

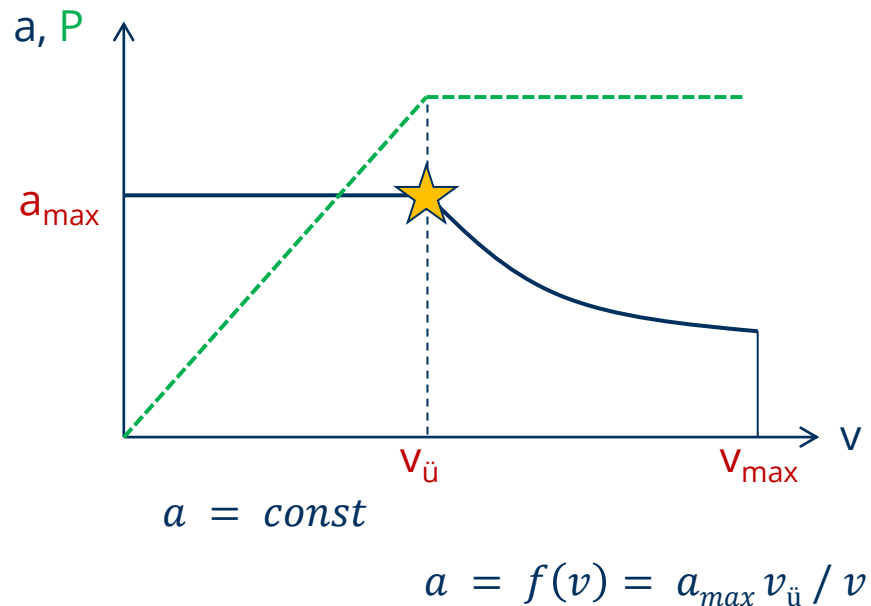
Fakultät Verkehrswissenschaften  
Professur für Elektrische Bahnen

# Fahrzeuge des Schienenpersonennahverkehrs

## Fahrdynamik – Vorlesung 3

Dipl.-Ing. Tobias Bregulla  
Wintersemester 2022/2023

# Leistungsauslegung Antrieb



## Definition spezifische Leistung (W/kg):

Aus:  $P_{max} = v_{\ddot{u}} \cdot F_{max}$  mit  $F_{max} = m \cdot a$

Ergibt sich:  $P = m \cdot a \cdot v$

Spezifisch  $p = P/m$

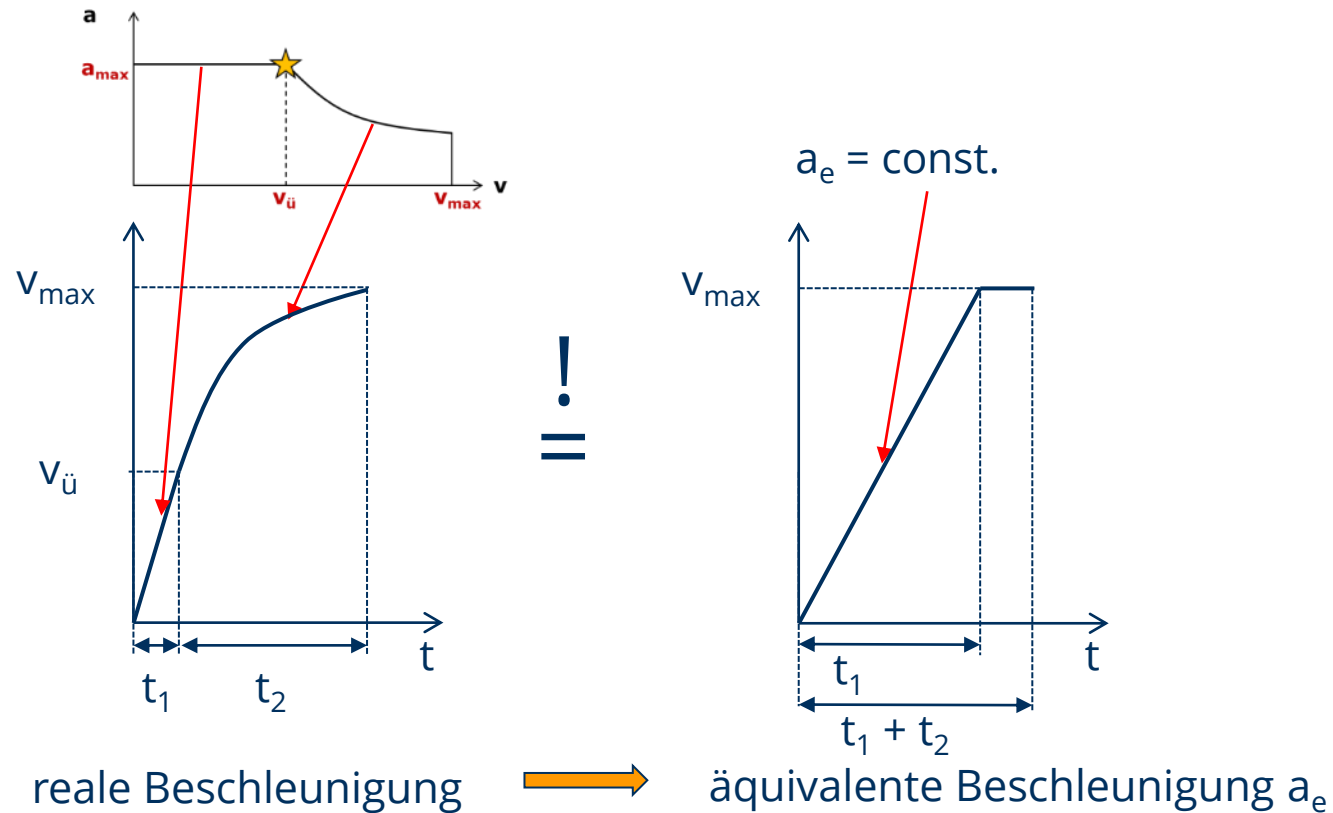
Somit:  $p_{max} = v_{\ddot{u}} \cdot a_{max}$

Beschleunigung:  $a = \frac{F}{m} = P / (v \cdot m) = p/v$

Somit:  $a = f(v) = a_{max} \cdot v_{\ddot{u}} / v$

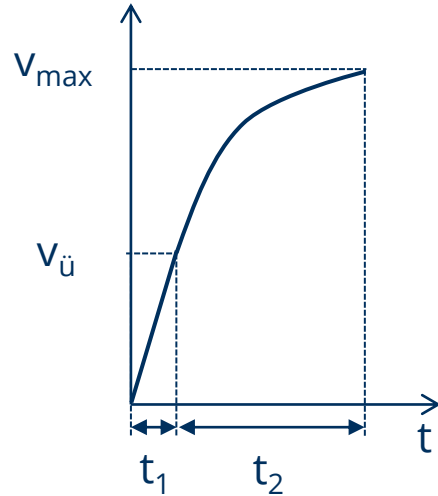
# Leistungsauslegung Antrieb

Definition einer äquivalenten Beschleunigung (Linearisierung des Beschleunigungsvorgangs)



