

# Grundlagen elektrischer Verkehrssysteme -Übungsaufgaben-

**Fakultät Verkehrswissenschaften „Friedrich List“**

Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik (IBB), Professur Elektrische Bahnen

Prof. Dr.-Ing. Arnd Stephan

## **Übung 1 – Energie, Leistung**

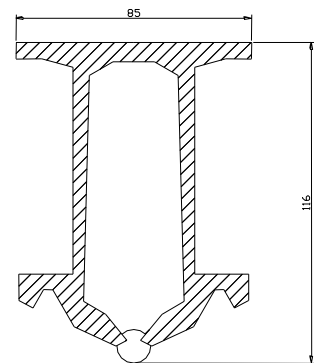
Ein elektrischer Regionaltriebwagen besitzt eine Dienstmasse von 55 t. Er kann eine maximale Zuladung von 18 t aufnehmen. Die Höchstgeschwindigkeit des Triebwagens beträgt 100 km/h. Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung im Fahrzeug beträgt  $\eta = 0,84$ .

- a) Welche mechanische bzw. elektrische Energie ist notwendig, um den Triebwagen aus dem Stillstand auf seine Höchstgeschwindigkeit zu beschleunigen? Geben Sie die elektrische Energie in der dafür üblichen Einheit an!
- b) Welche Leistung muss im Fahrzeug installiert werden, wenn der Triebwagen im Geschwindigkeitsbereich unter 50 km/h mit der im Nahverkehr üblichen Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  beschleunigen soll? Welche Leistung wäre nötig, wenn diese Beschleunigung bis zum Erreichen der Höchstgeschwindigkeit gewährleistet werden soll?

## Übung 2 – Elektrischer Widerstand, elektrischer Strom

In einer Stromschienenoberleitung wird ein gewöhnlicher Rillenfahrdraht (Ri) aus Kupfer oder Kupferlegierungen wie Kupfer-Silber (RiS=CuAg) oder Kupfer-Magnesium (RiM=CuMg) in ein Aluminiumprofil eingespannt. Aufgrund der, im Vergleich zum Kettenwerk, geringeren Bauhöhe der Stromschienenoberleitung wird sie bevorzugt in Tunneln eingesetzt, unter anderem z.B. im Flughafen-S-Bahn-Tunnel in Dresden oder im Nord-Süd-Fernbahntunnel in Berlin.

Ein 12 m langes Aluminium-Profil einer Stromschienenoberleitung wiegt 71,7 kg. Aluminium besitzt eine Dichte von  $2,7 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  und eine spezifische elektrische Leitfähigkeit von  $35,7 \cdot 10^6 \text{ S/m}$ .



1. Bei der Montage der Stromschienenoberleitung wird ein, in der Schweiz üblicher Kupfer-Rillenfahrdraht (Ri 107) mit einem Querschnitt von  $107 \text{ mm}^2$  in das Aluminium-Profil eingeklemmt.
  - a) Wie groß ist der elektrische Widerstand dieses Aluminium-Profiles?
  - b) Wie teilt sich der Strom auf Fahrdraht und Aluminium-Profil auf, wenn insgesamt 560 A in der Stromschienenoberleitung fließen? Der spezifische elektrische Widerstand von Kupfer beträgt  $0,0178 \text{ } \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ .
  - c) Wie groß ist die Stromdichte im Fahrdraht und im Aluminium-Profil?
2. Durch den Betrieb nutzt sich der Fahrdraht ab. Zwischen Fahrdraht und Schleifleiste des Stromabnehmers soll sich eine ebene Kontaktfläche von 5 mm Breite gebildet haben. Beim Stromabnehmer handelt es sich um einen Hochgeschwindigkeitsstromabnehmer der Bauart DSA 350 SEK, wie er auf ICE-1- und ICE-2-Triebzügen zum Einsatz kommt. Er besitzt zwei parallele Schleifleisten mit einer Breite von je 35 mm. Dabei wird ein Strom von 560 A Gleichstrom übertragen.
  - a) Wie groß ist die mittlere Stromdichte in den Kontaktflächen?
  - b) Wie viele Elektronen werden pro Sekunde übertragen?



Foto: Stemann Technik

## **Übung 3 – Bahnenergieversorgung, Ströme**

### **Vorbemerkung**

Der elektrische Triebwagen aus Übung 1 besitzt eine installierte Leistung von 1,0 MW. Er wird im Vorortverkehr auf einer Gleichstrombahn eingesetzt, deren Oberleitung aus zwei parallel verlegten Fahrdrähten Ri120 mit je 120 mm<sup>2</sup> Querschnitt und aus einem Tragseil Bz-II150 mit 150 mm<sup>2</sup> Querschnitt besteht. Der Widerstandsbelag dieser Oberleitung beträgt 52,5 mΩ/km.

Vergleichend soll betrachtet werden, wie sich die Ströme und Spannungsfälle bei unterschiedlichen Fahrleitungsnennspannungen verhalten. Nennspannungen leistungsfähiger Nahverkehrssysteme betragen üblicherweise entweder DC 750 V oder DC 1500 V.

