

# ***Lineare Booster-Konzepte für die elektrische Traktion***

***Andreas Binder***

*Martina Hofmann, Thomas Werle*

**Institut für Elektrische Energiewandlung  
Technische Universität Darmstadt**

**Landgraf-Georg-Straße 4  
64283 Darmstadt**

**Tel./Fax: 06151-16-2167/-6033**

**E-Mail: [abinder@ew.tu-darmstadt.de](mailto:abinder@ew.tu-darmstadt.de)**



Technische  
Universität  
Darmstadt

Institut für Elektrische Energiewandlung  
Prof. Dr.-Ing. habil. A. Binder  
FB 18 Elektrotechnik und Informationstechnik



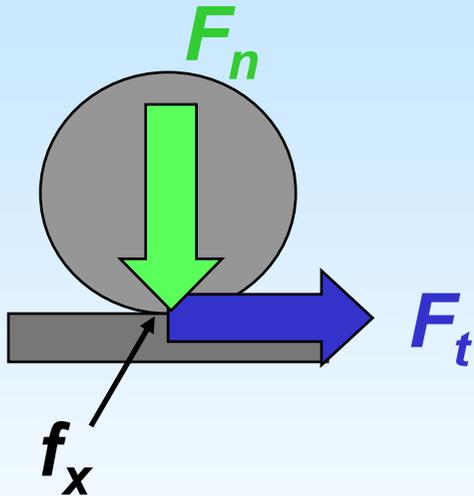
# ***Inhalt***

- **Zugkraftbildung, Witterungseinflüsse**
- **Möglichkeiten zur Schubkraftherhöhung („Booster“)**
- **Asynchronearmotor mit Schiene**
- **Asynchronearmotor mit Linearkäfig**
- **DC - Magnet**
- **Bewertung**
- **Zusammenfassung und Ausblick**



# Antriebskraft-Übertragung auf die Schiene

BR 152 Masse  $m = 86 \text{ t}$ ;  $86/4 \text{ t} = 21.5 \text{ t}$  pro Radsatz



$$F_n = \frac{86 \text{ t} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{4} = 211 \text{ kN}$$

Trockene Schiene  $f_x = 0.36$ :

$$F_t = F_n \cdot f_x = 0.36 \cdot 211 \text{ kN} = 75 \text{ kN}$$

$$F = 4 \cdot F_t = 4 \cdot 75 \text{ kN} = \underline{300 \text{ kN}}$$

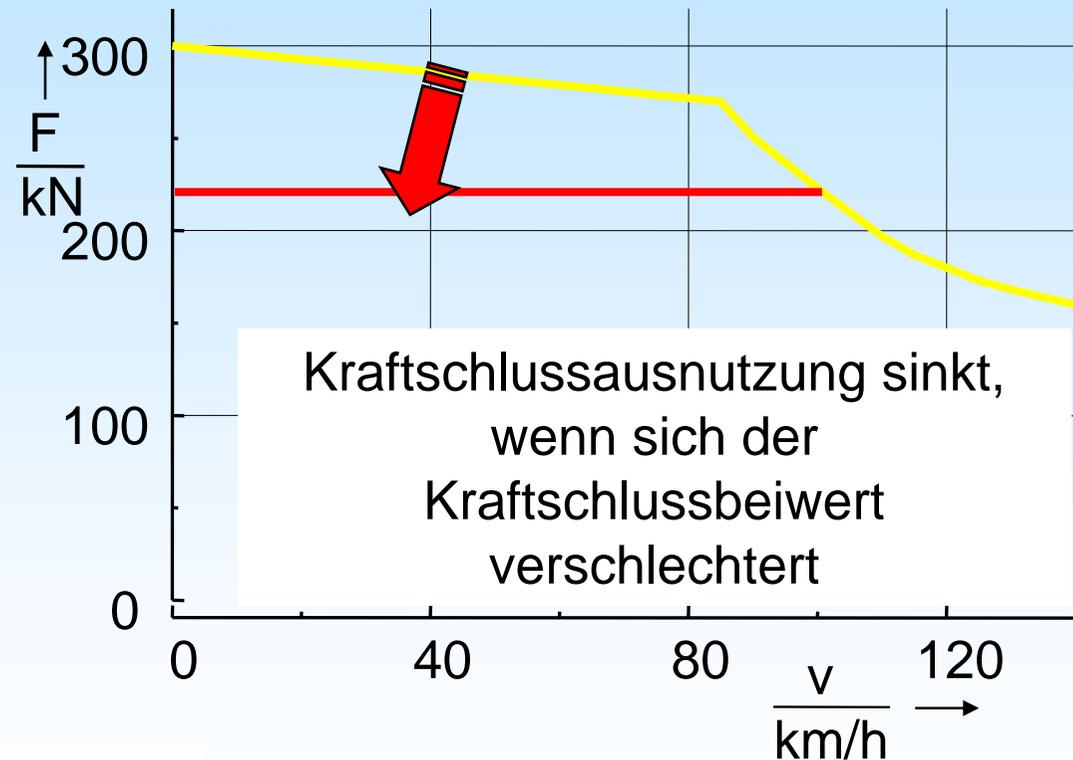
Nasse Schiene  $f_x = 0.25$ :

$$F_t = F_n \cdot f_x = 0.25 \cdot 211 \text{ kN} = 53 \text{ kN}$$

$$F = 4 \cdot F_t = 4 \cdot 53 \text{ kN} = \underline{212 \text{ kN}}$$



# Kraftschlussausnutzung bei schlechten Witterungsbedingungen



BR 152

Masse: 86 t

$F_{\max}$ : 300 kN

Mech. Leistung: 6.4 MW

$v_{\max}$ : 140 km/h

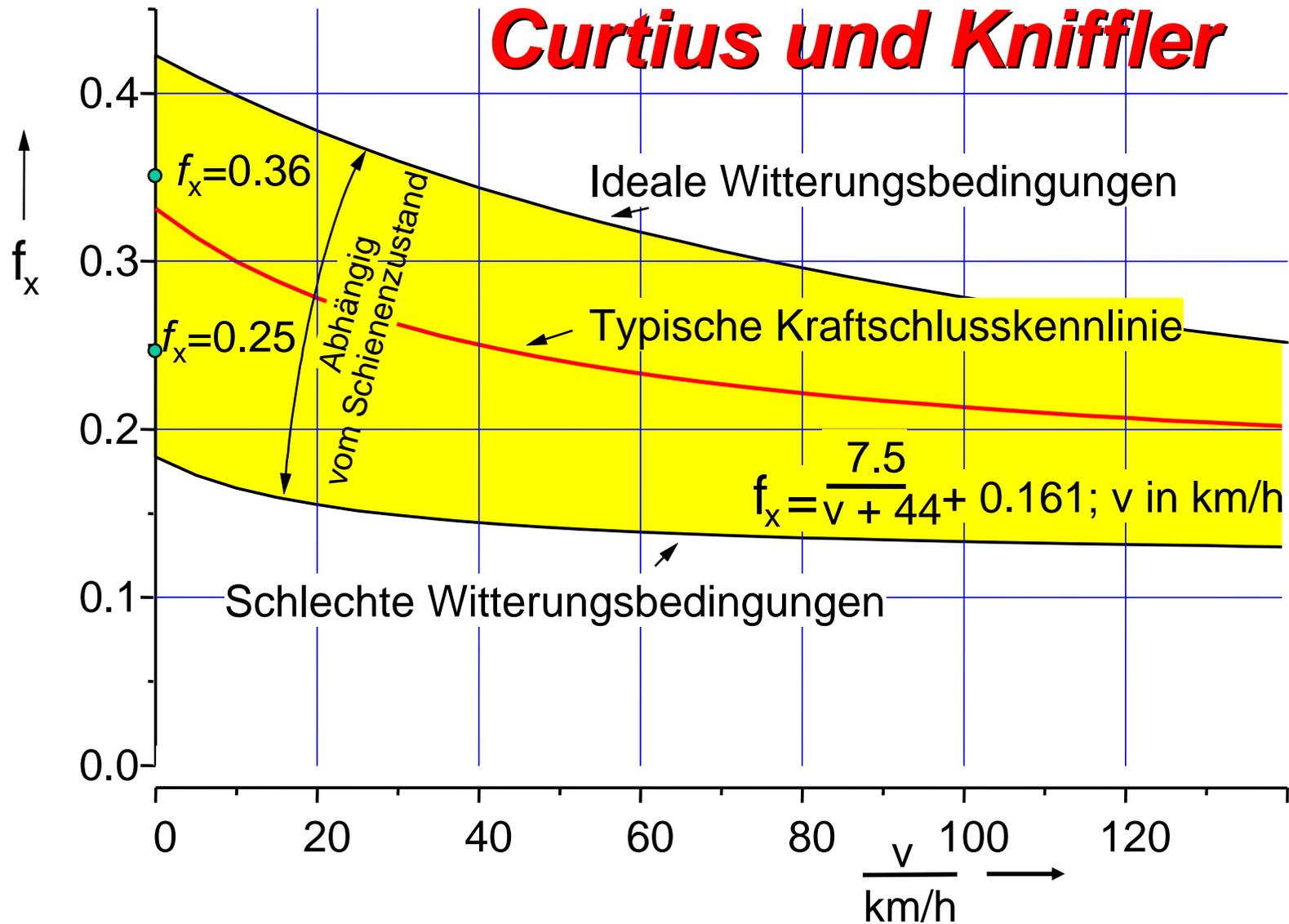


Technische  
Universität  
Darmstadt

Institut für Elektrische Energiewandlung  
Prof. Dr.-Ing. habil. A. Binder  
FB 18 Elektrotechnik und Informationstechnik



# Kraftschlussbeiwert nach Curtius und Kniffler

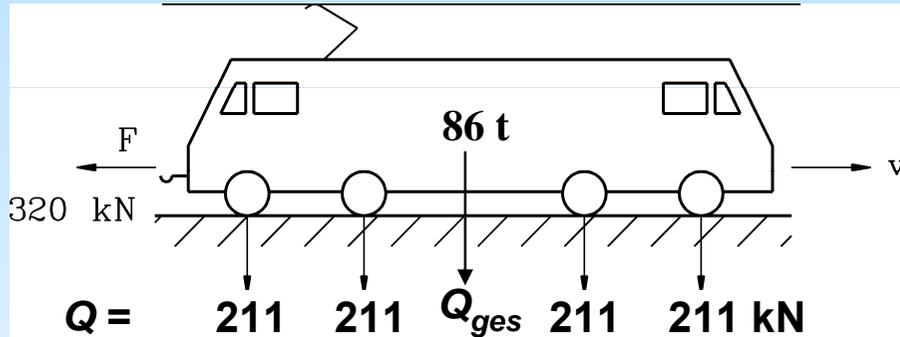


# **Verringerung des Witterungseinflusses auf die Schubkraftbildung**

- **Mehrere angetriebene Radsätze:**  
**Absenkung der Ausnutzung: Triebzugkonzept (ICE3)**
- **Linearmotor als Booster, Asynchronearmotor (ALIM)**  
**im Drehgestell:  $\Delta F_t$**
- **Künstliche Erhöhung der Radaufstandskraft**  
**um  $\Delta F_n$ : DC-Magnet**