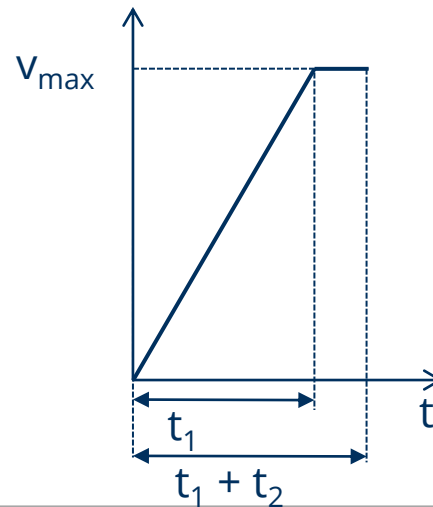
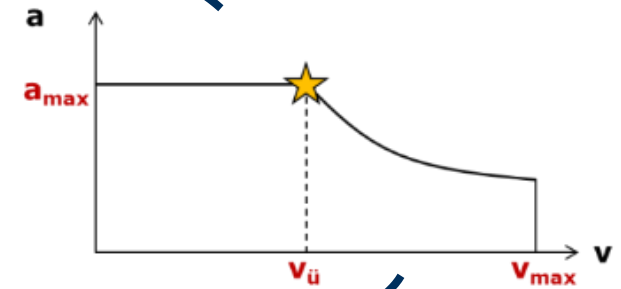
# Antriebsdimensionierung

## Berechnung Beschleunigungszeiten



$$a_1(v) = \text{const} = a_{\max} \quad t_1 = \int_0^{v_{\ddot{u}}} \frac{1}{a_{\max}} dv = \frac{v_{\ddot{u}}}{a_{\max}}$$

$$a_2(v) = \frac{a_{\max} \cdot v_{\ddot{u}}}{v} \quad t_2 = \int_{v_{\ddot{u}}}^{v_{\max}} \frac{1}{\frac{a_{\max} \cdot v_{\ddot{u}}}{v}} dv = \frac{v_{\max}^2}{2a_{\max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}}{2a_{\max}}$$

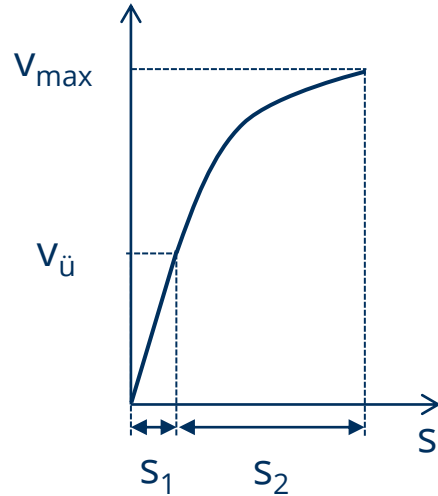


$$a_1(v) = \text{const} = a_e \quad t_1 = \int_0^{v_{\max}} \frac{1}{a_e} dv = \frac{v_{\max}}{a_e}$$

$$a_2(v) = 0 \quad t_2 = \frac{s_2}{v_{\max}}$$

# Antriebsdimensionierung

## Berechnung Beschleunigungswege

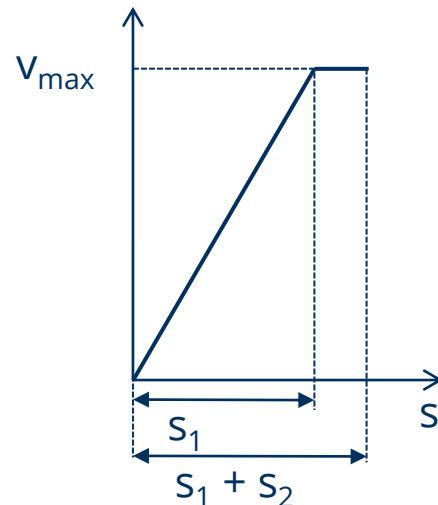


$$a_1(v) = \text{const} = a_{\max}$$

$$a_2(v) = \frac{a_{\max} \cdot v_{\ddot{u}}}{v}$$

$$s_1 = \int_0^{v_{\ddot{u}}} \frac{v}{a_{\max}} dv = \frac{v_{\ddot{u}}^2}{2a_{\max}}$$

$$s_2 = \int_{v_{\ddot{u}}}^{v_{\max}} \frac{v}{\frac{a_{\max} \cdot v_{\ddot{u}}}{v}} dv = \frac{v_{\max}^3}{3a_{\max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}^2}{3a_{\max}}$$



$$a_1(v) = \text{const} = a_e$$

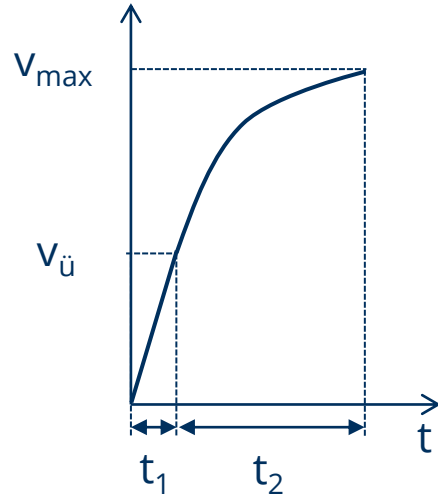
$$a_2(v) = 0$$

$$s_1 = \int_0^{v_{\max}} \frac{v}{a_e} dv = \frac{v_{\max}^2}{2a_e}$$

$$s_2 = v_{\max} \left( t_1 + t_2 - \frac{v_{\max}}{a_e} \right)$$

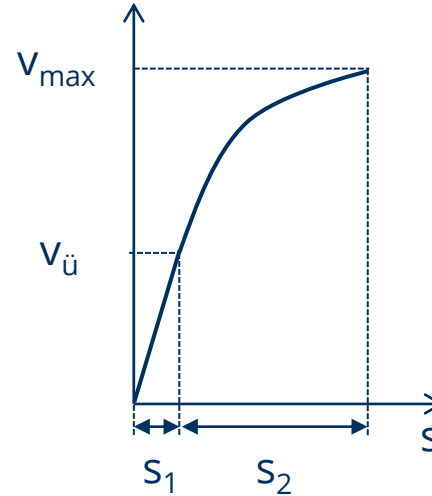
# Antriebsdimensionierung

## Zusammenfassung



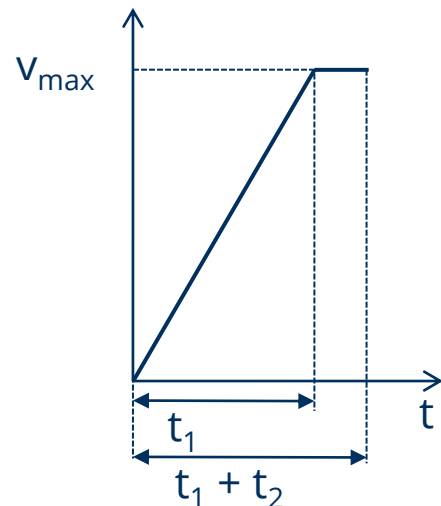
$$t_1 = \frac{v_{\ddot{u}}}{a_{max}}$$

$$t_2 = \frac{v_{max}^2}{2a_{max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}}{2a_{max}}$$



