierung des Fahrplans

- Betrieb der morgendlichen Spitzenstunde



Anzahl der Busse im Tagesverlauf, Quelle: Ausschreibungsunterlagen

- 67 Buslinien, ca. 1200 Bussen im Streckennetz



## Elektrische Infrastruktur

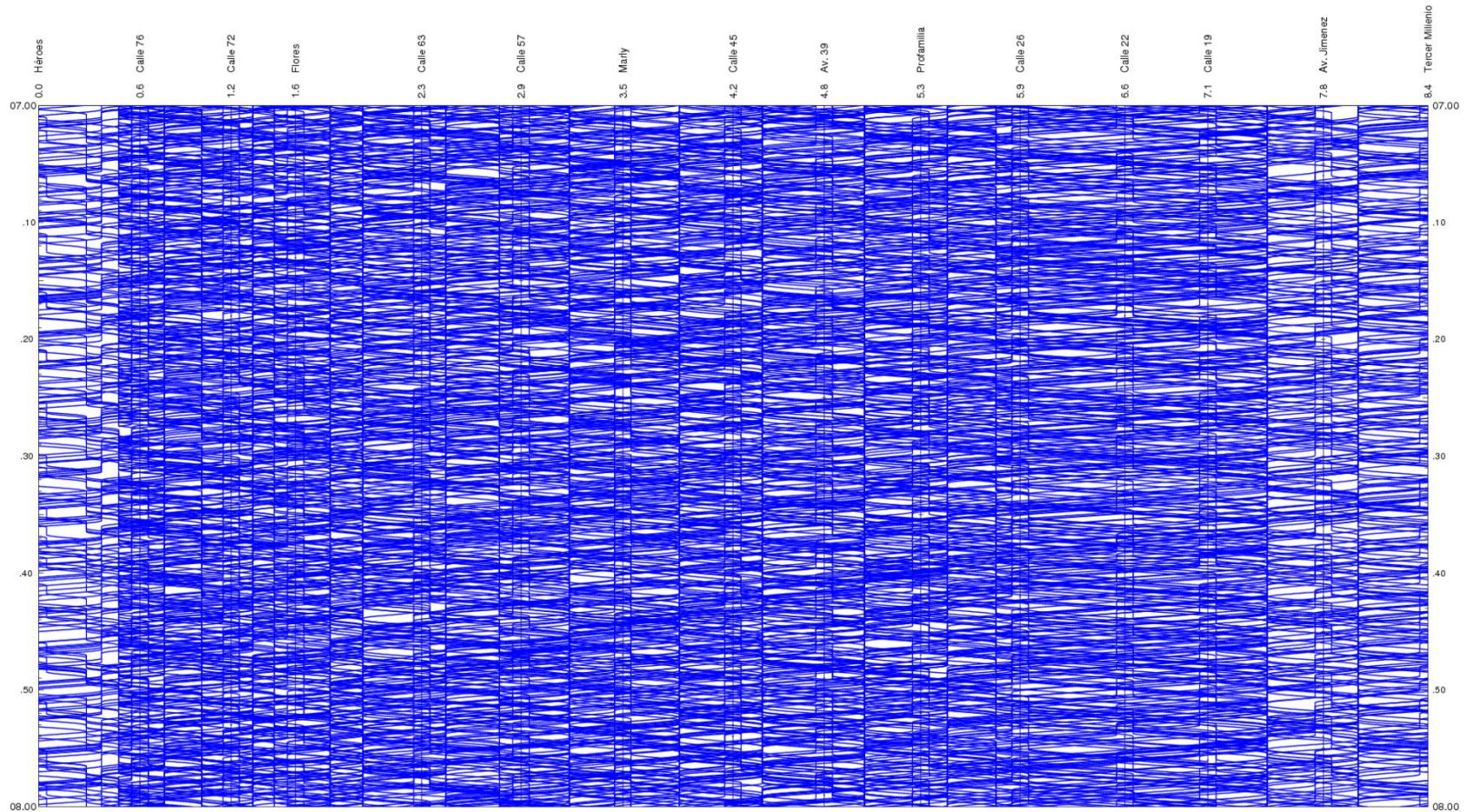
- Modellierung der elektrischen Infrastruktur für unterschiedliche Szenarien (Fahrzeugtyp, Fahrzeuganzahl/Elektrifizierungsgrad, mit und ohne Rekuperation)
- Umsetzung:
  - Festlegung des Spannungssystems
  - Festlegung der Speiseart
  - Bestimmung der Anzahl an Gleichrichterunterwerken (GUW)
  - optimale Positionierung der GUW
  - Nachweis Spannungshaltung
  - Bestimmung des Leistungs- und Energiebedarfs
  - Werte für Dimensionierung elektrischer Betriebsmittel
  - Bestimmung der Anzahl möglicher Trolleybusse
- Gekoppelte Betriebssimulation und elektrische Netzberechnung