# Vergleich Lokomotive - Triebzug



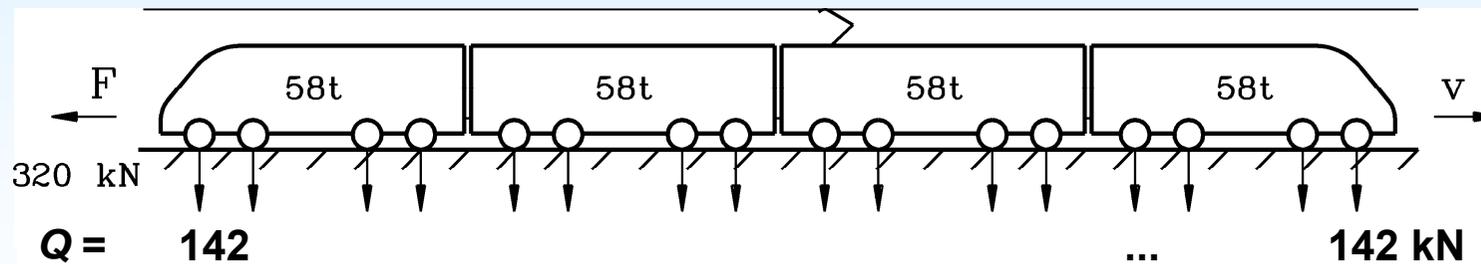
Lokomotive: Masse 86 t, 4 Achsen

$Q = 211$  kN/Achse,

$Q_{ges} = 4 \cdot 211 \text{ kN} = 844$  kN

**320 kN Zugkraft** nur möglich bei einem Kraftschlußbeiwert  $f_x = 0.38$

$F = f_x \cdot Q_{ges} = 0.38 \cdot 844 \text{ kN} = 320$  kN

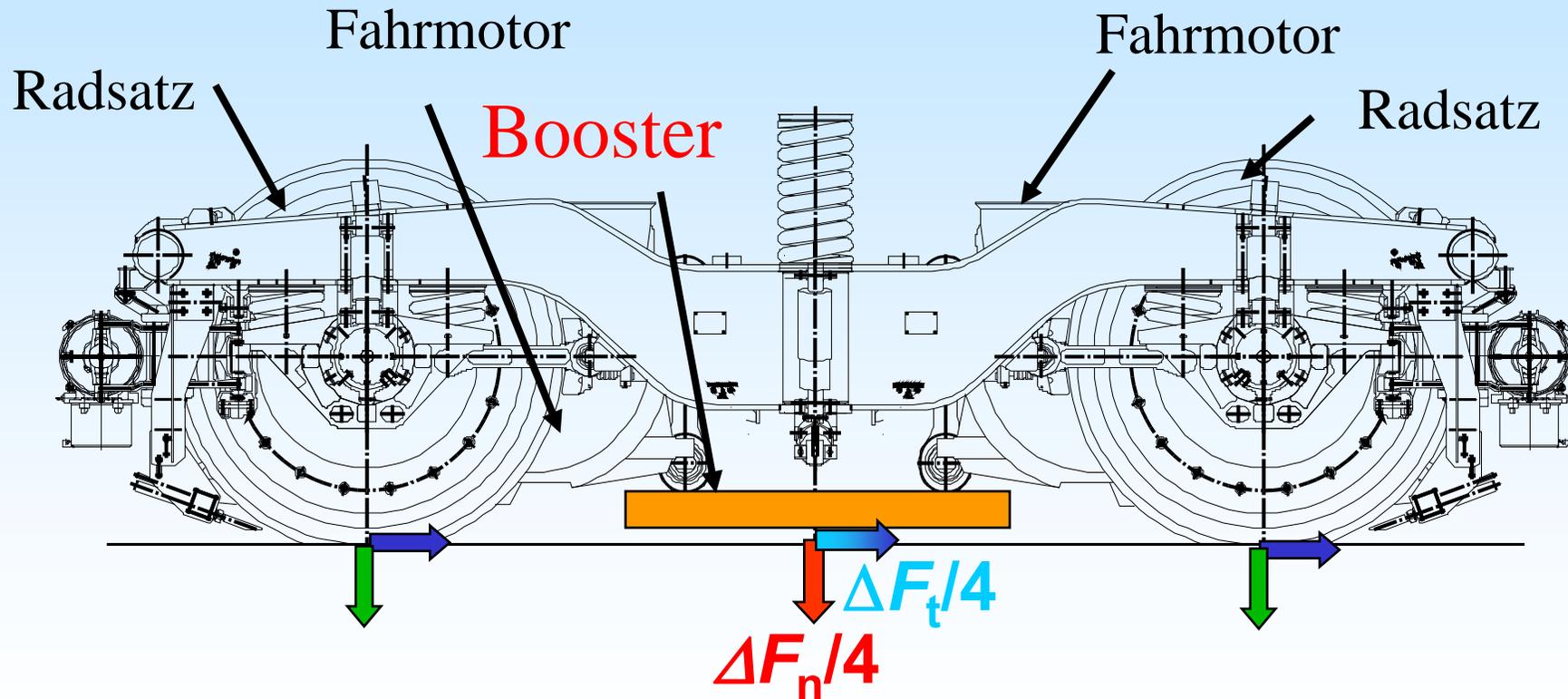


Triebzug: Masse 58 t je Wagen, 4 Achsen/Wagen,  $Q = 142$  kN/Achse, 16 Achsen

**320 kN Zugkraft** bereits bei  $f_x = 0.14$  möglich:  $F = f_x \cdot Q_{ges} = 0.14 \cdot 16 \cdot 142 \text{ kN} = 320$  kN



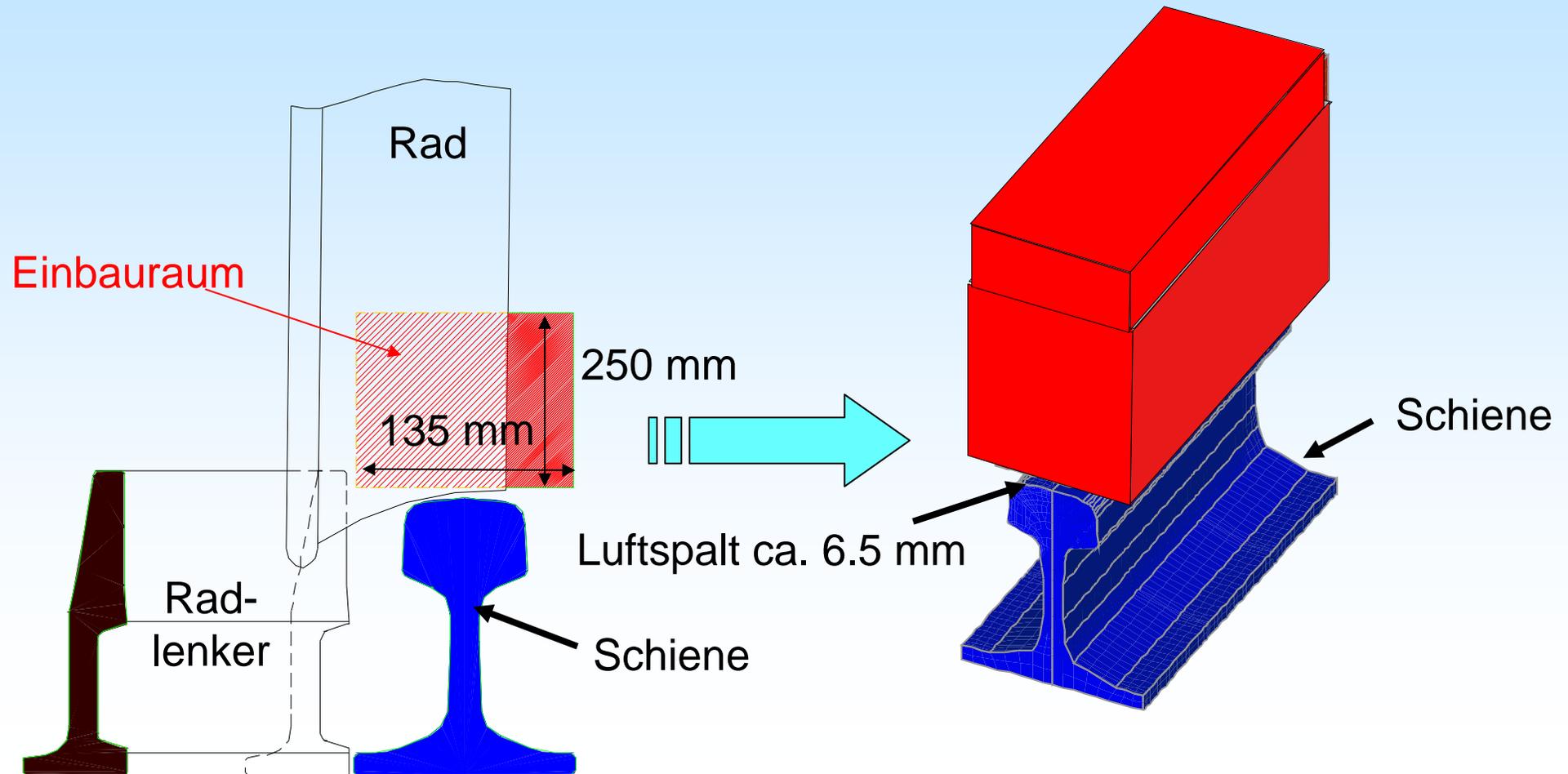
# Erhöhung der Zugkraft durch Linearmotor



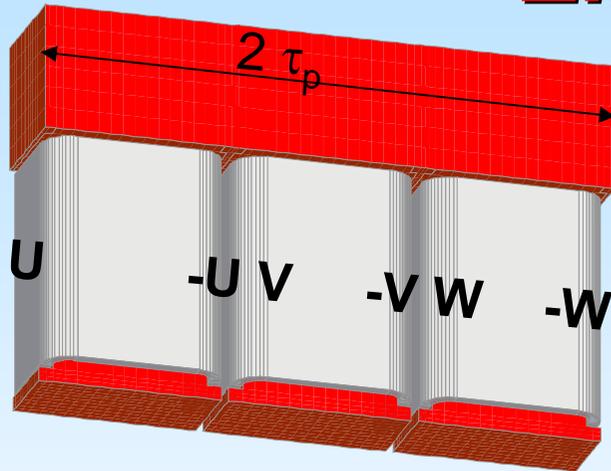
$$\text{Zugkraft: } F + F_{\text{Booster}} = (m \cdot g) \cdot f_x + \Delta F_n \cdot f_x + \Delta F_t$$



# Randbedingungen für den Einbau von Linearmotoren

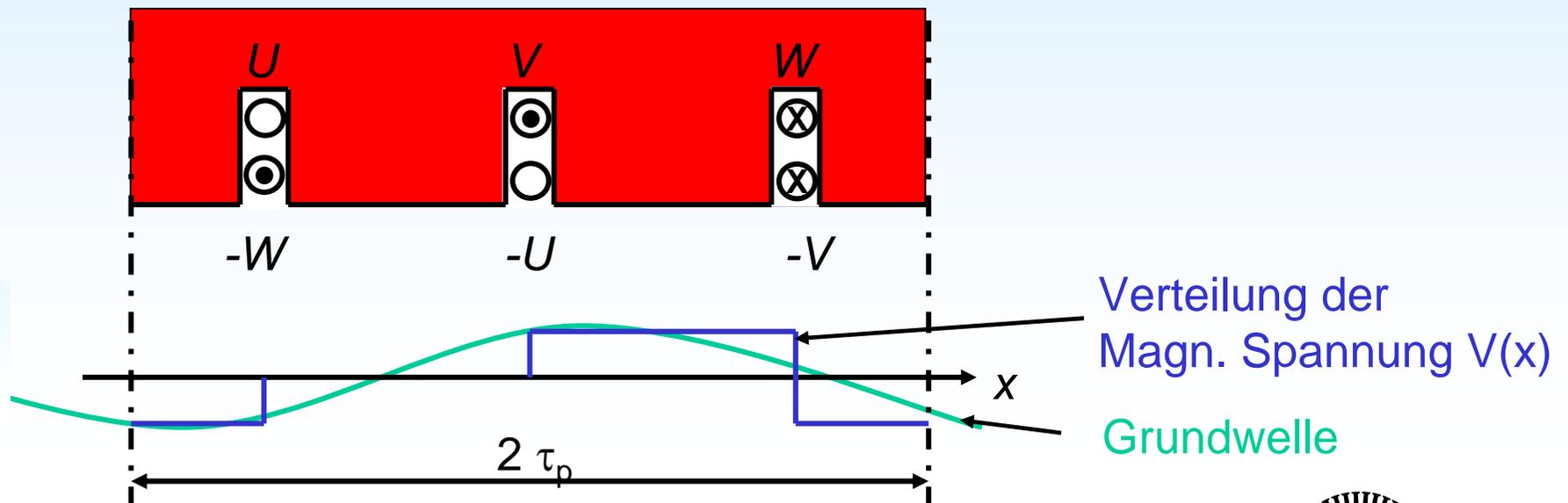


# Bruchlochwicklung für geringen Einbauraum

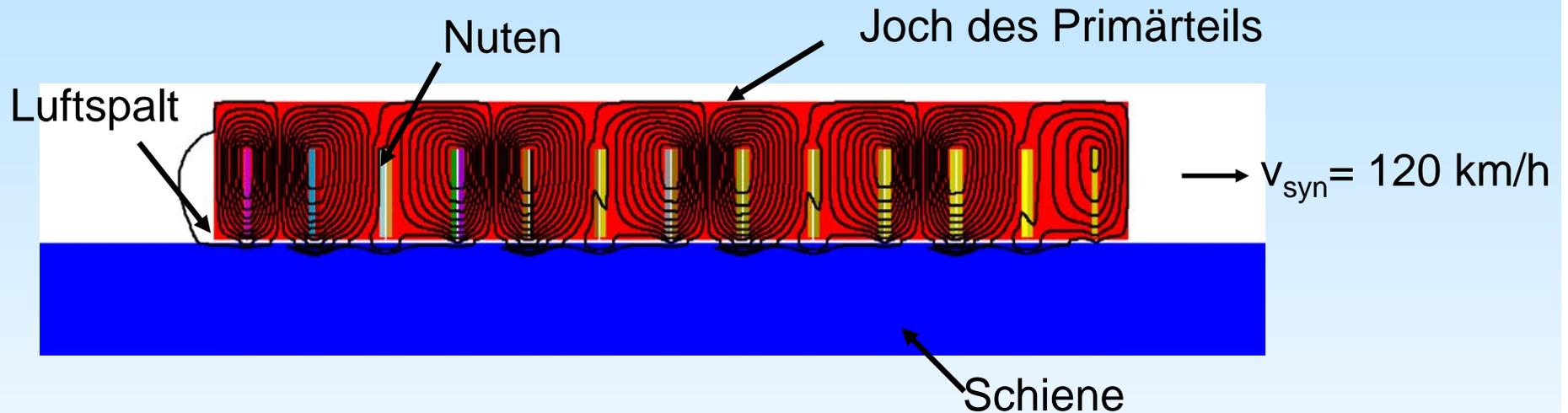


1/2 Nut je Pol und Strang

- + kurze Wickelkopfausladung
- + kein Überkreuzen der Stränge
- hoher Oberwellengehalt