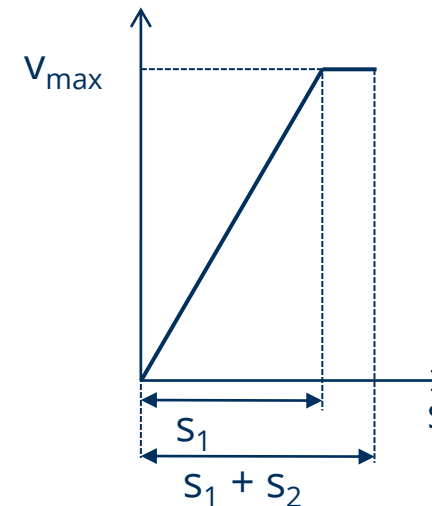
$$s_1 = \frac{v_{\ddot{u}}^2}{2a_{max}}$$

$$s_2 = \frac{v_{max}^3}{3a_{max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}^2}{3a_{max}}$$



$$t_1 = \frac{v_{max}}{a_e}$$

$$t_2 = \frac{s_2}{v_{max}}$$



$$s_1 = \frac{v_{max}^2}{2a_e}$$

$$s_2 = v_{max} \left( t_1 + t_2 - \frac{v_{max}}{a_e} \right)$$

# Fahrdynamische Äquivalenz

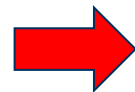
$$s_1 + s_2 = s_1 + s_2$$

$$\frac{v_{\ddot{u}}^2}{2a_{max}} + \frac{v_{max}^3}{3a_{max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}^2}{3a_{max}} = \frac{v_{max}^2}{2a_e} + v_{max} \left( t_1 + t_2 - \frac{v_{max}}{a_e} \right)$$

$$t_1 + t_2 = t_1 + t_2$$

$$t_1 + t_2 = \frac{v_{\ddot{u}}}{a_{max}} + \frac{v_{max}^2}{2a_{max}v_{\ddot{u}}} - \frac{v_{\ddot{u}}}{2a_{max}}$$

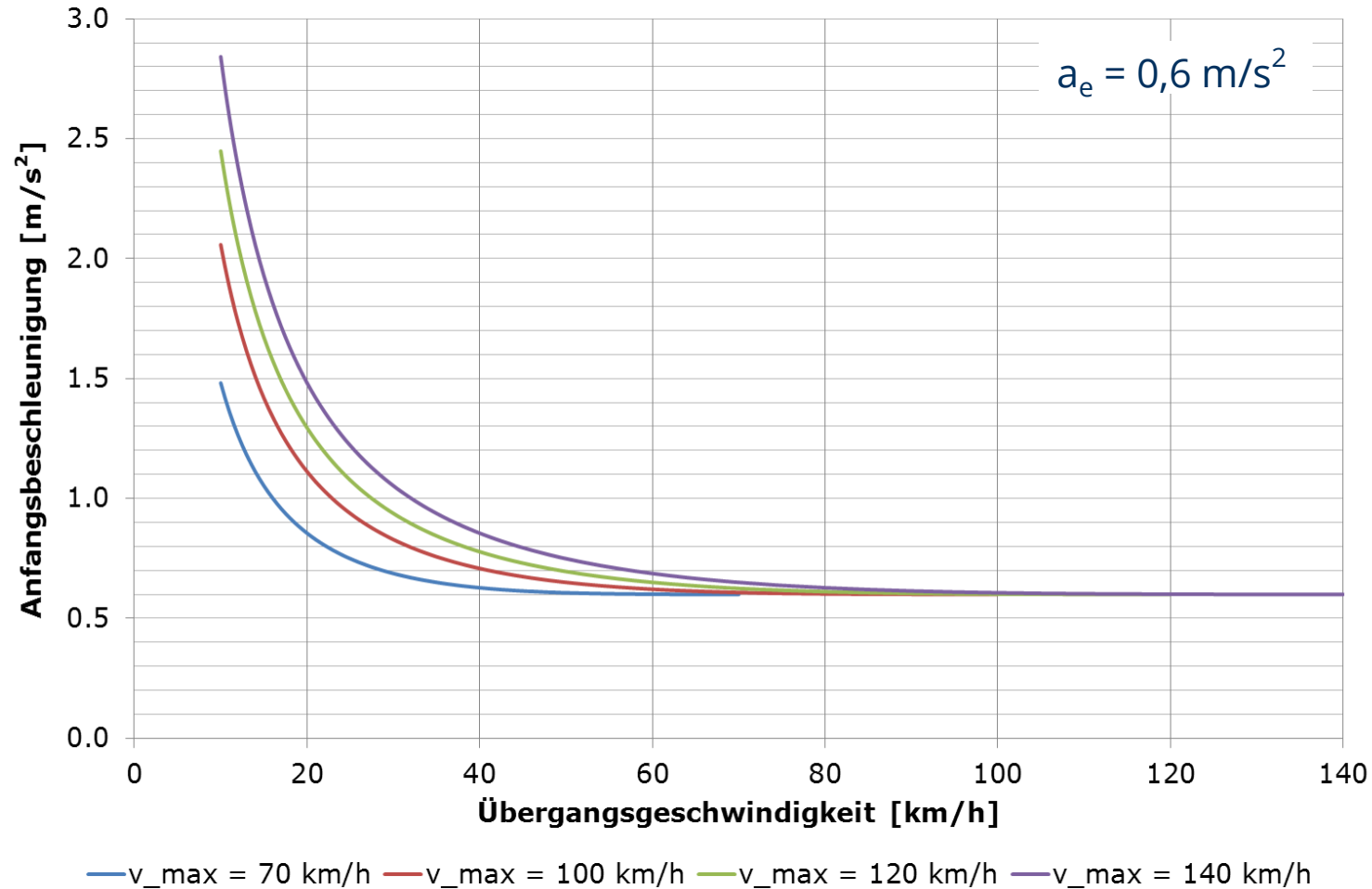
Ermittlung der erf. maximalen Beschleunigung



$$a_{max} = a_e \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \frac{v_{max}}{v_{\ddot{u}}} + \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} \right)^2 \right]$$