# Auswahl einzelner Ergebnisse

## Bildfahrplan, Korridor A, 07:00-08:00

Héroes - Tercer Milenio Troncal A

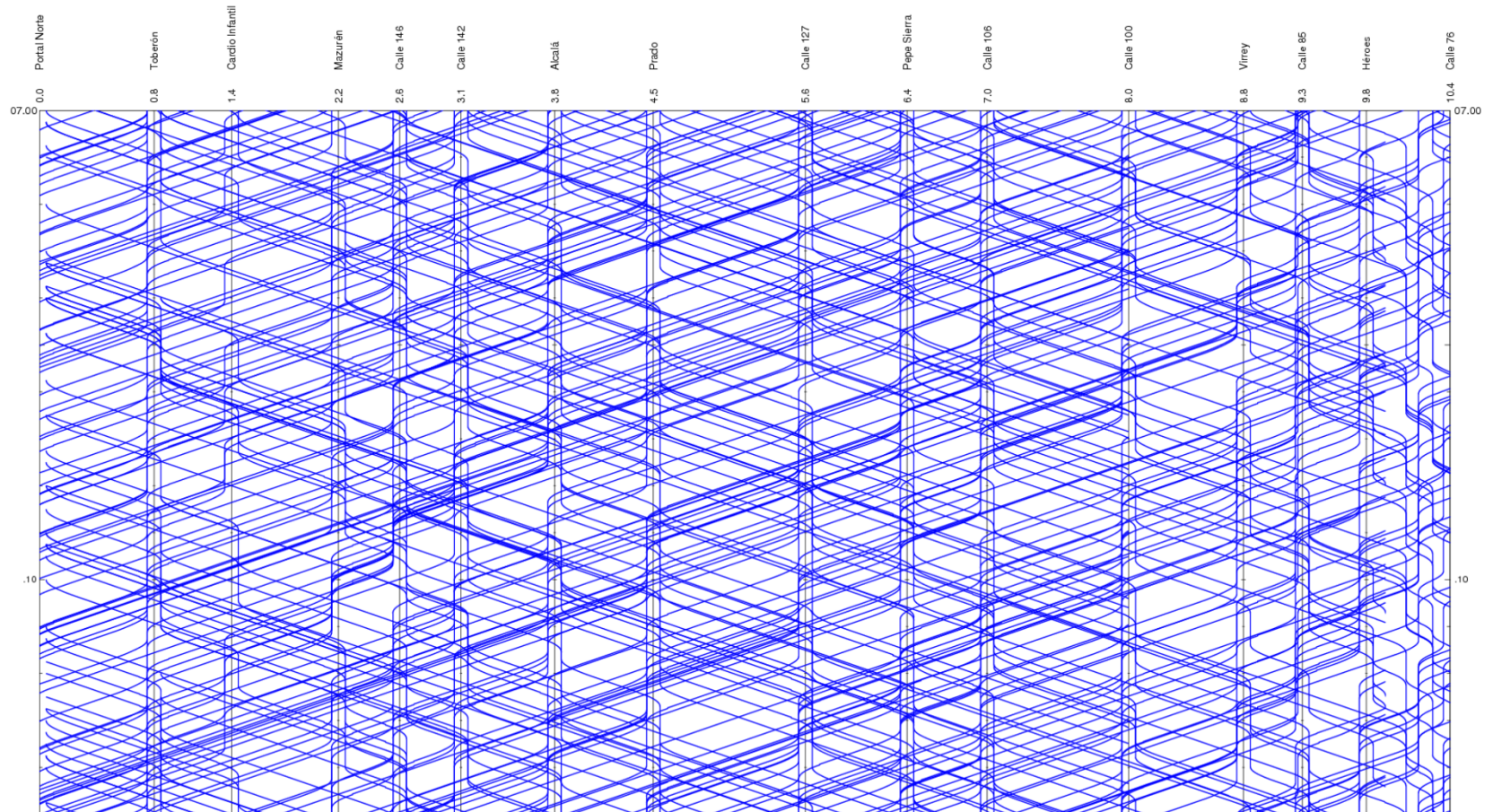




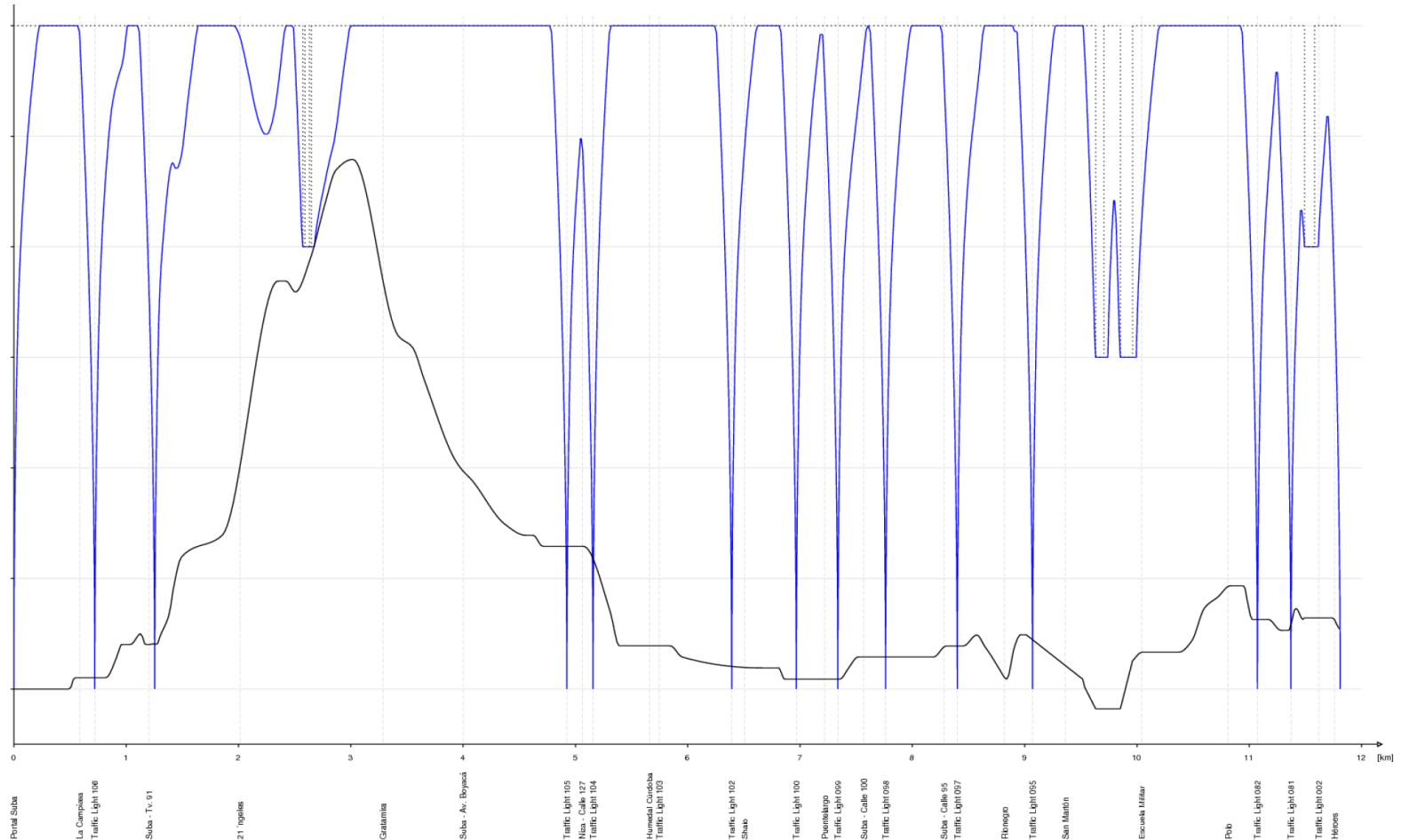
# Auswahl einzelner Ergebnisse