# 2D Numerisches Modell der ALIM

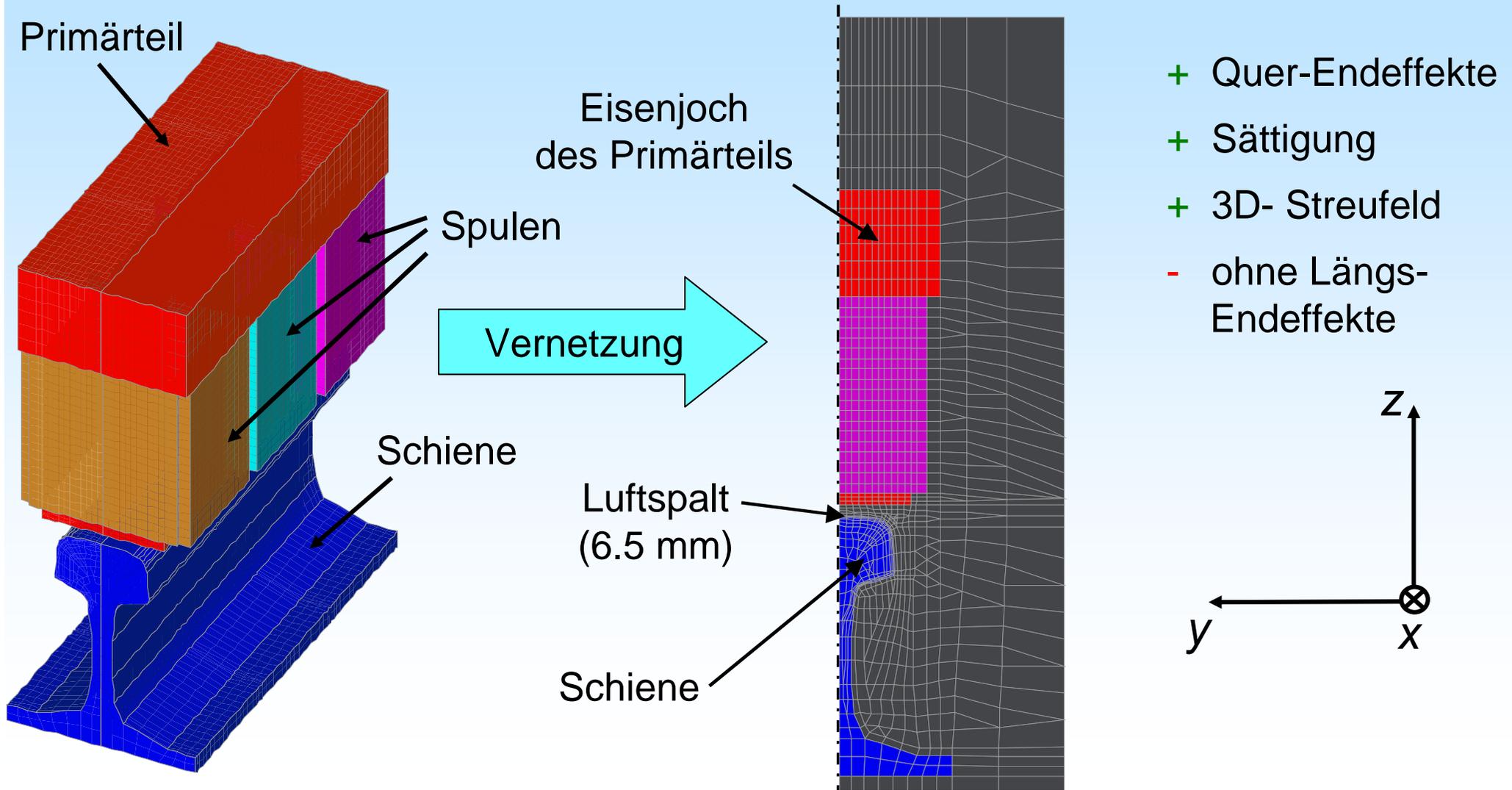


$f = 104 \text{ Hz}$ ;  $\tau_p = 160 \text{ mm}$ ;  $2p = 8$ ;  $\Theta = 22 \text{ kA}_{\text{rms}}$ ;  $\kappa = 5 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ ;  $\delta = 6.5 \text{ mm}$   
 $l = 1387 \text{ mm}$ ;  $q = 0.5$ ,  $\nu = 0$ ;  $F_t = 4 \text{ kN/m}$ ;  $F_n = 32 \text{ kN/m}$

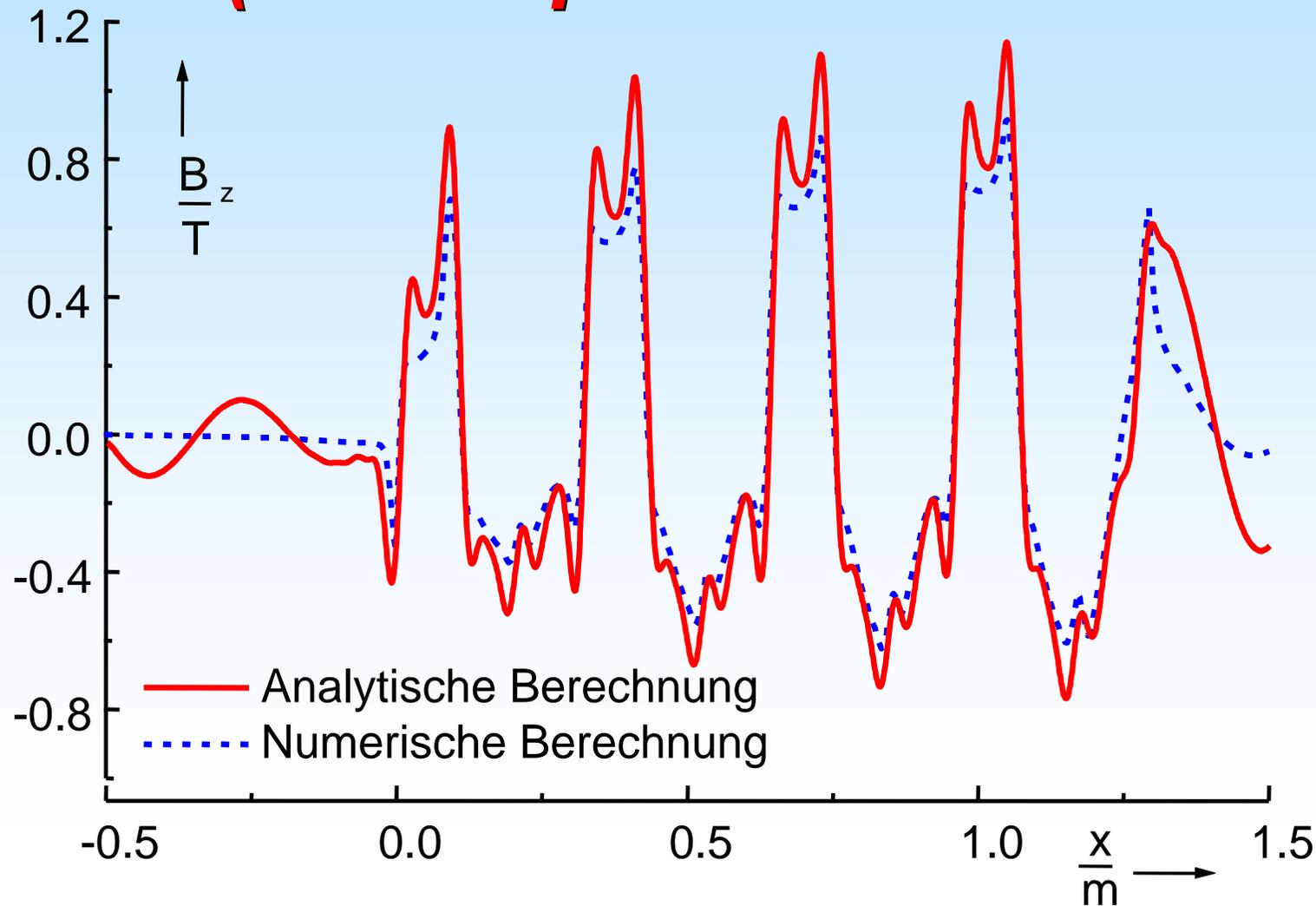
- + Längs-Endeffekte werden berücksichtigt
- + Sättigung geht in Rechnung ein
- Quer-Endeffekte werden nicht berücksichtigt