### **Aufgabe**

- a) Wie groß sind die zu erwartenden Ströme bei den beiden Spannungsebenen, wenn sich das Fahrzeug unmittelbar am Unterwerk befindet?
- b) Bei gleichstrombetriebenen Vorortbahnen, Straßen-, U- und Stadtbahnen sind Unterwerksabstände von 1 bis 3 km üblich. Wenn sich das Fahrzeug gerade 3 km vom Unterwerk entfernt befindet, so muss der Strom vom Unterwerk über die Fahrleitung zufließen und verursacht dabei einen Spannungsfall über der Fahrleitung. Welche Spannung steht noch am Fahrzeug zur Verfügung? Wie hoch ist der relative Spannungsfall?
- c) Einem Fahrzeug, welches sich nicht direkt am Unterwerk befindet, steht also weniger Spannung am Stromabnehmer zur Verfügung. Was bedeutet das für das Fahrzeug? Berechnen Sie die Leistung, welche das 3 km vom Unterwerk entfernte Fahrzeug aufnimmt.
- d) Welche (Verlust-)Leistung wird in der Fahrleitung in Wärme umgewandelt?

Die niedrigste, zulässige Dauerspannung in der Fahrleitung beim Stromsystem 750 V DC beträgt (nach DIN EN 50163) 500 V. Steht einem Fahrzeug am Ort der Stromentnahme die Fahrleitungsmindestspannung von 500 V nicht dauerhaft zur Verfügung, so lösen die Schutzeinrichtungen des Triebfahrzeuges selbsttätig aus und schalten das Fahrzeug ab, um es vor zu hohen Strömen zu schützen, die zur Schädigung bzw. Überhitzung der Motoren und der Leistungssteuerung führen können.

- e) Der größte zulässige Spannungsfall über der Fahrleitung beträgt 250 V. Welcher Strom darf in dem 3 km langen Fahrleitungsstück maximal fließen, ohne diesen Grenzwert zu verletzen? Was würde passieren, wenn mehr Strom fließen würde?
- f) Welche Leistung kann maximal in 3 km Entfernung vom Triebfahrzeug abgenommen werden?
- g) Wie könnte man Abhilfe schaffen, damit das Fahrzeug trotzdem seine Maximalleistung nutzen kann?

## Übung 4 – Spannungsfälle im Fahrleitungsnetz (I)

### Vorbemerkung 1

Ein Wechselstrom-Triebfahrzeug stellt, genauso wie die Fahrleitung, eine ohmsch-induktive Last dar, d.h. außer Wirkleistung wird auch induktive Blindleistung aufgenommen. Der Leistungsfaktor  $\cos\varphi$  eines 16,7-Hz-Triebfahrzeuges mit herkömmlicher Antriebstechnik variiert je nach aktuellem Fahrzustand. Er schwankt typischerweise zwischen 0,70 und 0,90. Der Blindleistungsbedarf kann nicht beeinflusst werden.

Bei Triebfahrzeugen mit Drehstromantriebstechnik hingegen kann dank der elektronischer Leistungsregelung ein beliebiger  $\cos\varphi$  eingestellt werden: die Lok kann sowohl induktive Blindleistung aufnehmen, als auch solche abgeben. Genauso ist es möglich, Blindleistung weder abzugeben noch aufzunehmen, d.h. einen Wirkleistungsfaktor von  $\cos\varphi=1$  zu realisieren.

### Vorbemerkung 2

Bei dem in Deutschland verwendeten Bahnstromsystem AC 16  $\frac{2}{3}$  Hz 15 kV darf die Speisespannung nur um  $-20\%$  bzw.  $+15\%$  von der Nennspannung abweichen. Je weiter man sich vom Unterwerk entfernt befindet, desto größer werden die Spannungsfälle über der Fahrleitung (vgl. Übung 3). Die speisende Unterwerkspannung wird in der Realität deswegen häufig nahe der zulässigen Obergrenze von 17,25 kV (15 kV+15 %) gewählt.

### Aufgabe

An einer elektrifizierten Strecke für AC 16  $\frac{2}{3}$  Hz, 15 kV ist eine Oberleitung der Bauart Re200 installiert, wie sie auf zahlreichen Strecken der Deutschen Bahn zum Einsatz kommt. Sie lässt Geschwindigkeiten von bis zu 200 km/h zu. Die Re 200 besitzt einen Impedanzbelag von  $\underline{Z}'=0,204 \Omega/\text{km} \cdot e^{j(43,4^\circ)}$ .