## Bildfahrplan, Korridor B, 07:00-07:15

Portal Norte - Calle 76 Troncal B

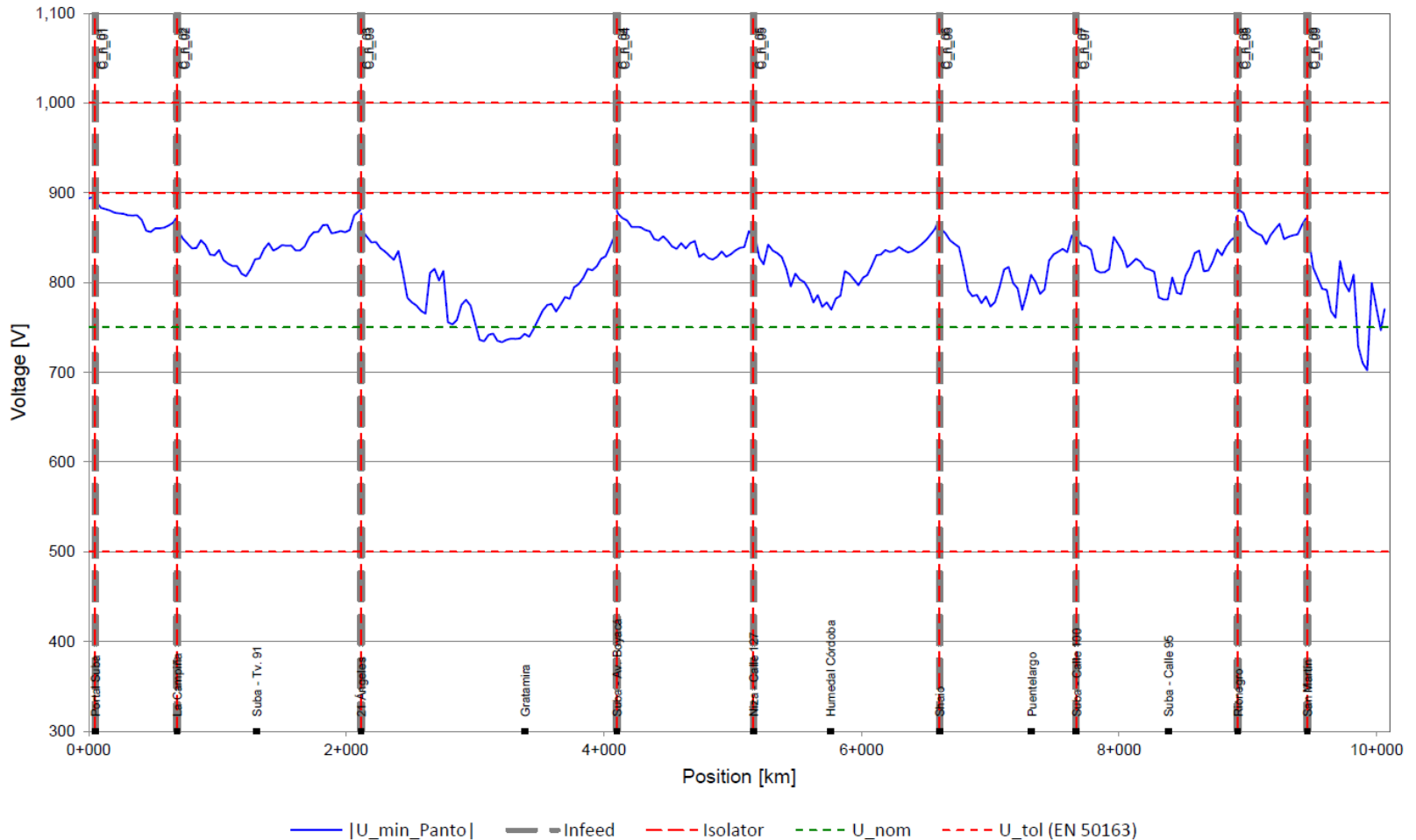