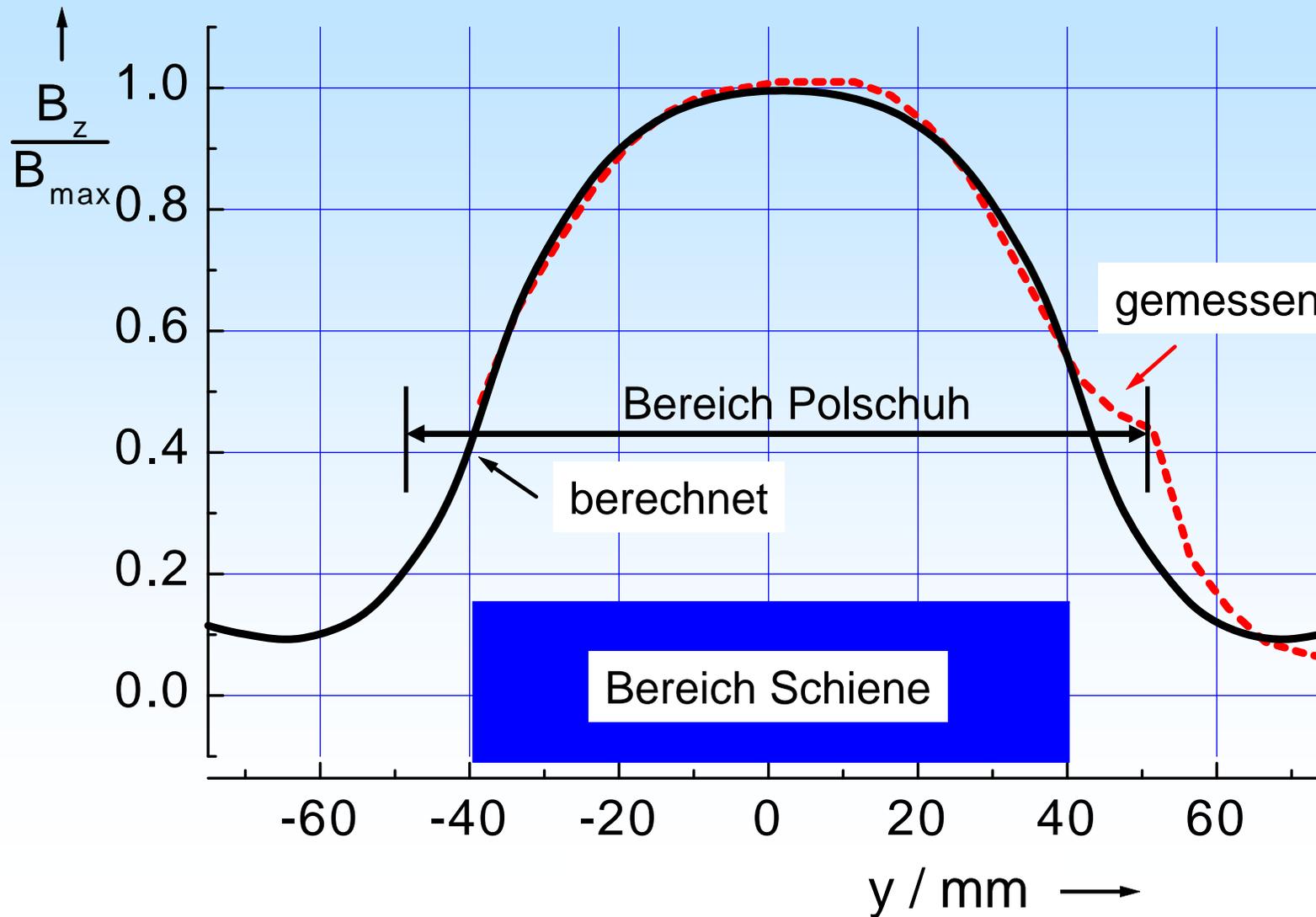
# 3D Numerisches Modell der ALIM



# Flussdichteverteilung in x - Richtung (z - Komponente in Schienenmitte)



# Flussdichteverteilung in $y$ - Richtung

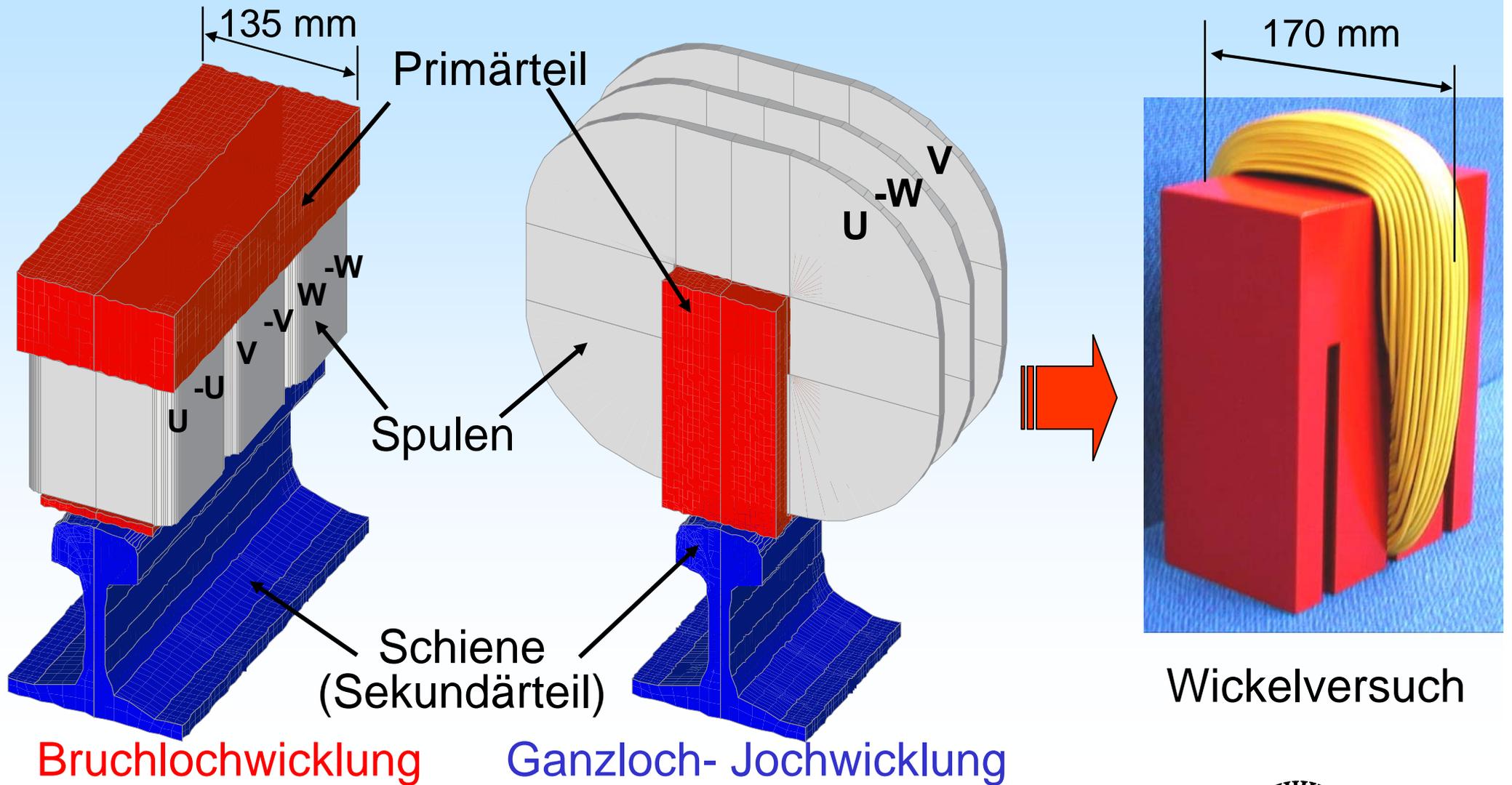


- Analytische Rechnung mit Formfunktion
- Messung mit Hallsonden

- $v = 0$
- $f = 0$
- Zahnmitte



# Bruchloch- und Ganzlochwicklung

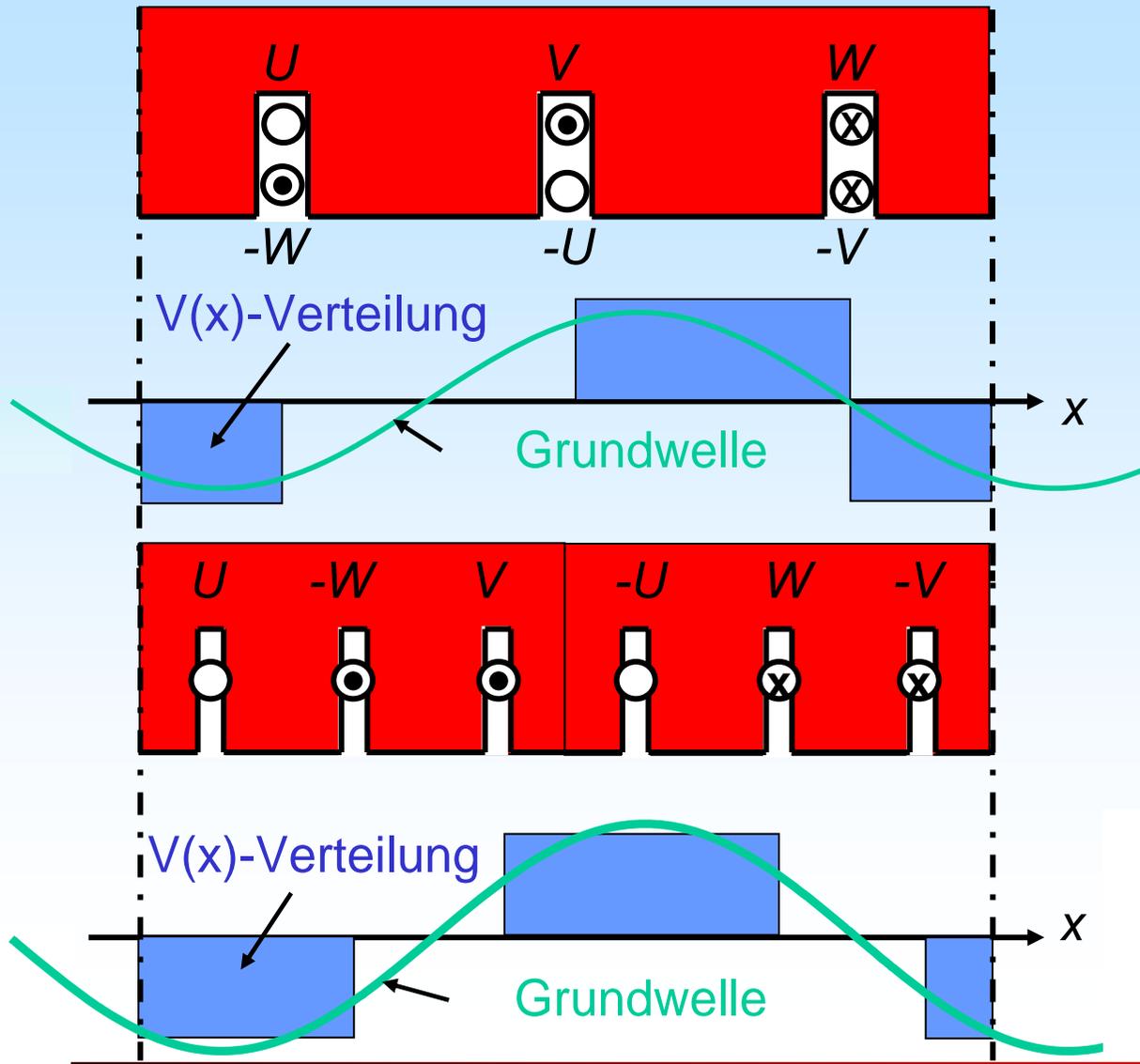


Bruchlochwicklung

Ganzloch- Jochwicklung



# Vergleich Bruchloch mit Ganzlochwicklung



## Bruchlochwicklung:

*1/2 Nut je Pol und Strang*

- + geringe Wickelkopfausladung
- + kein Überkreuzen der Stränge
- + einfache Herstellung
- hoher Oberwellengehalt

## Jochwicklung:

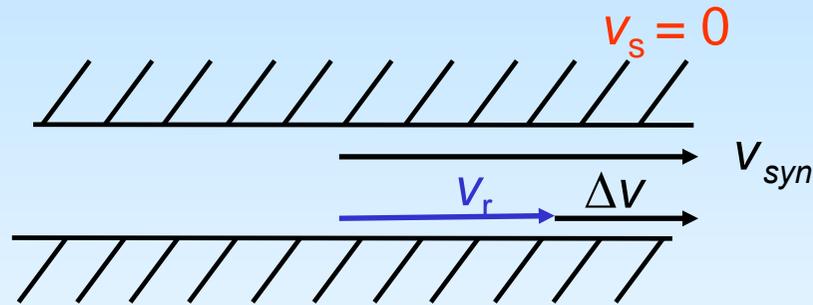
*1 Nut je Pol und Strang*

- + geringe Wickelkopfausladung
- + kein Überkreuzen der Stränge
- + geringer Oberwellengehalt
- aufwendige Herstellung



# Schlupfdefinition

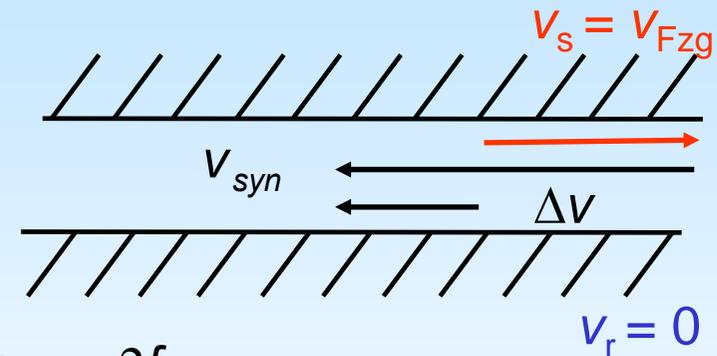
Konventionell rotierend



$$\Delta v = s \cdot v_{syn}$$

$$s = \frac{v_{syn} - v_r}{v_{syn}} = \frac{\Delta v}{v_{syn}}$$

Bewegter Linearmotor



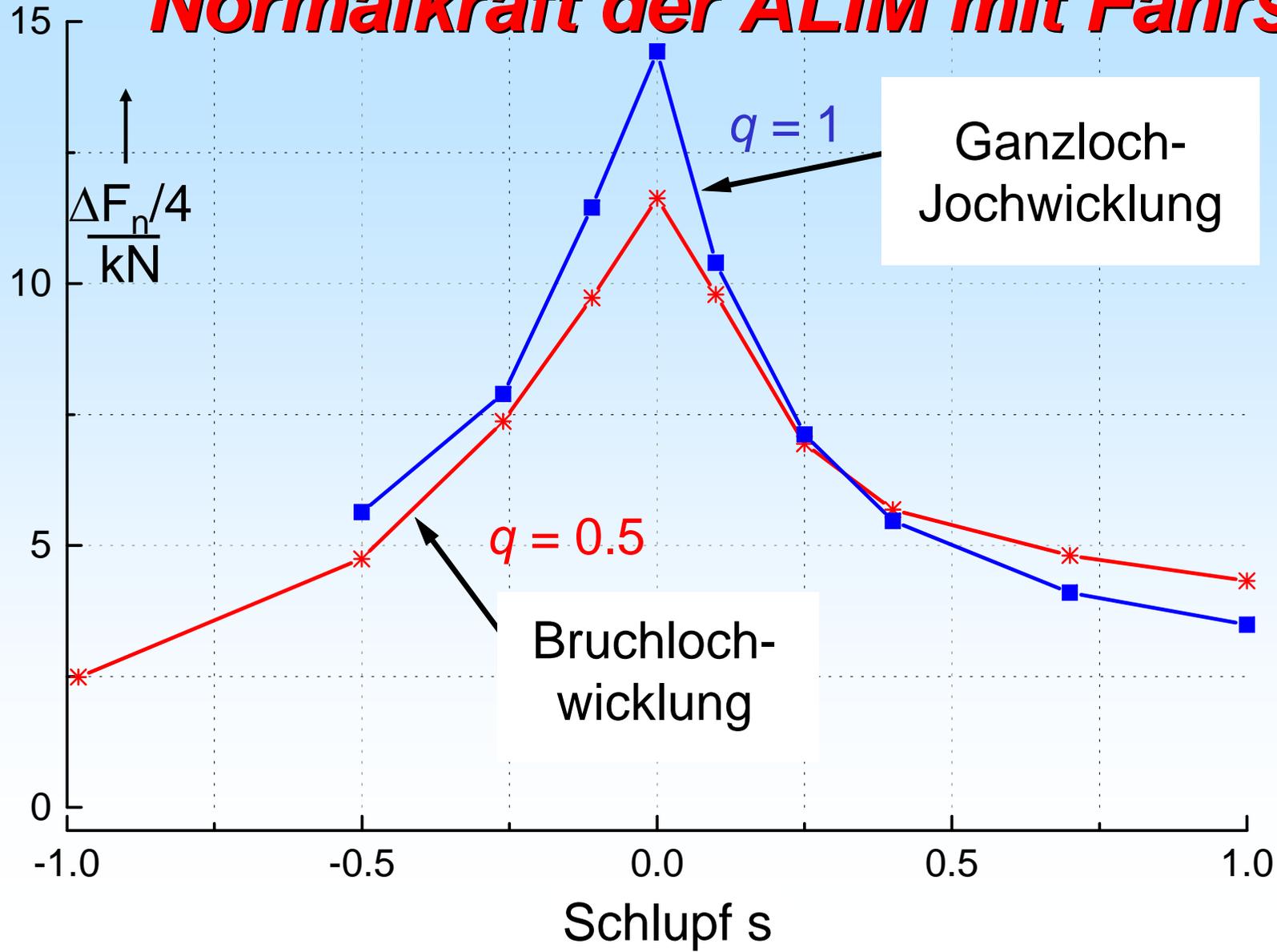
$$v_{syn} = 2f_s \tau_p$$

$$s = \frac{v_{syn} + v_{Fzg}}{v_{syn}} = \frac{\Delta v}{v_{syn}}$$

Beispiel:  $s = 0: v_{syn} = -v_{Fzg}$  : Schub Null  
 $s = 1: v_{Fzg} = 0$  : Anfahren