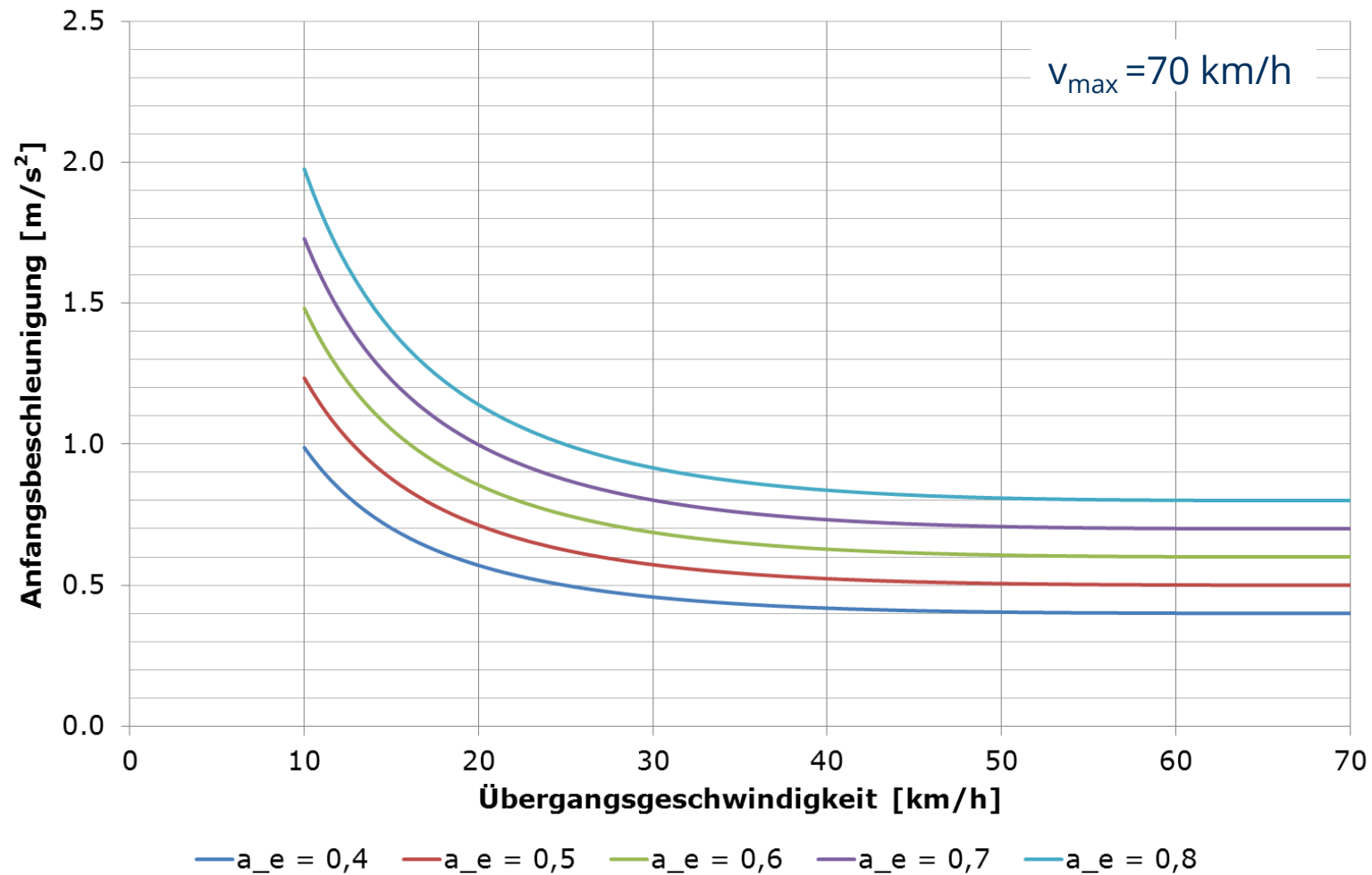
# Ergebnisdarstellung

## Übergangsgeschwindigkeit und Anfangsbeschleunigung



# Ergebnisdarstellung

## Übergangsgeschwindigkeit und Anfangsbeschleunigung



# Antriebsdimensionierung

## Grenzen der äquivalenten Beschleunigung

Äquivalente Beschleunigung aus Folie 70

$$a_e = \frac{a_{max}}{\frac{1}{3} \cdot \frac{v_{max}}{v_{\ddot{u}}} + \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}}\right)^2}$$

Komfort (Ruckbegrenzung, Sicherheit der Passagiere):

$$a_{max} \leq 1,5 \text{ m/s}^2$$

Anfahrssicherheit / Kraftschluss:

$$\xi m a_{max} = F_{T,max} - \sum F_W$$

$$m a_{max} = m_T g \tau$$

Vereinfachung

$$a_{max} \approx \gamma g \tau$$

$$\frac{m_T}{m} = \gamma$$

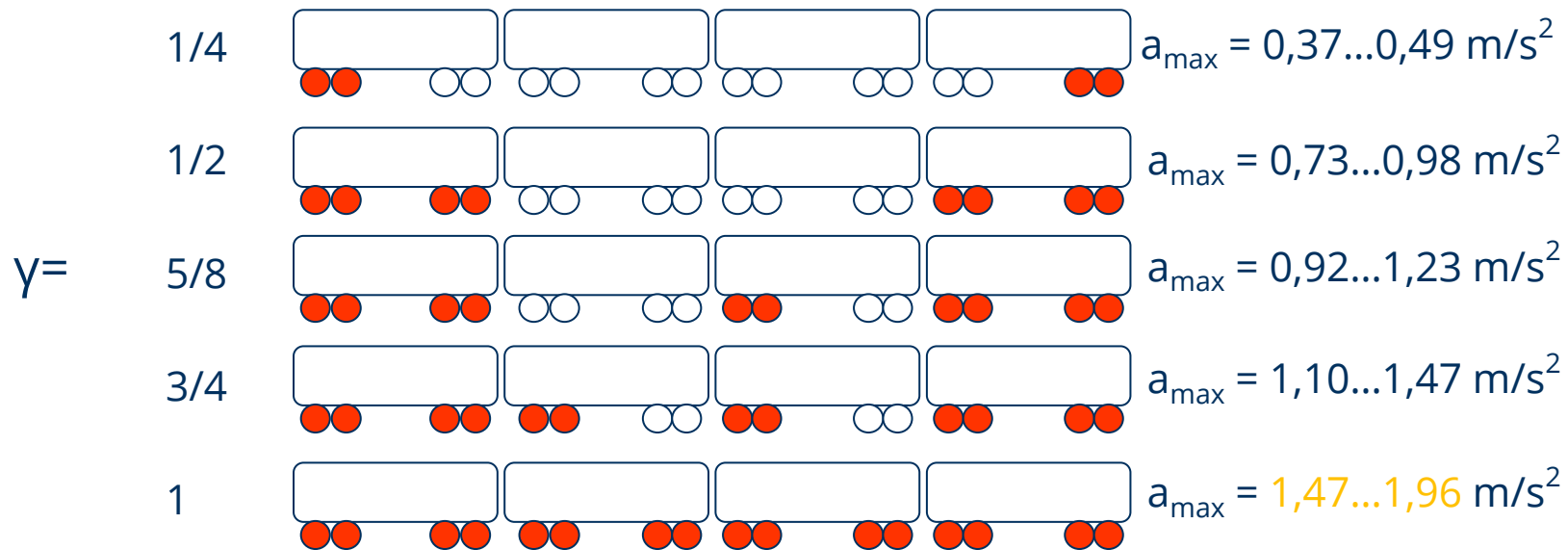
$$a_{max} \approx \frac{m_T}{m} g \tau$$