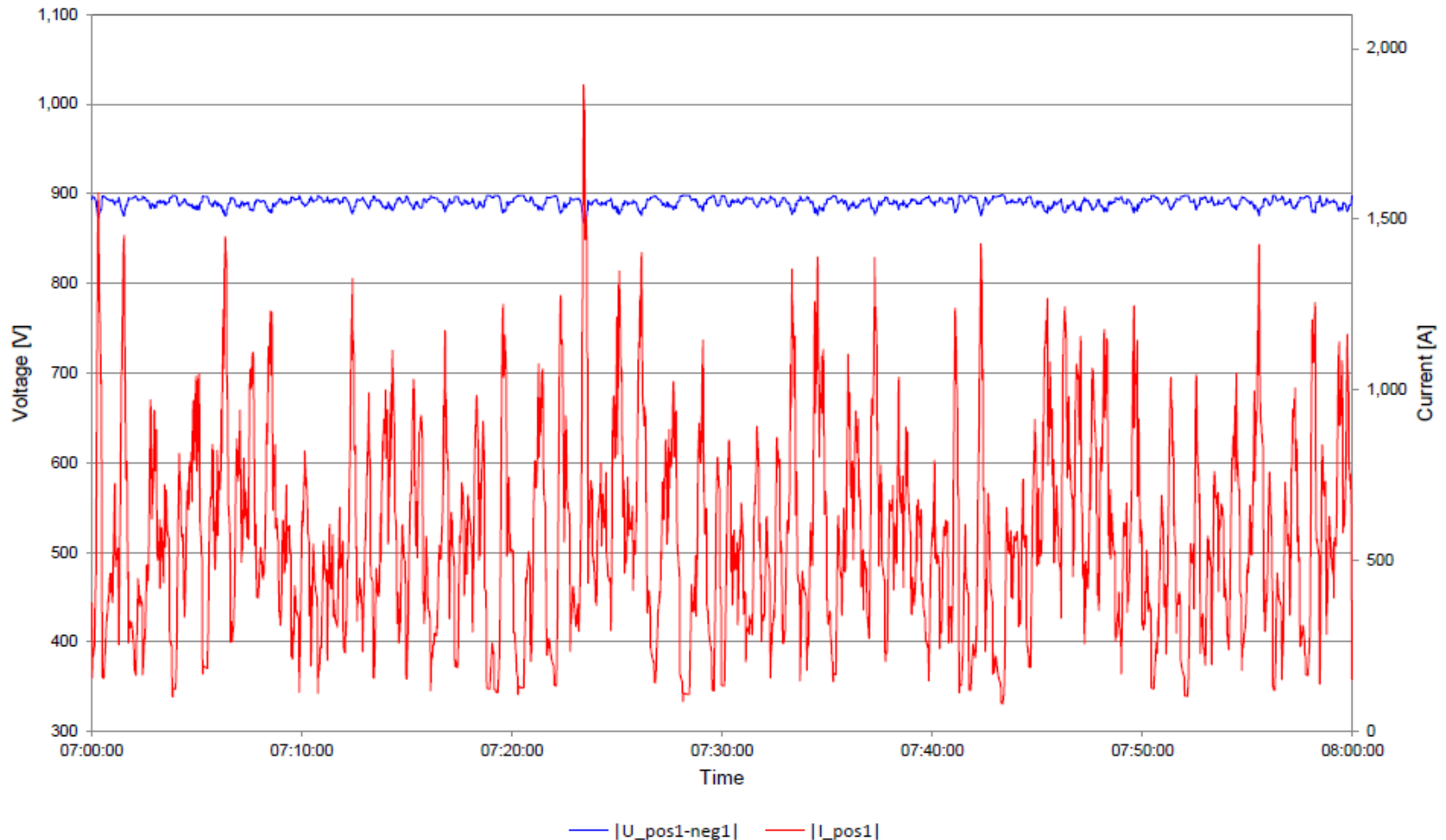
**Geschwindigkeits- (blau) und Höhenprofil (schwarz)**