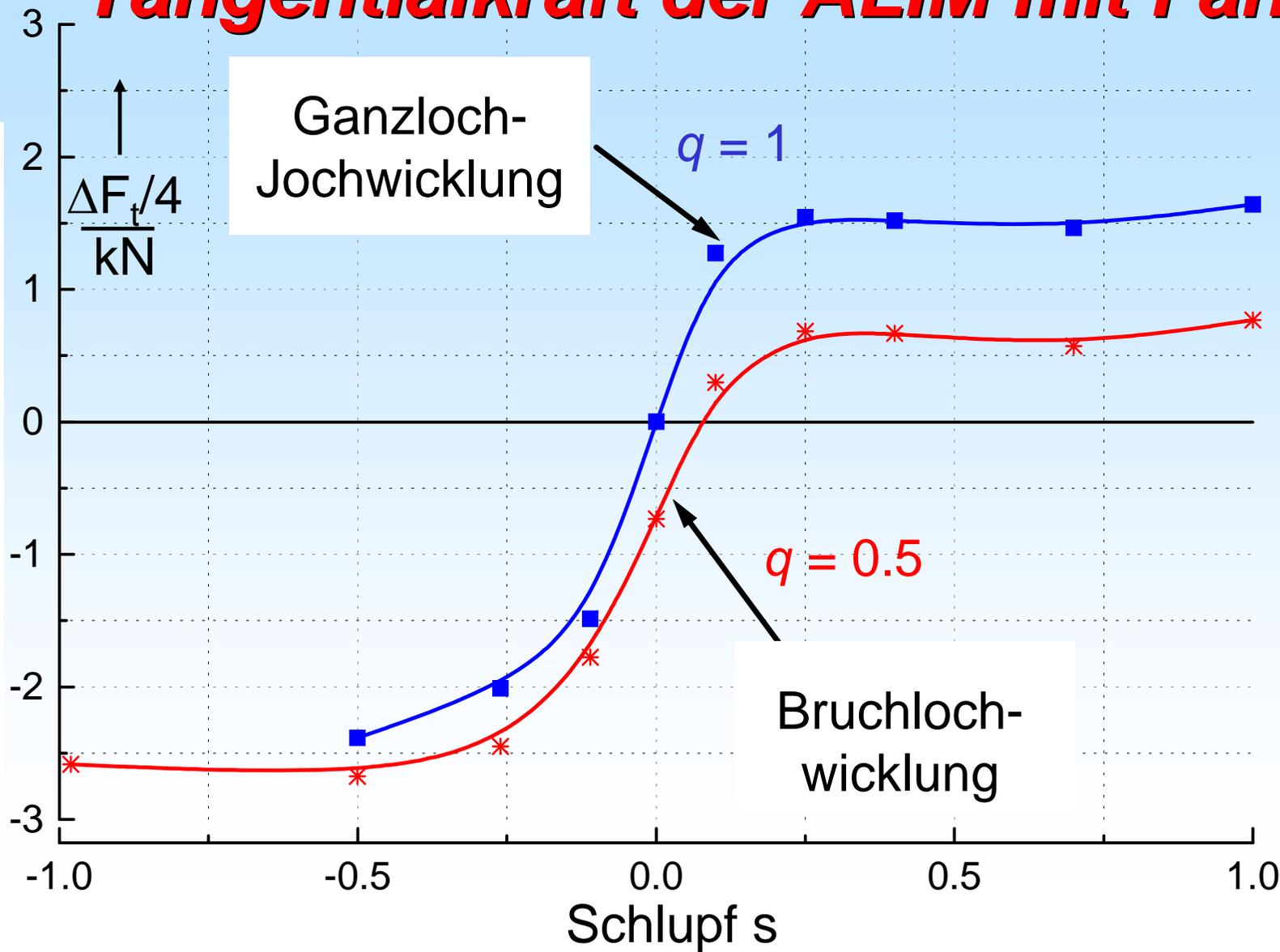
# Normalkraft der ALIM mit Fahrschiene



$f = 104.2 \text{ Hz}$   
 $A = 2000 \text{ A/cm}$   
 $J = 14.5 \text{ A/mm}^2$   
 (direkte Leiterkühlung)  
 $\tau_p = 159 \text{ mm}$   
 $\delta = 6.5 \text{ mm}$



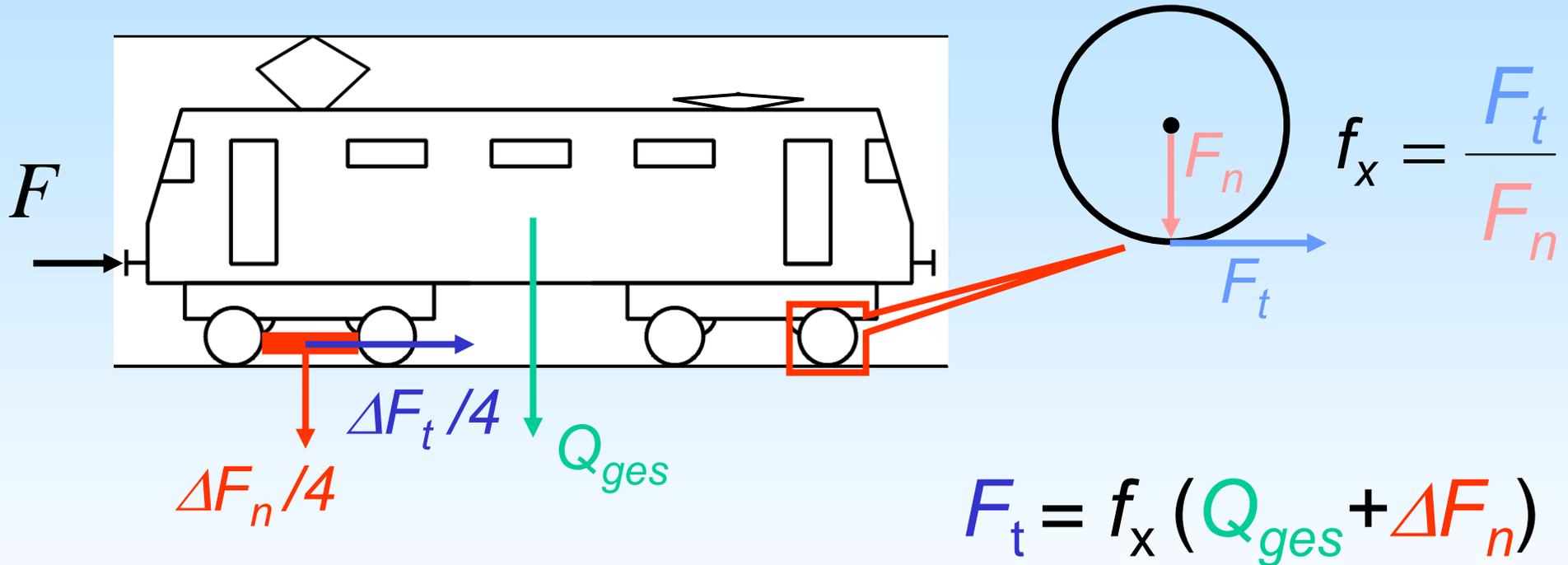
# Tangentialkraft der ALIM mit Fahrschiene



$f = 104.2$  Hz  
 $A = 2000$  A/cm  
 $J = 14.5$  A/mm<sup>2</sup>  
(direkte Leiterkühlung)  
 $\tau_p = 159$  mm  
 $\delta = 6.5$  mm



# Zugkraftbildung



$$F = (Q_{ges} + \Delta F_n) \cdot f_x + \Delta F_t$$

trockene Schiene:  $f_x = 0.36$

nasse Schiene:  $f_x = 0.25$



# Wirkung der ALIM mit normaler Fahrschiene

Gewichtskraft der Lokomotive:  $Q_{ges} = 844 \text{ kN}$   $f_x = 0.25$

Zugkraft ohne ALIM:  $Q_{ges} \cdot f_x = 211 \text{ kN}$

Erzeugte Kräfte einer ALIM:  $\Delta F_n / 4 = 10.4 \text{ kN}$   $\Delta F_t / 4 = 1.3 \text{ kN}$

Zugkraft mit 4 ALIMs pro Lokomotive:

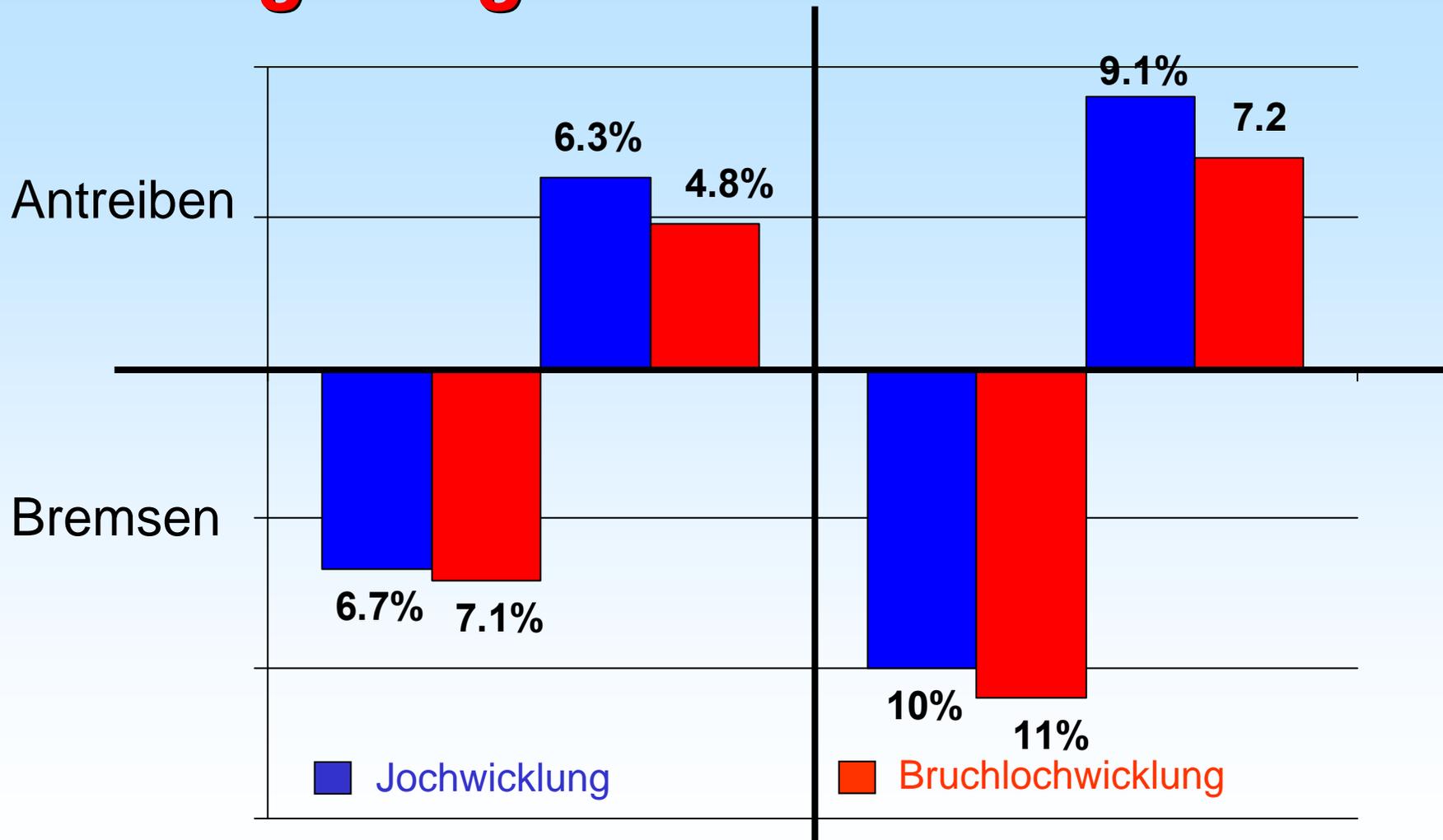
$$F = (844 \text{ kN} + 4 \cdot 10.4 \text{ kN}) \cdot 0.25 + 4 \cdot 1.3 \text{ kN} = 226.6 \text{ kN}$$

Erhöhte Zugkraft:

$$\Delta F = \frac{226.6}{211} - 1 = 7.4 \%$$



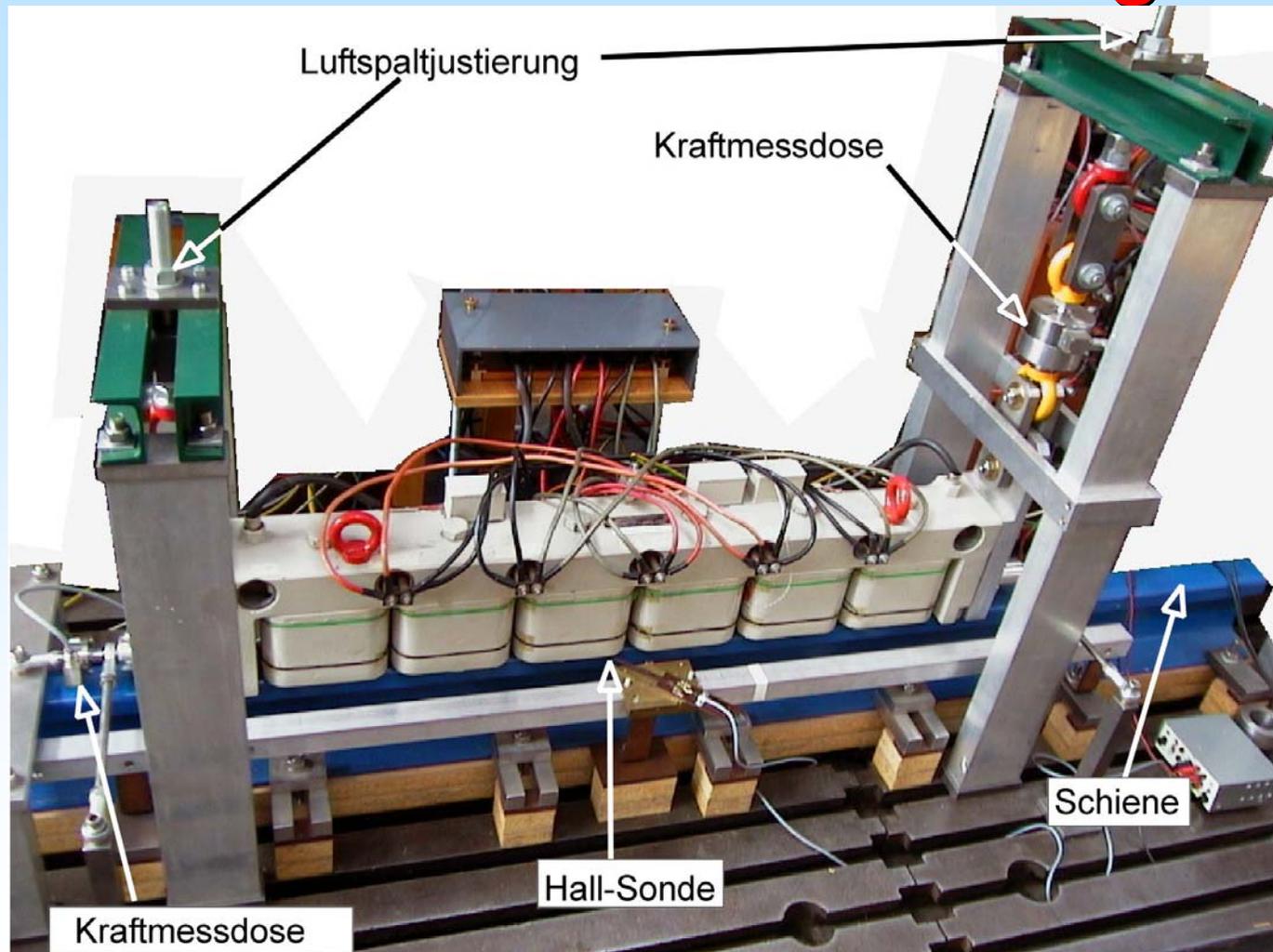
# Zugkraftgewinn der ALIM-Varianten



trockene Schiene,  $f_x = 0.36$     nasse Schiene,  $f_x = 0.25$



# Messaufbau: Kraftmessung am Linearmotor



$q = 0.5$   
Sinusspeisung  
 $2p = 4$

Umbau einer 6-poligen Wirbelstrombremse zur Asynchronlinearmaschine



# Leistungen

Bruchlochwicklung,  $q = 1/2$

Schlupf  $s = 0.1$

Fahrzeuggeschw.  $v = 30$  m/s

$\Delta F_t = 0.3$  kN,  $\Delta F_n = 9.8$  kN

$P_\delta = 49$  kW,

$P_m = \Delta F_t \cdot v = 9$  kW

$Q = 1.056$  MVar

$P_{cu} = 44$  kW

$P_e \approx P_\delta + P_{cu} = 93$  kW

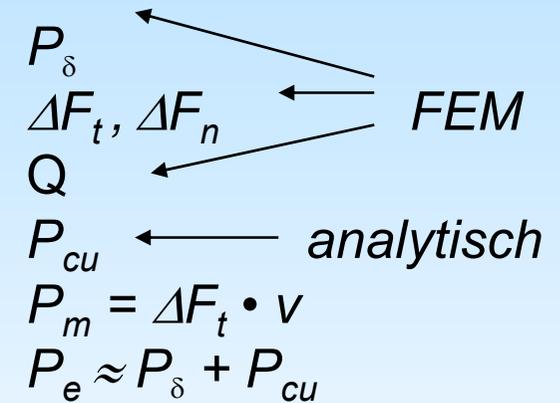
$\cos \phi = 0.09$

$P_\delta$	FEM
$\Delta F_t, \Delta F_n$	FEM
$Q$	FEM
$P_{cu}$	analytisch
$P_m = \Delta F_t \cdot v$	analytisch
$P_e \approx P_\delta + P_{cu}$	analytisch



# Leistungen

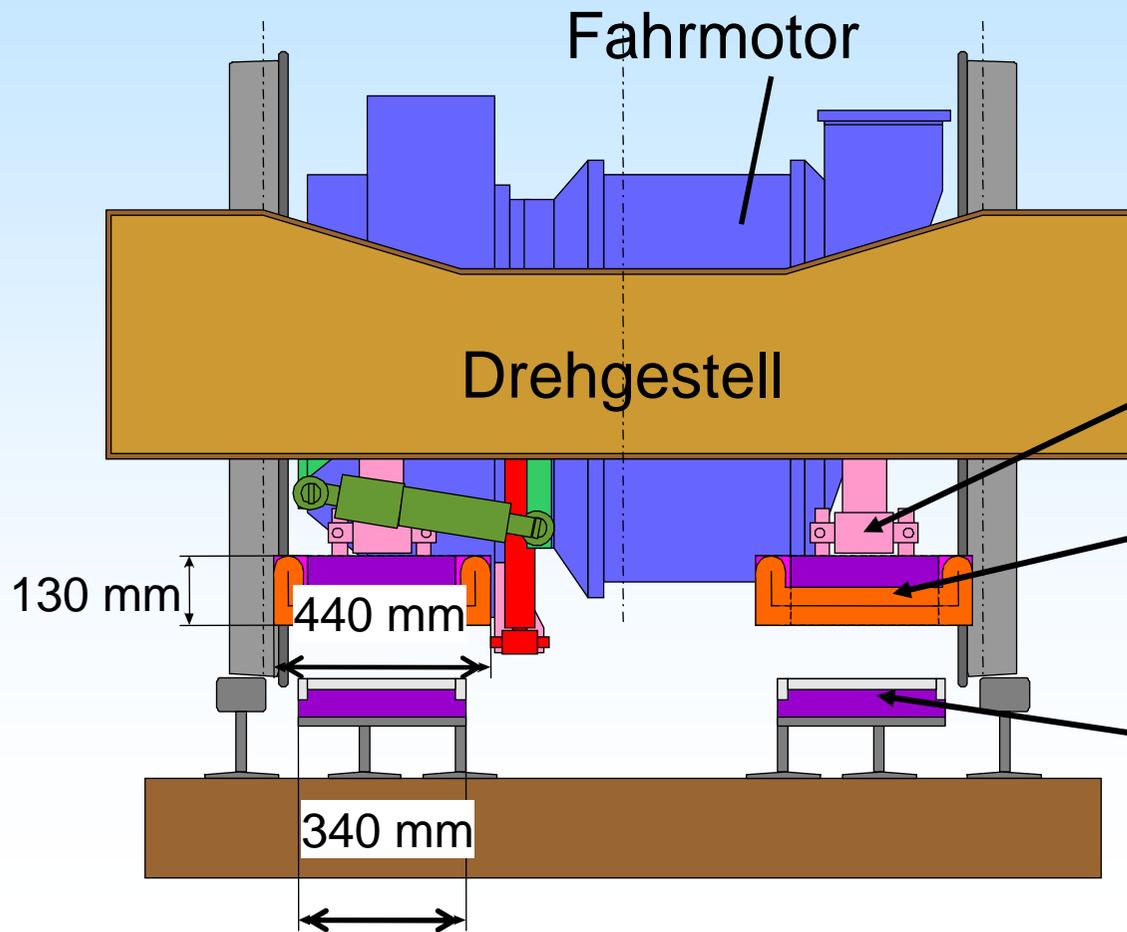
	s	v m/s	$\Delta F_n$ kN	$\Delta F_t$ kN
$q = 1/2$	0.1	30	9.8	0.3
$q = 1$	0.1	30	10.4	1.3



	$P_e$ kW	Q MVAr	$\cos \varphi$	$P_\delta$ kW	$P_m$ kW	$P_{cu}$ kW	$\eta$ %
$q = 1/2$	93	1.056	0.09	49	9	44	9.7
$q = 1$	133	1.494	0.09	50	39	83	29



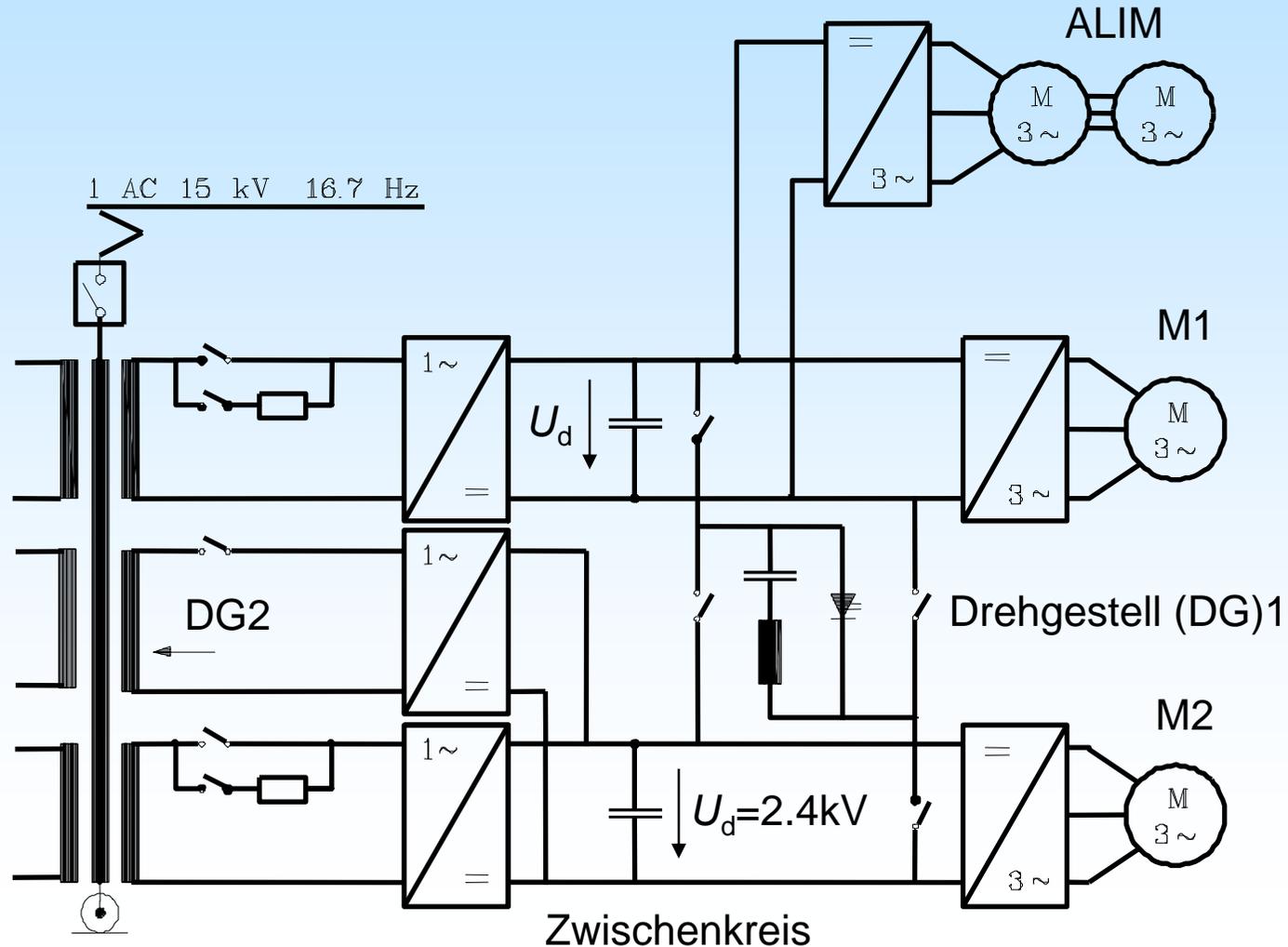
# ALIM mit Reaktionsschiene im Gleis



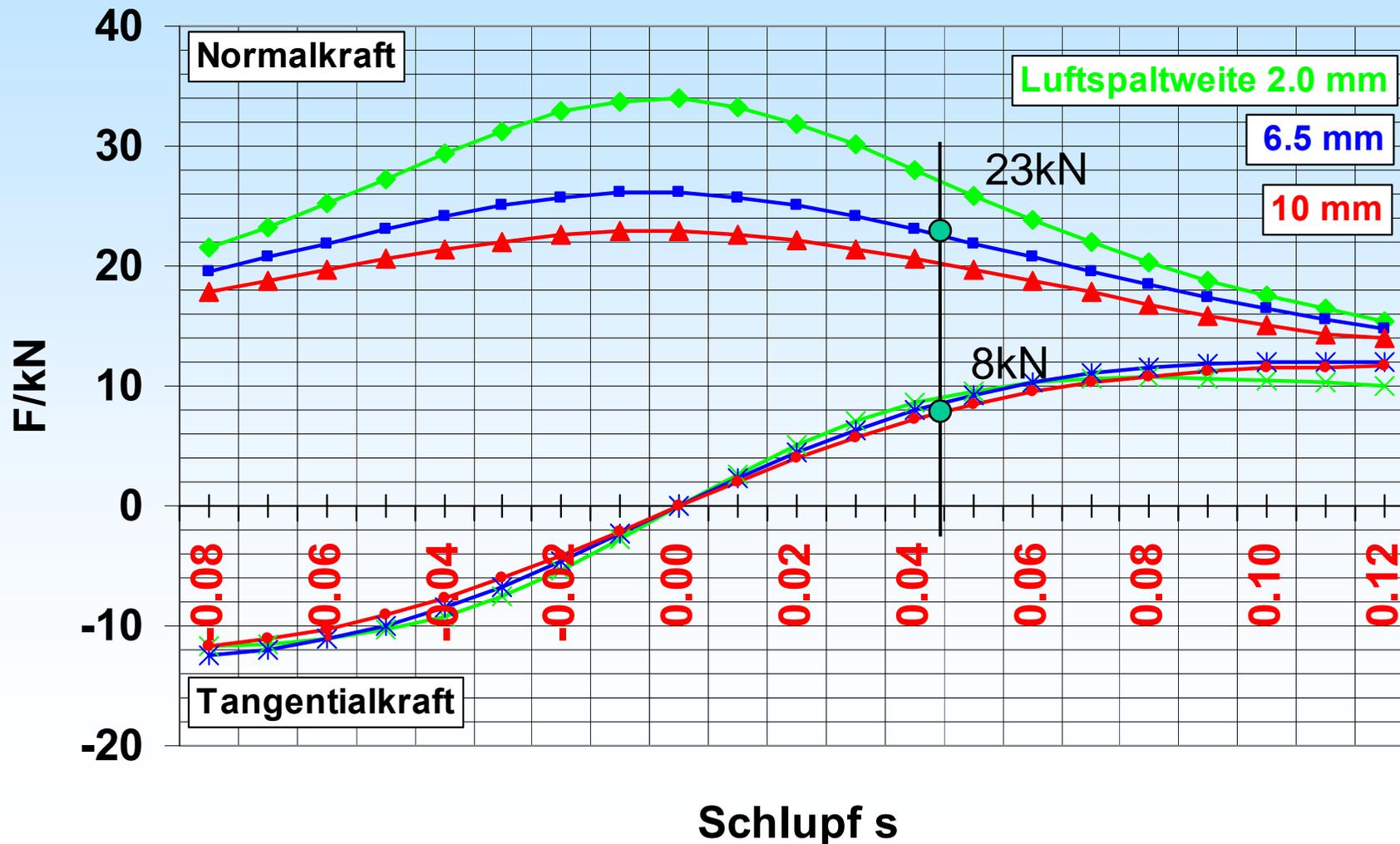
- 4 ALIMs (2 pro Drehgestell, Länge: 1400 mm)
- $A \cdot J = 2900 \text{ A/cm} \cdot \text{A/mm}^2$
- $\tau_p = 160 \text{ mm}; q = 2$
- Hub-/Senkeinrichtung
- Primärteil im Drehgestell
- Sekundärteil in der Strecke (Kupfer-Linear-käfig im Blechpaket)