Verhältnis Reibmasse  
zu Gesamtmasse

# Antriebsdimensionierung

## Grenzen der Anfangsbeschleunigung

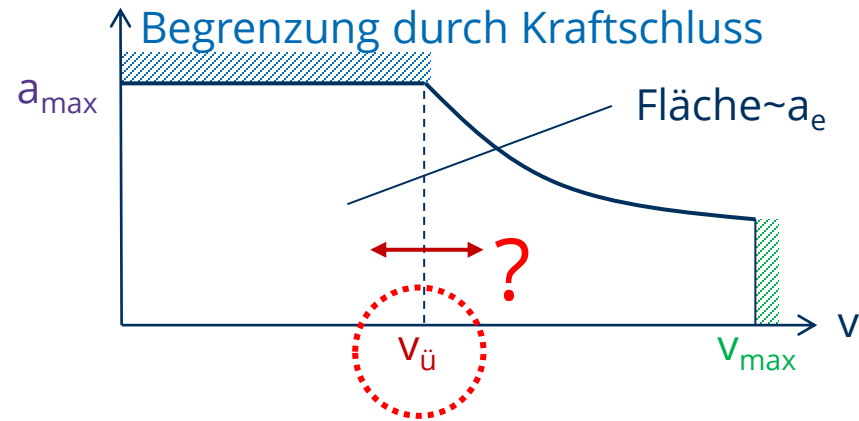
$$a_{\max} \leq \gamma g \tau \longrightarrow \tau \leq 0,15 \dots 0,20$$



Komfortbegrenzung nötig

# Antriebsdimensionierung

## Ermittlung der spezifischen Leistung



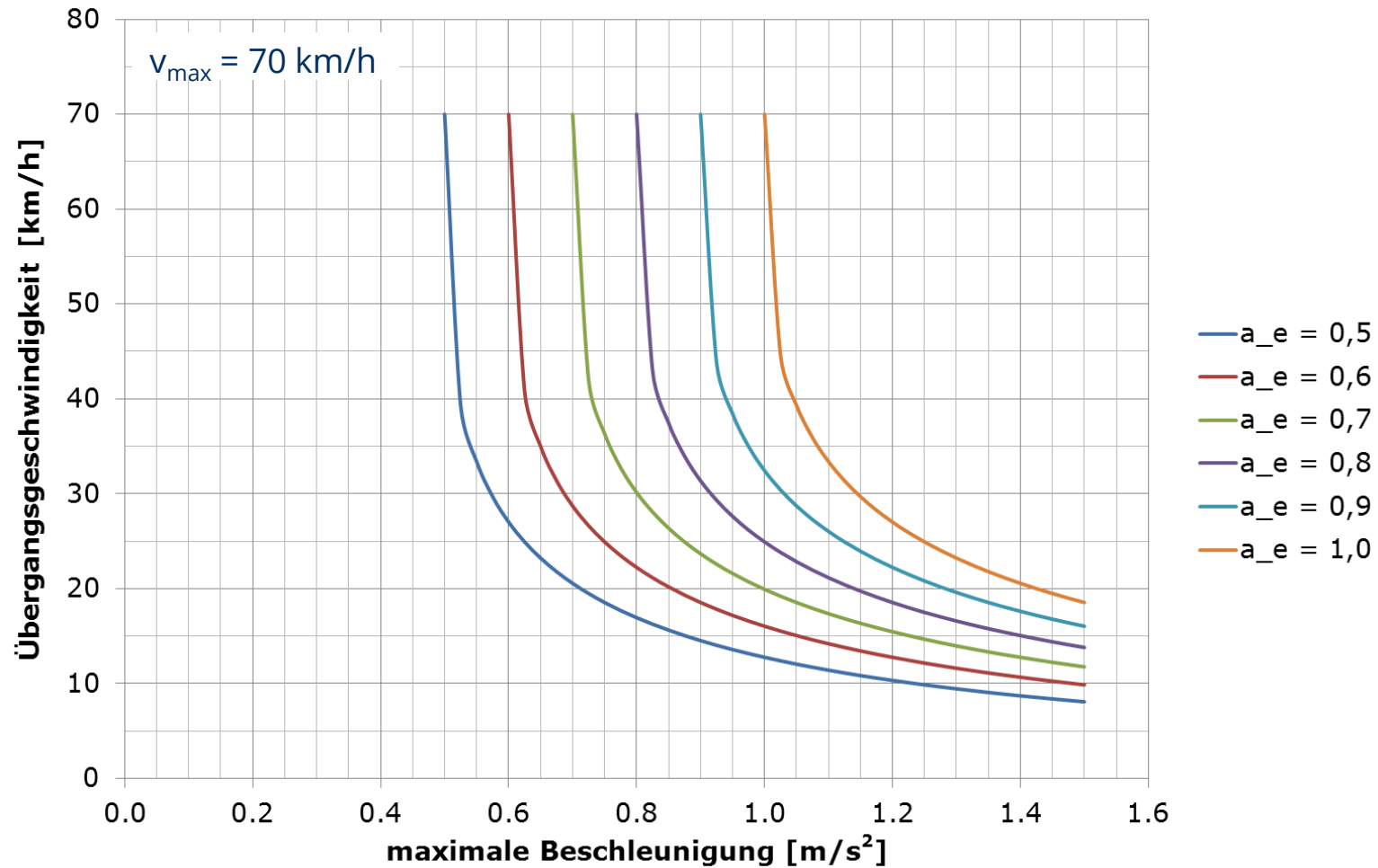
$$a_{max} = a_e \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \frac{v_{max}}{v_{\ddot{u}}} + \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} \right)^2 \right]$$



Ermittlung von  $v_{\ddot{u}}$

$$0 = v_{\ddot{u}}^3 - 3v_{max} \cdot v_{\ddot{u}}^2 + \frac{3a_{max}v_{max}^2}{a_e} \cdot v_{\ddot{u}} - v_{max}^3$$

# Ergebnisdarstellung



# Antriebsdimensionierung

## Ermittlung der spezifischen Leistung

$$a_{max} = a_e \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \frac{v_{max}}{v_{\ddot{u}}} + \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} \right)^2 \right]$$