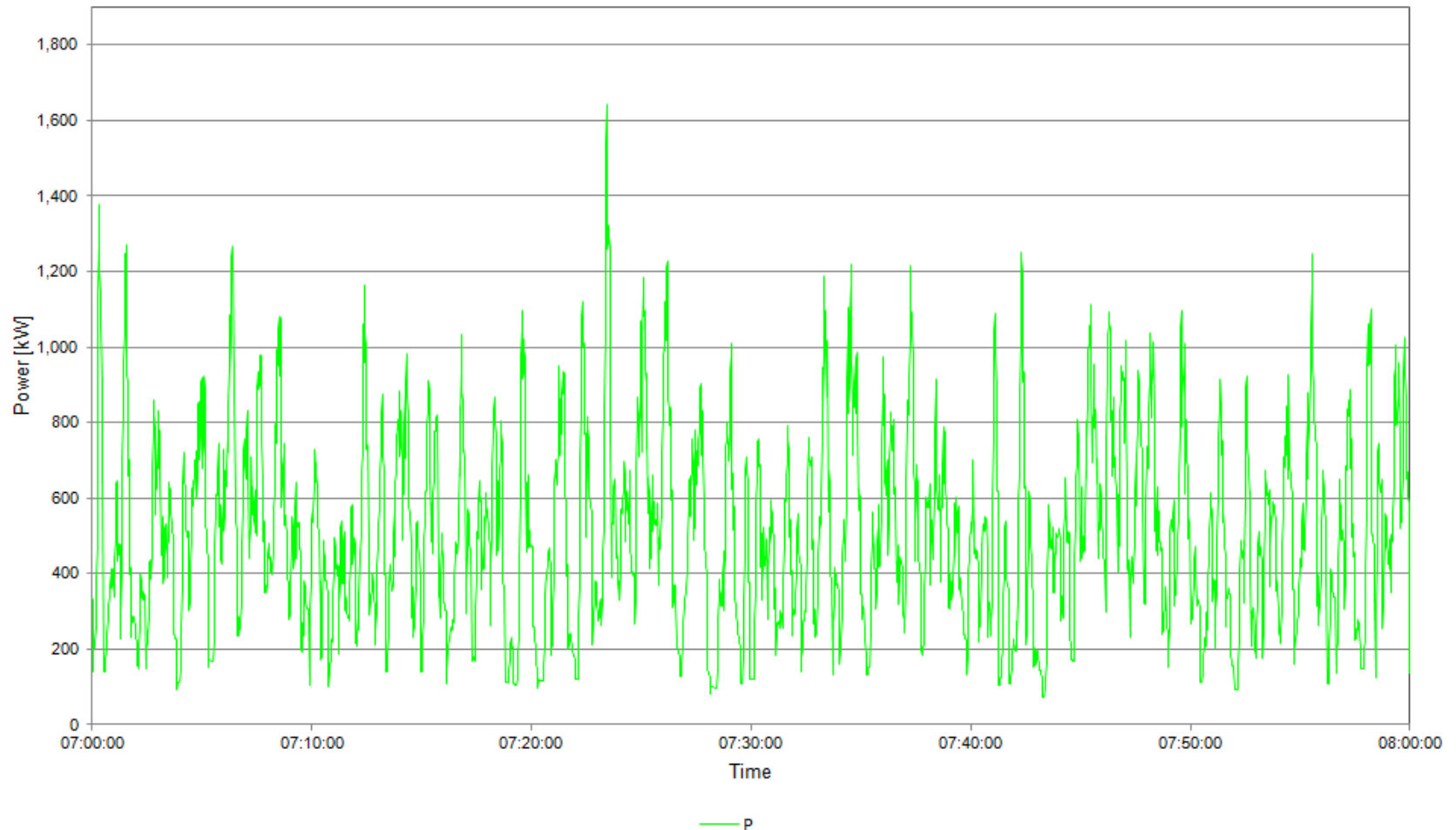
## Minimale Spannung am Stromabnehmer





**Strom und Spannungsverlauf an der Sammelschiene eines Unterwerks**





### Leistungsverlauf in einem Unterwerk



Substation	Device	Type	Signal	$I_{lmax}$ A	$I_{rms}$ A	$I_{rms15}$ A	$ S _{max}$ kVA	$ P _{max}$ kW	$ Q _{max}$ kvar	$P_{rms}$ kW	$P_{rms15}$ kW	E kWh	$E_{loss}$ kWh
A_n_04	rec_n1	Rec	total	1894	641	675	1644	1644	0	568	597	508	6.993
A_n_04	rec_n1	Rec	out	1894	641	675	1644	1644	0	568	597	508	6.993
A_n_04	rec_n1	Rec	in	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000
A_n_04	rec_n2	Rec	total	1129	333	369	995	995	0	297	328	243	1.887
A_n_04	rec_n2	Rec	out	1129	333	369	995	995	0	297	328	243	1.887
A_n_04	rec_n2	Rec	in	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000