# ALIM mit zusätzlichem Wechselrichter am Zwischenkreis



# Kräfte einer ALIM mit Reaktionsschiene im Gleis



$f = 76 \text{ Hz}$   
 $A = 740 \text{ A/cm}$   
 $J = 4 \text{ A/mm}^2$   
 $B_\delta = 0.57 \text{ T}$   
 $U_{\text{strang}} = 1050 \text{ V}$   
 $\cos\varphi = 0.54$   
 $v_{\text{syn}} = 85 \text{ km/h}$   
 $\text{ED: } 60\%$   
 $t_{\text{ein}} = 5 \text{ min}$



# Wirkung der ALIM mit Reaktionsschiene

Gewichtskraft der Lokomotive:  $Q_{ges} = 844 \text{ kN}$   $f_x = 0.25$

Zugkraft ohne ALIM:  $Q_{ges} \cdot f_x = 211 \text{ kN}$

Erzeugte Kräfte einer ALIM:  $\Delta F_n / 4 = 23 \text{ kN}$   $\Delta F_t / 4 = 8 \text{ kN}$

Zugkraft mit 4 ALIMs pro Lokomotive:

$$F = (844 \text{ kN} + 4 \cdot 23 \text{ kN}) \cdot 0.25 + 4 \cdot 8 \text{ kN} = 266 \text{ kN}$$

Erhöhte Zugkraft:

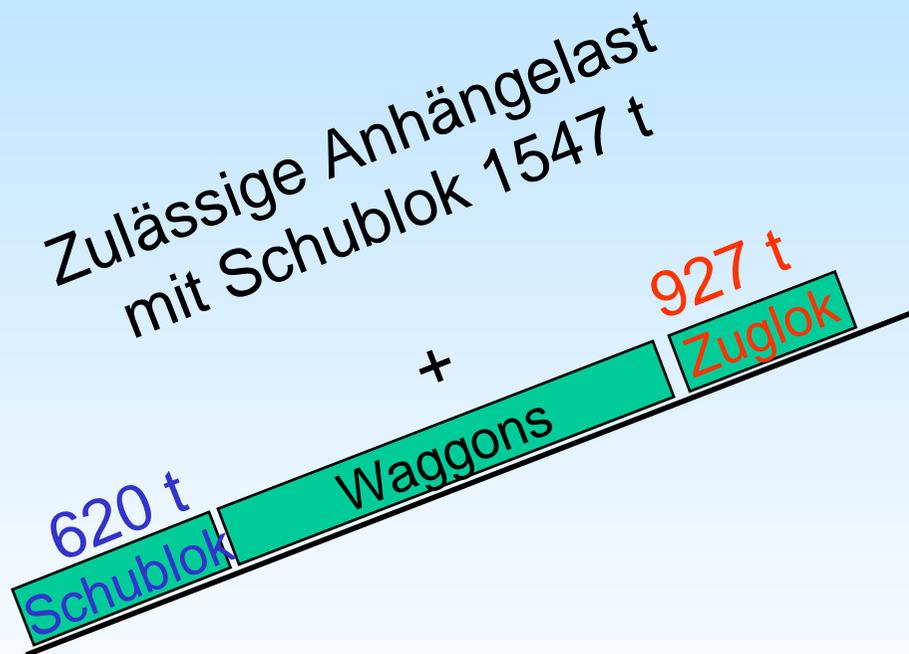
$$\Delta F = \frac{266}{211} - 1 = 26 \%$$



# Anhängelasten auf der „Geislinger Steige“

BR152 + Schublok

BR152 + ALIM



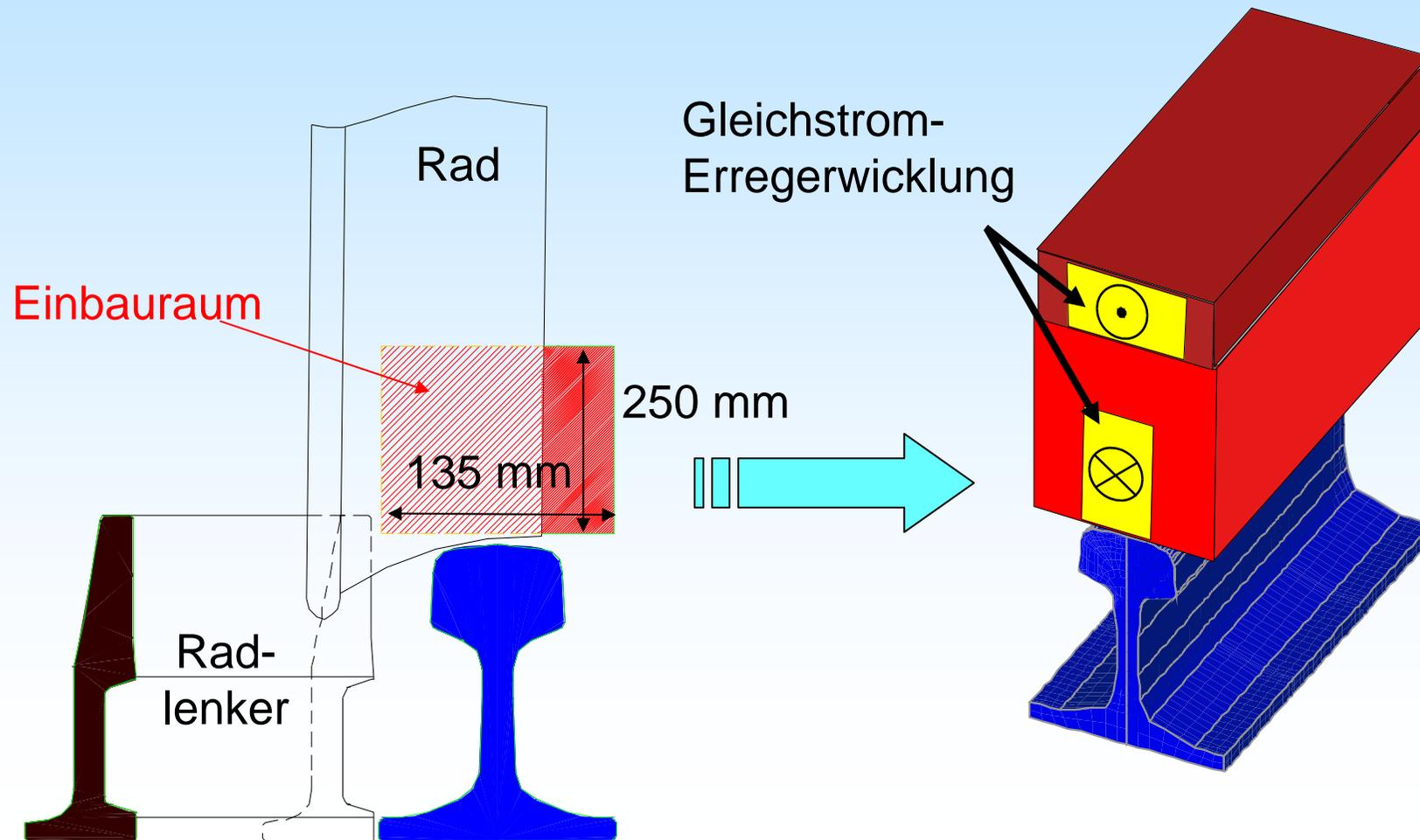
Durch Zeiteinsparung und Wegfall der Leerfahrten mit ALIM dennoch  
eine Erhöhung des Güteraufkommens von