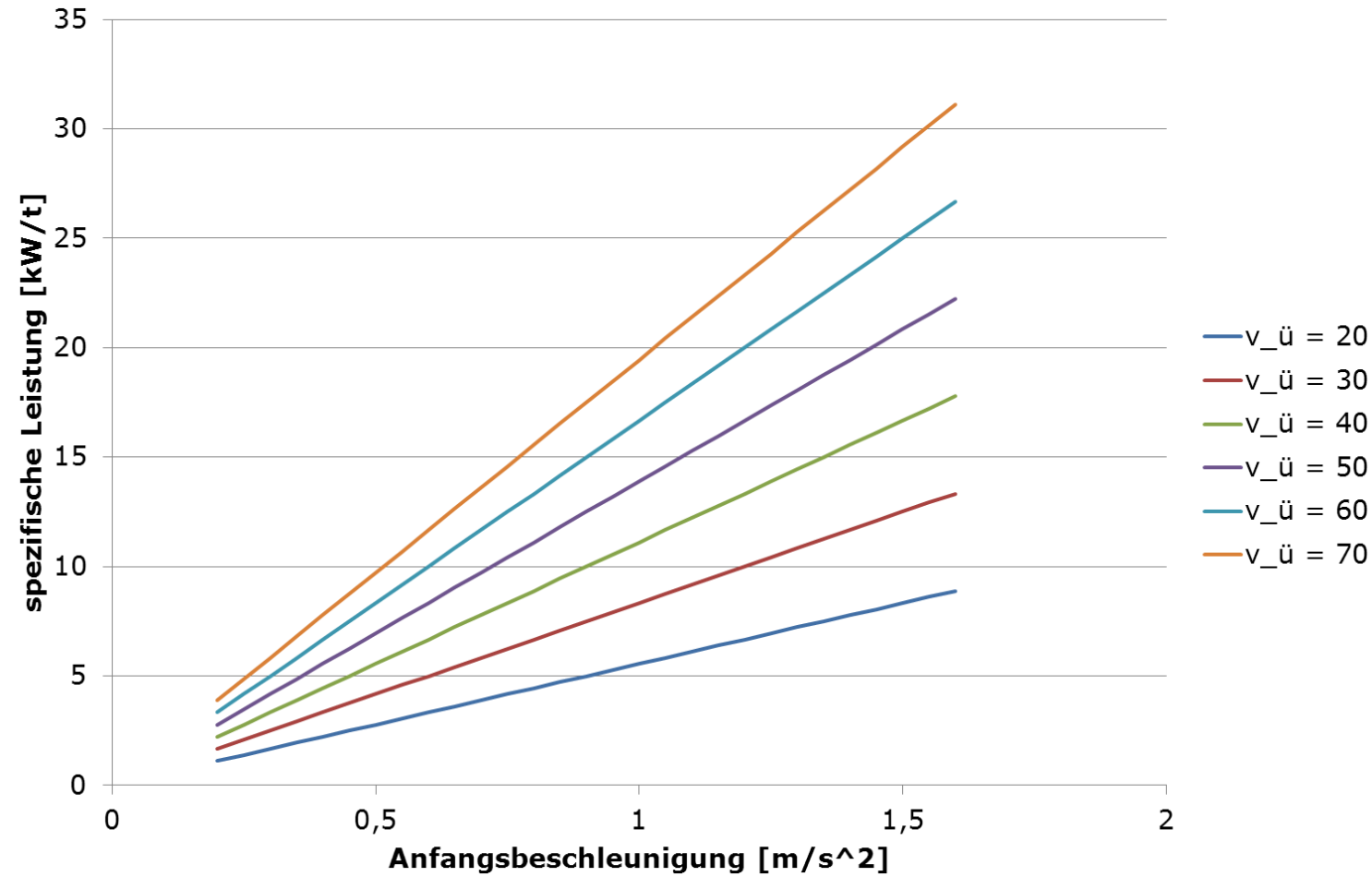


$$p = a_{max} \cdot v_{\ddot{u}} = v_{\ddot{u}} \cdot a_e \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot \frac{v_{max}}{v_{\ddot{u}}} + \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{v_{\ddot{u}}}{v_{max}} \right)^2 \right]$$

$$p = a_e \cdot \left[ \frac{1}{3} \cdot v_{max} + \frac{v_{\ddot{u}}^2}{v_{max}} - \frac{1}{3} \cdot \frac{v_{\ddot{u}}^3}{v_{max}^2} \right]$$

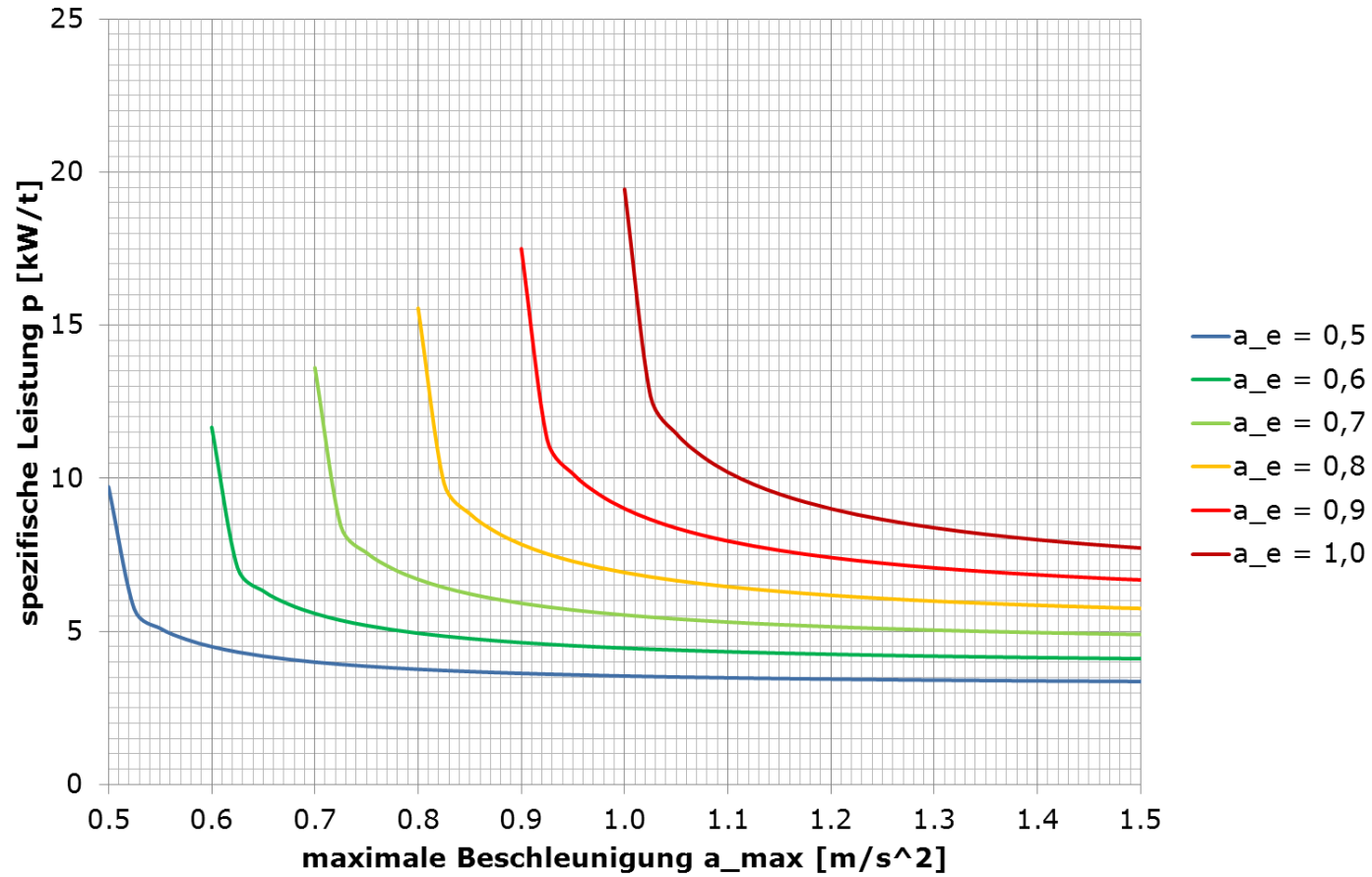
Aus der Formel für die maximale Beschleunigung erhält man einen Ausdruck für die Berechnung der spezifischen Leistung