### Übersicht elektrischer Größen im Unterwerk

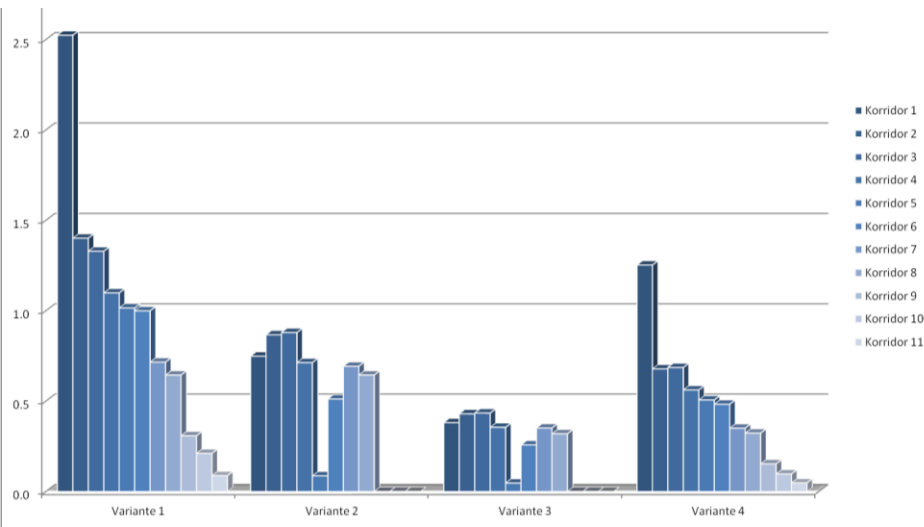
Substation	Busbar	Feeder	$I_{lmax}$ A	$I_{rms}$ A	$I_{rms15}$ A	$E_{loss}$ kWh
A_n_04	neg1		1894	641	675	-
A_n_04	neg1	rf_n1	1894	641	675	2.262
A_n_04	neg2		1129	333	369	-
A_n_04	neg2	rf_n2	1129	333	369	0.611
A_n_04	pos1		1894	641	675	-
A_n_04	pos1	f_n1	1894	641	675	2.262
A_n_04	pos2		1129	333	369	-
A_n_04	pos2	f_n2	1129	333	369	0.611