**33.000 t /Tag auf 70.000 t/Tag**

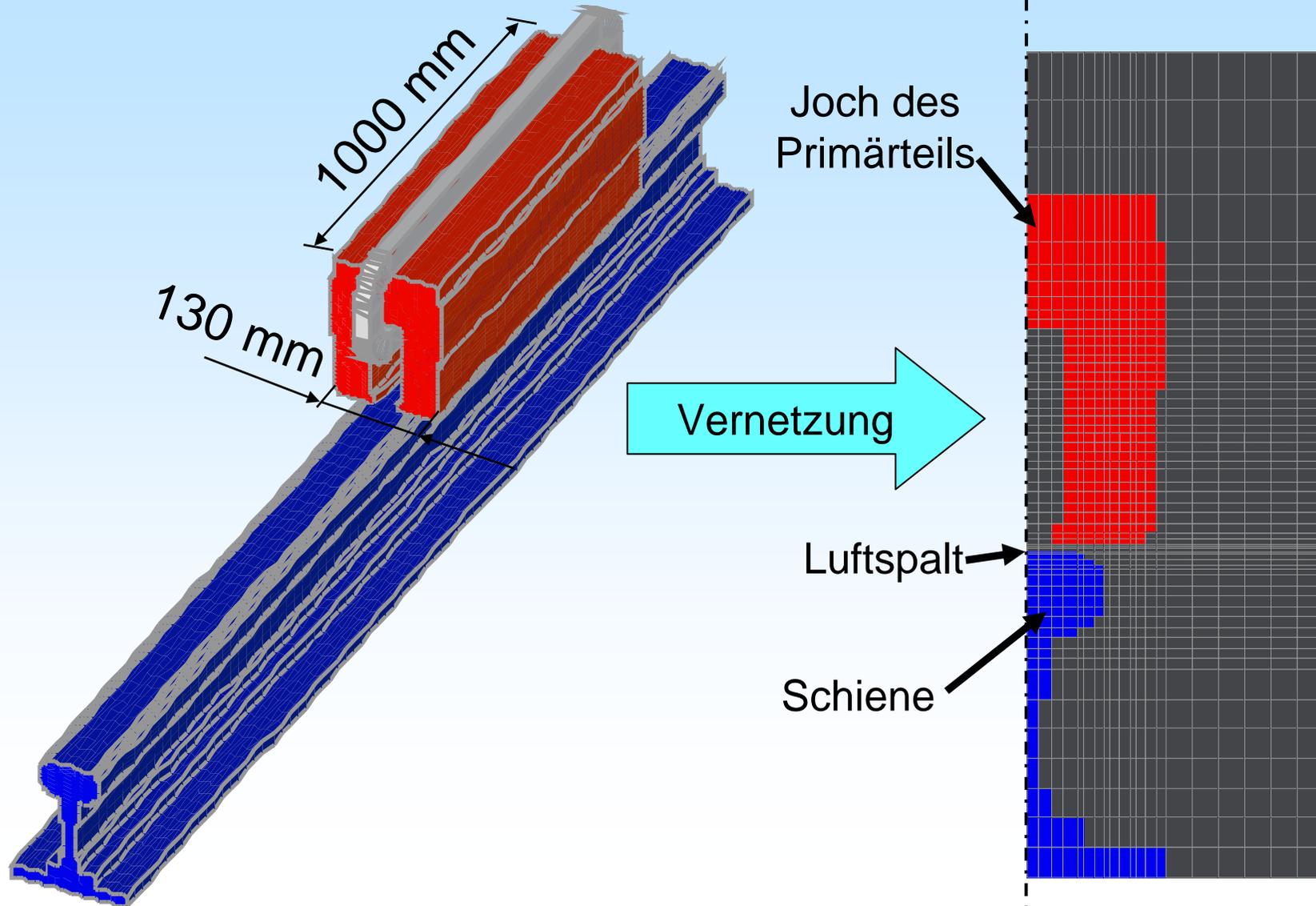
**möglich!**



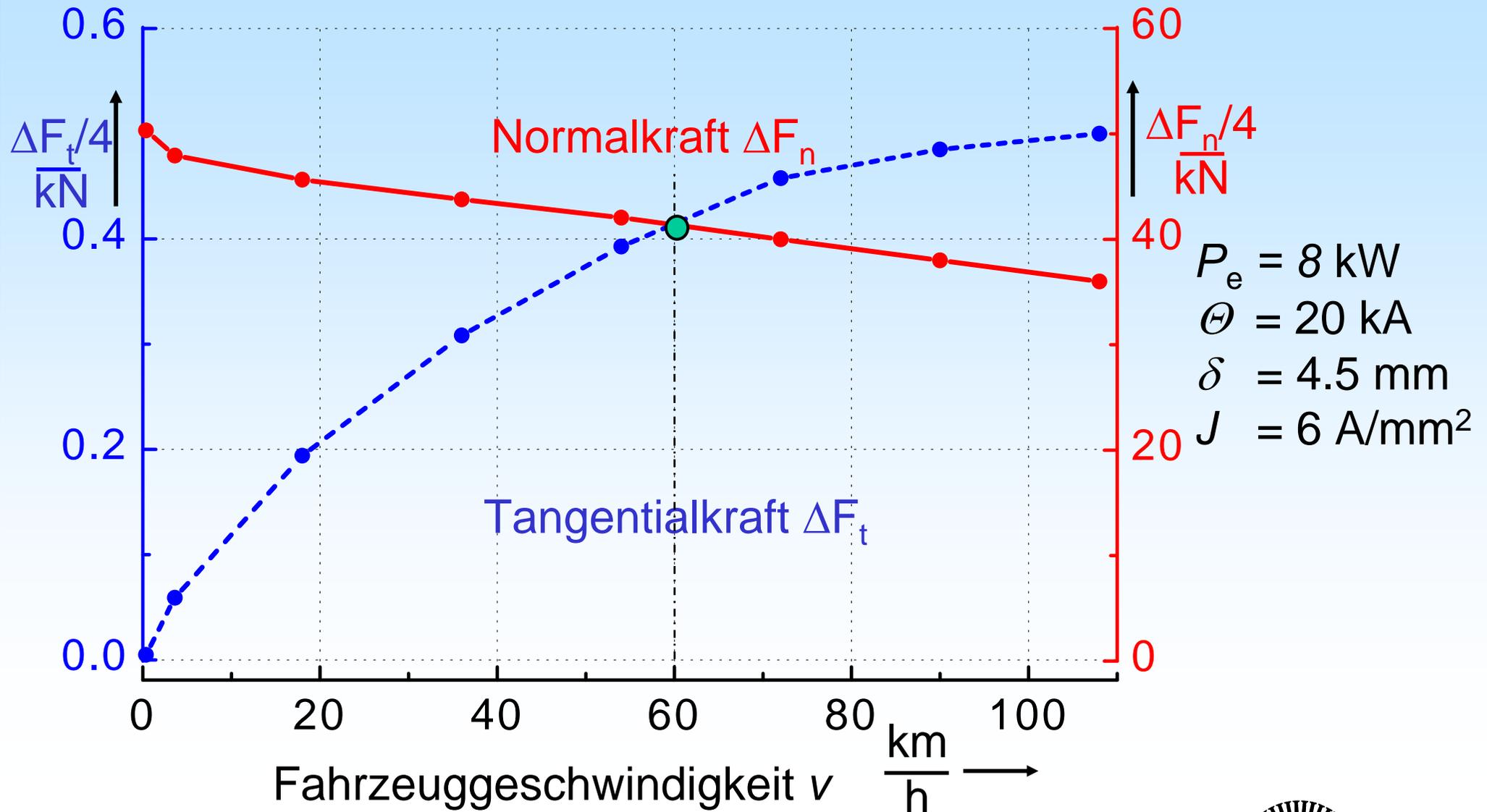
# Gleichstrom - Aktuator



# 3D Numerisches Modell des DC Aktuators



# Berechnete Kräfte des DC-Aktuators



# Wirkung des DC Aktuators

Gewichtskraft der Lokomotive:  $Q_{ges} = 844 \text{ kN}$   $f_x = 0.25$

Zugkraft ohne DC-Aktuator:  $Q_{ges} \cdot f_x = 211 \text{ kN}$

Erzeugte Kräfte eines Aktuators:  $\Delta F_n / 4 = 40 \text{ kN}$   $\Delta F_t / 4 = -0.4 \text{ kN}$   
( $v_{Fzg} = 60 \text{ km/h}$ )

Zugkraft mit 4 ALIM's pro Lokomotive:

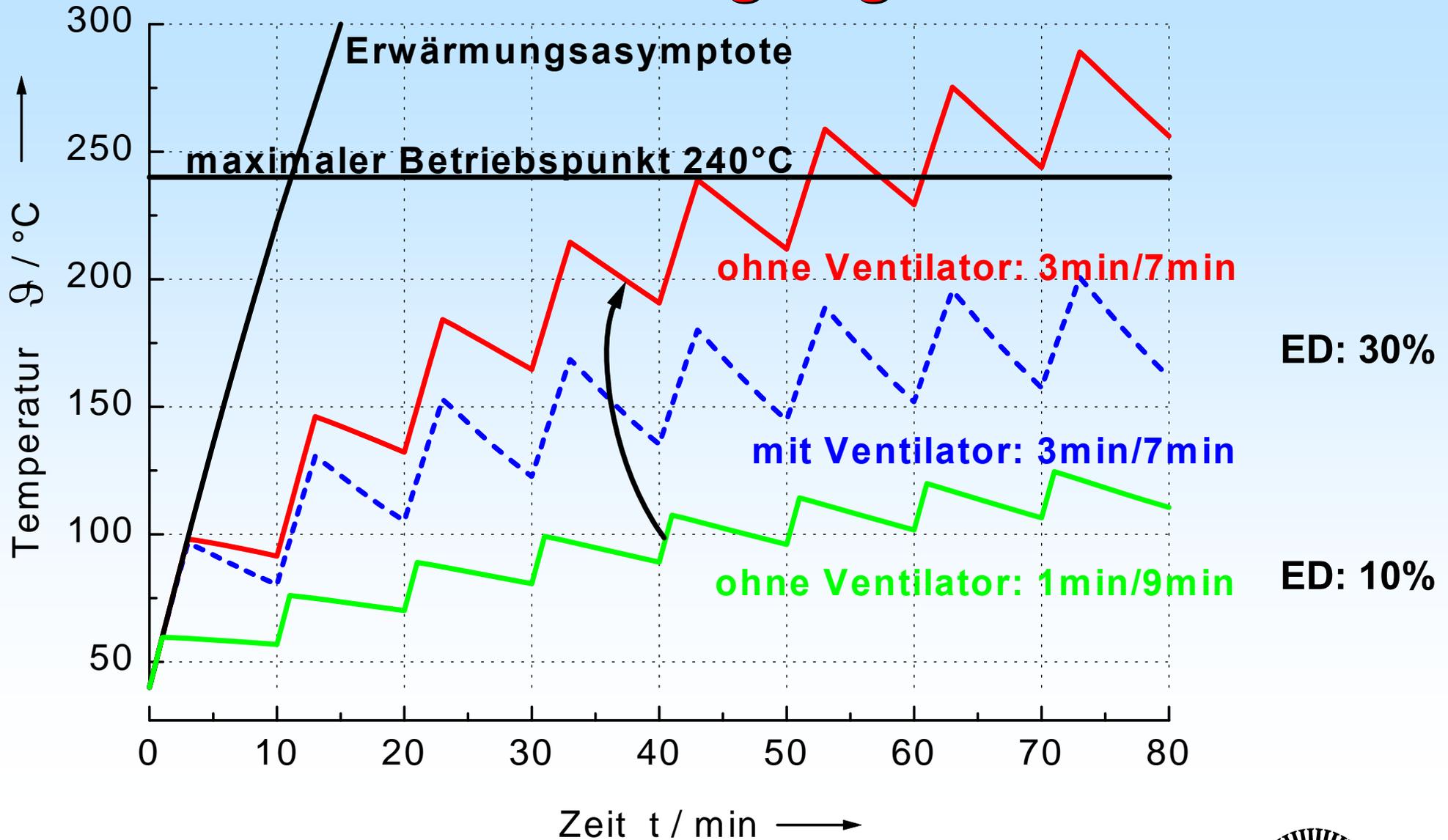
$$F = (844 \text{ kN} + 4 \cdot 40 \text{ kN}) \cdot 0.25 + 4 \cdot (-0.4) \text{ kN} = 249.4 \text{ kN}$$

Erhöhte Zugkraft:

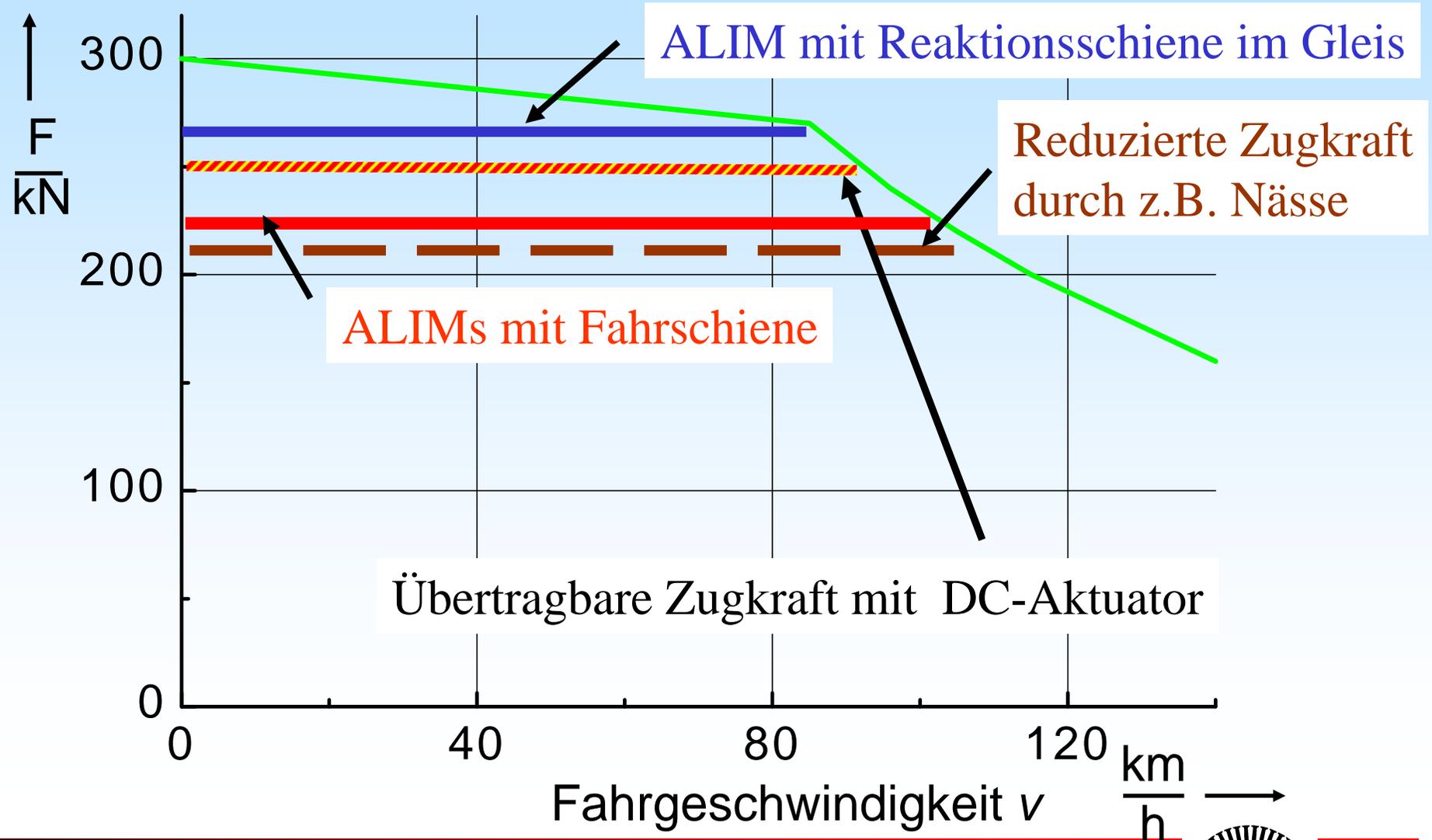
$$\Delta F = \frac{249.4}{211} - 1 = 18.2 \%$$



# Thermische Auslegung DC-Aktuator



# Kräfte am Zughaken der Lokomotive



# Vergleich der Varianten

	<b>ALIM <math>q = 1/2</math></b>	<b>ALIM <math>q = 1</math></b>	<b>ALIM + Reaktionsschiene</b>	<b>DC-Aktuator</b>
<b>Zugkraft- erhöhung</b>	<b>7.2%</b>	<b>9.1%</b>	<b>25.8%</b>	<b>18.2%<sup>*)</sup></b>
<b>Masse</b>	<b>178 kg</b>	<b>210 kg</b>	<b>340 kg</b>	<b>150 kg</b>

<sup>\*)</sup> geschwindigkeitsabhängig



# Zusammenfassung

## **ALIM**

### **Asynchron-Linear-Maschine**

- + Anzugs-, Schub- u. Bremskraft
- +  $v$ -unabhängig einstellbar
- + witterungsunabhängige Schub- und Bremskomponente
- hoher Blindstrom
- Schiene: Schubkraft klein
- Käfig nur lokal wirksam
- 3-Phasen-Umrichter

## **DC - Aktuator**

- + Anzugskräfte
- + kein Blindstrom
- + einfacher, kleiner DC-Chopper
- + kostengünstig
- störende Bremskraft (muß klein gehalten werden)
- $v$ -abhängige Kräfte
- witterungsabhängiges Boosten