# Ergebnisdarstellung



# Ergebnisdarstellung

$v_{\max} = 70 \text{ km/h}$



# Antriebsdimensionierung

## Beispiel



Auslegung eines Straßenbahntriebwagens mit 8 Radsätzen

Vorgaben:

- Masse (leer): 38,5 t
- Masse (beladen): 50,0 t
- mittlere Betriebsbremsverzögerung: 1,0 m/s<sup>2</sup>
- Haltestellenabstand: 290 m
- Soll-Fahrzeit (Spitzfahrt): 35 s
- Fahrzeughöchstgeschwindigkeit: 70 km/h

$$T = 2 \sqrt{\frac{s_H}{a_h}}$$



$$a_h = \frac{4s_H}{T^2}$$

$$a_h = \frac{2ab}{a+b}$$

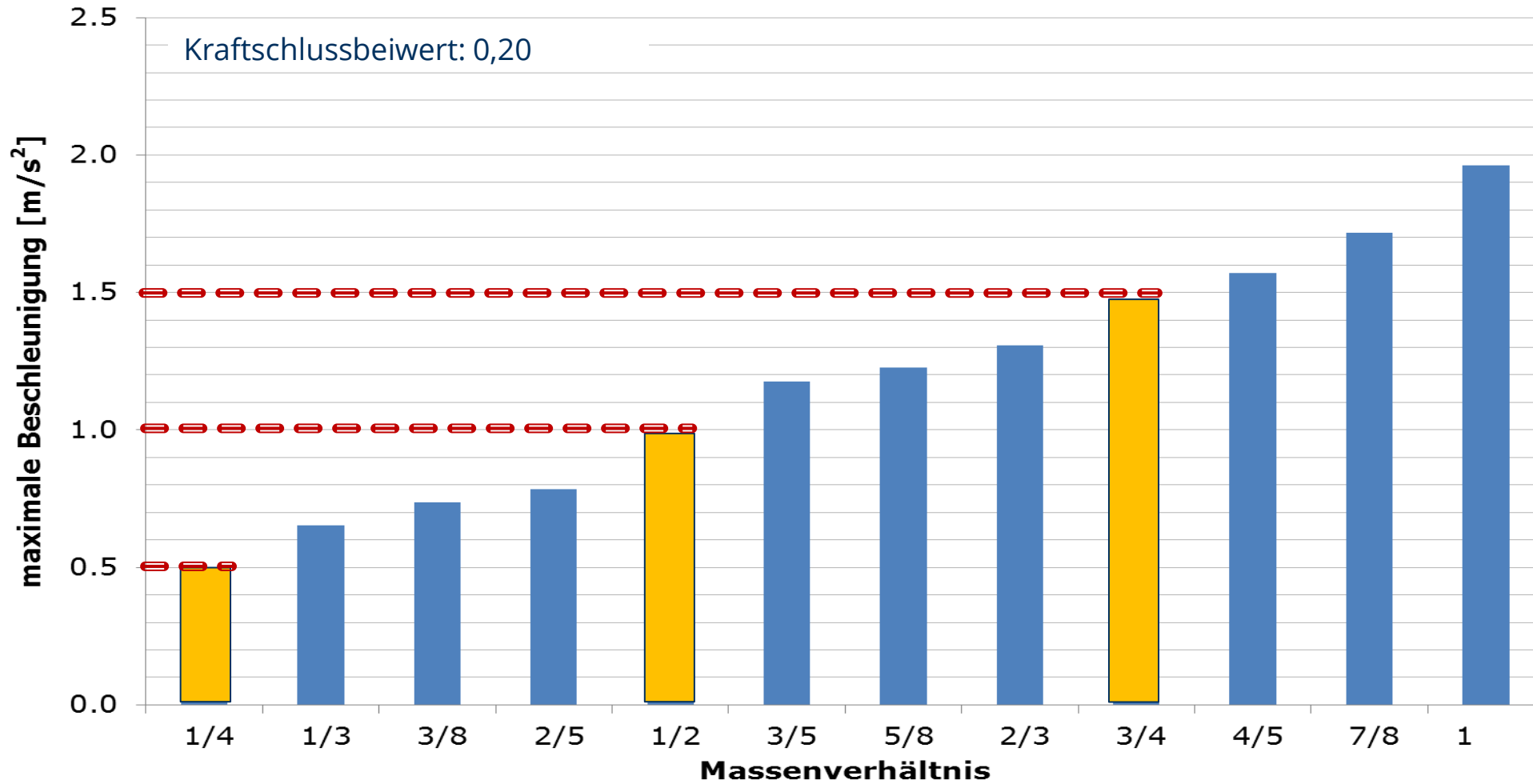


$$\Rightarrow a_h = \frac{4 \cdot 290m}{35^2 s^2} = 0,9469m/s^2$$

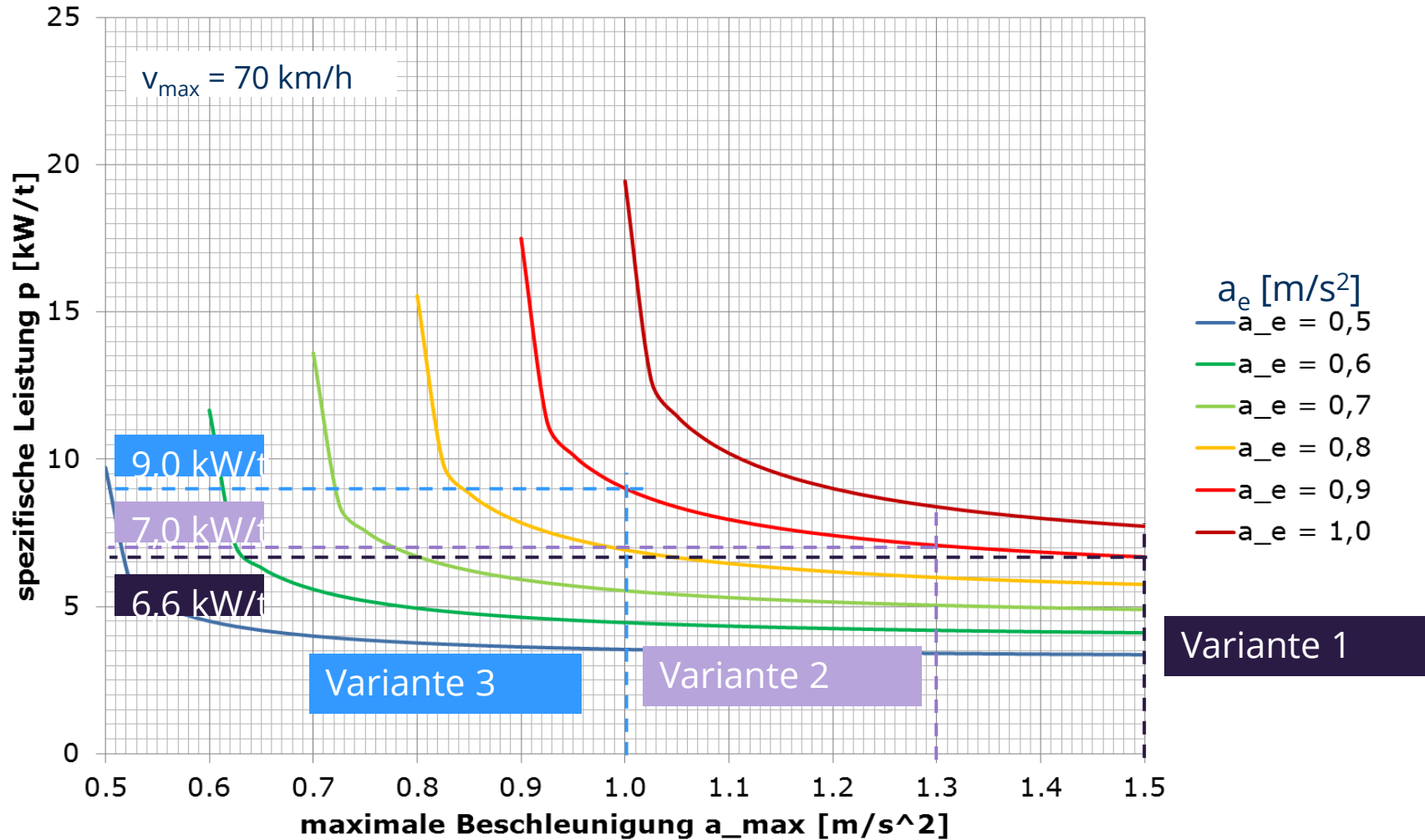
$$\Rightarrow a = a_e = \frac{-a_h b}{a_h - 2b} = \frac{-0,9469 \cdot 1}{0,9469 - 2} = 0,9m/s^2$$

$a_e = 0,9 \text{ m/s}^2$

# Massenverhältnis



# Ableitung der $a_{max}$ aus $a_e$ (Anforderung)



# Dimensionierung



Variante 1:

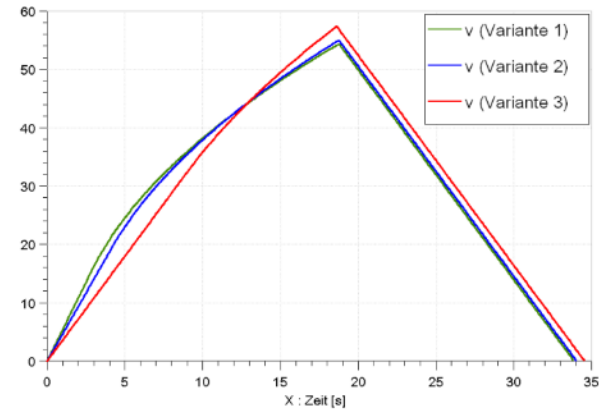
$$P = 50 \text{ t} \cdot 6,6 \text{ kW/t} = 330 \text{ kW}$$

Variante 2:

$$P = 50 \text{ t} \cdot 7,0 \text{ kW/t} = 350 \text{ kW}$$

Variante 3:

$$P = 50 \text{ t} \cdot 9,0 \text{ kW/t} = 450 \text{ kW}$$



Variante 1:



$$P = 6 \times 55 \text{ kW}$$