### Übersicht über elektrische Größen Sammelschiene und Kabel

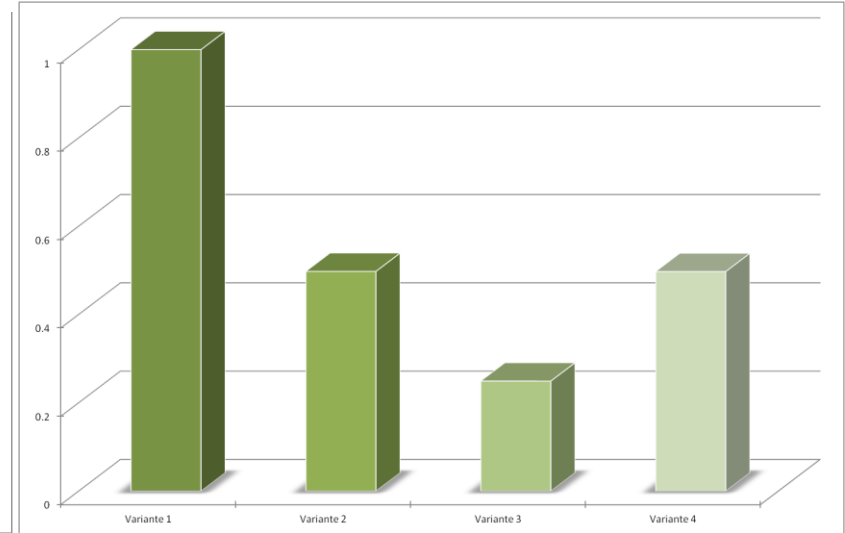
Course	Formation	TKT tkm	$E_{total}$ kWh	$E_{specific}$ Wh/tkm	$E_{consumed}$ kWh	$E_{recovered}$ kWh	$\eta_{regeneration}$ %	$E_{mech\_drive}$ kWh	$E_{mech\_brake\_req}$ kWh	$E_{mech\_brake\_ach}$ kWh	$\eta_{brake}$ %	$\eta_{brake\_net}$ %
C19a 7	Bogota Hess DGTB	279	21	75	38	17	45	26	30	23	75	57
C19a 9	Bogota Hess DGTB	134	8	61	16	8	49	11	13	10	77	58
C29 11	Bogota Hess DGTB	196	16	79	28	13	45	19	22	17	76	58
C29 13	Bogota Hess DGTB	278	20	70	36	16	46	25	27	22	79	60
C29 15	Bogota Hess DGTB	278	20	71	36	16	45	25	27	21	78	59
C29 17	Bogota Hess DGTB	278	19	69	36	17	47	25	27	22	80	61
C29 19	Bogota Hess DGTB	278	19	69	36	17	46	25	27	22	80	61
C29 21	Bogota Hess DGTB	278	20	71	36	16	45	25	27	21	79	60

### Übersicht fahrzeugspezifischer Werte





**Normierter korridorspezifischer Gesamtenergiebedarf für 4 Szenarien**



**Normierter Gesamtenergiebedarf für 4 Szenarien**

## Variantenspezifische Ergebnisse

- Übersichten mit Unterwerksstandorten
- Anzahl Unterwerke und Ausstattung
- Energiebedarf für einzelne Korridore und Gesamtnetz
- Anzahl Trolleybusse



- Machbarkeitsstudie zur Elektrifizierung des leistungsfähigsten BRT Systems der Welt
- Darstellung von Projekthintergründen
- Nutzung moderner und leistungsfähiger Simulationssoftware
- Einzelaspekte der Umsetzung
- Einzelergebnisse
- Auftraggeber wird Pläne konkretisieren und in weitere Planungsphasen übergehen
- Spezifischer Energiemix in Kolumbien ermöglicht durch Nutzung regenerativ erzeugter elektrischer Energie einen  
**nachhaltigen und leistungsfähigen öffentlichen Personennahverkehr**





# Vielen Dank!

**Dipl.-Ing. Sven Körner**

Tel.: +49 351 87759 – 52

Email: [sk@bahntechnik.de](mailto:sk@bahntechnik.de)

**Institut für Bahntechnik GmbH**

Niederlassung Dresden

Wiener Straße 114-116,

01219 Dresden

**[www.bahntechnik.de](http://www.bahntechnik.de)**

Tel.: +49 351 877 59 – 0

Fax: +49 351 877 59 – 90

Email: [ifb-dresden@bahntechnik.de](mailto:ifb-dresden@bahntechnik.de)

**[www.openpowernet.de](http://www.openpowernet.de)**



- [1] [www.OpenPowerNet.com](http://www.OpenPowerNet.com)
- [2] [www.OpenTrack.ch](http://www.OpenTrack.ch)
- [3] Stephan, A. (2008): *OpenPowerNet – Simulation of Railway Power Supply Systems*, Comrail, Toledo-Spanien, Wessex Institute of Technology.
- [4] Ufert, M., Körner, S. (11/2013): *Bahnbetriebssimulation mit online gekoppelter elektrischer Netzberechnung*, Verkehr und Technik, Erich Schmidt Verlag.
- [5] <http://mikesbogotablog.blogspot.de/2010/07/here-comes-sitp.html>, 07.01.2013
- [6] Dario Hidalgo (2008): *Why Is TransMilenio still so special?*, <http://thecityfix.com/blog/why-is-transmilenio-still-so-special/>, 07.01.2013, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/>
- [7] <http://www.desdeabajo.info/images/stories/bfebrero/masivo.jpg>, 07.01.2013