Variante 2:

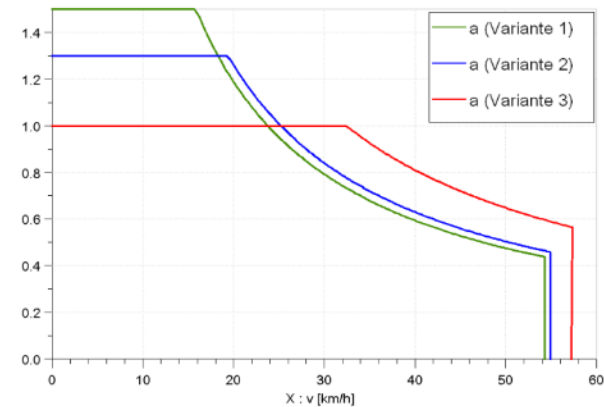


$$P = 6 \times 58 \text{ kW}$$

Variante 3:



$$P = 4 \times 112,5 \text{ kW}$$



# Literaturempfehlungen

- **Kießling, Friedrich [ VerfasserIn ]; Puschmann, Rainer [ VerfasserIn ]; Schmieder, Axel [ VerfasserIn ]** Fahrleitungen elektrischer Bahnen : Planung, Berechnung, Ausführung, Betrieb - [ 3., wesentlich überarb. und erw. Aufl. ]
- **Wende, Dietrich [ VerfasserIn ]** Fahrdynamik des Schienenverkehrs : mit 83 Tabellen und 83 Berechnungsbeispielen - [ 1. Aufl. ]
- **Ihme, Joachim [VerfasserIn]** Schienenfahrzeugtechnik - [ 4., überarbeitete Auflage ] (2020) (Auch als PDF aus der SLUB verfügbar)

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

# Kontakt



## **Dipl.-Ing. Tobias Bregulla**

Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
tobias.bregulla@tu-dresden.de  
+49 351 463-36577

Technische Universität Dresden  
Fakultät für Verkehrswissenschaften „Friedrich List“  
Professur für Elektrische Bahnen  
<https://www.e-bahnen.de>

Abbildungen ohne gesonderte Kennzeichnung wurden selbst angefertigt oder entstammen den Archiven der Professur für Elektrische Bahnen