1. Ein Fahrleitungsabschnitt wird von einem Unterwerk einseitig gespeist. In diesem Abschnitt befindet sich ein Triebfahrzeug, welches einen Strom von 460 A aufnimmt.
  - a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild!
  - b) Ermitteln Sie den Resistanz- und Reaktanzbelag ( $\underline{R}'$  bzw.  $\underline{X}'$ ) der Fahrleitung. Wie groß sind Impedanz  $Z$ , Resistanz  $R$  und Reaktanz  $X$  eines 30 km langen Fahrleitungsabschnittes?
  - c) Zeichnen Sie das Zeigerbild des „Verbrauchers“ Fahrleitung in folgenden Varianten:
    - Zeigerbild der „Widerstände“, Reaktanzen und Impedanzen
    - Zeigerbild der Spannungen und Ströme
    - Zeigerbild der Leistungen
  - d) Berechnen Sie den Betrag des Spannungsfalls über der 30 km langen Fahrleitungsanlage sowie die Schein-, Wirk- und Blindleistung, welche in der Oberleitung anfallen. Woran zeigen sich die berechneten Leistungen?
  - e) Zeichnen Sie das prinzipielle Zeigerbild der Ströme und Spannungen (Größen  $\underline{I}_{\text{Tfz}}$  und  $\underline{U}_{\text{Tfz}}$ ) für ein Drehstrom-Triebfahrzeug mit  $\cos\varphi=1$  und ein konventionelles Triebfahrzeug mit  $\cos\varphi=0,83$ .

## Übung 5 – Spannungsfälle im Fahrleitungsnetz (II)

### Vorbemerkung 1

Bei der Berechnung von Spannungsfällen über der Fahrleitung zeigt sich, dass die Berücksichtigung der Phasenwinkel von Lokomotive und Fahrleitung nur zu einem sehr geringen Fehler gegenüber einer Rechnung mit Beträgen unter Vernachlässigung der Phasenwinkel führen. In erster Näherung mit Fehler  $<5\%$  kann also auch für AC-Bahnnetze mit Beträgen von Strom und Spannung gerechnet werden.

### Vorbemerkung 2

Bei dem in Deutschland verwendeten Bahnstromsystem AC  $16\frac{2}{3}$  Hz 15 kV darf die Speisespannung nur um  $-20\%$  bzw.  $+15\%$  von der Nennspannung abweichen. Je weiter man sich vom Unterwerk entfernt befindet, desto größer werden die Spannungsfälle über der Fahrleitung (vgl. Übung 3). Die speisende Unterwerkspannung wird in der Realität deswegen häufig nahe der zulässigen Obergrenze von 17,25 kV (15 kV+15 %) gewählt.

### Aufgaben

1. a) Wie groß ist bei einseitiger Speisung der Strecke aus Übung 4 die maximal mögliche Speiselänge? Der Traktionsstrom beträgt  $I_{Tz}=460$  A.  
b) Stellen Sie die Spannung am Triebfahrzeug über der Speiselänge grafisch dar!
2. Befindet sich ein zweites Triebfahrzeug mit einer Stromaufnahme von 290 A bei km 35 in dem einseitig gespeisten Speiseabschnitt, verändern sich die Spannungsfälle in der Fahrleitung. Das erste Triebfahrzeug (460 A) befindet sich jetzt am km 23.
  - a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild!
  - b) Wie groß sind die Spannungen an den Triebfahrzeugen?
  - c) Stellen Sie die Fahrleitungsspannung über der Speiselänge grafisch dar!
4. Um die Spannungsfälle in der Fahrleitung gering zu halten, wird die zweiseitige Speisung angewendet, d.h. die Spannung wird am Anfang und am Ende des Fahrleitungsabschnittes eingespeist. Der Abstand der beiden Unterwerke beträgt 60 km.
  - a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild!
  - b) Ein Triebfahrzeug befindet sich 25 km vom Unterwerk 1 entfernt. Welche Anteile des Traktionsstromes  $I=460$  A liefern die beiden Unterwerke?
  - c) Wie groß ist die Spannung am Triebfahrzeug?
  - d) Stellen Sie die Spannung am Triebfahrzeug über der Speiselänge grafisch dar!

## Übung 6 – Einphasensystem

### Vorbemerkung 1

Die Eisenkerne von Transformatoren höherer Leistungen werden, um die so genannten „Wirbelstromverluste“ klein zu halten, grundsätzlich aus voneinander isolierten Blechen aufgebaut. Diese Dynamo-bleche mit 0,25..0,50 mm Dicke werden übereinander geschichtet und derart gegeneinander verspannt, so dass das Eisenjoch des Trafos entsteht. Infolge der geblechten Ausführung verringert sich, ausgedrückt durch den Eisenfüllfaktor  $\varphi_{FE}$ , die magnetische Leitfähigkeit des Eisenkerns.

### Vorbemerkung 2

Begrenzende Größe der Leistung von Transformatoren ist vor allem die magnetische Induktion („Tragfähigkeit“) im Eisenkern. Typischerweise beträgt die wirtschaftlich nutzbare, maximale Kerninduktion 1,6..1,8 T (1 Tesla=1 Vs/m<sup>2</sup> [magnetischer Fluss pro Querschnittsfläche]). Um den Bauraum zu begrenzen werden Lokomotivtransformatoren häufig mit Induktionen von bis zu 2,0 T ausgelegt, was sich in relativ schlechten Wirkungsgraden der Trafos zeigt.

### Aufgabe

1) Ein 50-Hz-Einphasentransformator mit einer Scheinleistung von 250 kVA und einem Spannungsübersetzungsverhältnis von 10/0,22 kV besitzt einen fünfstufigen Kernquerschnitt (geometrischer Ausnutzungsfaktor  $k_A=0,908$ ) mit einem Durchmesser von 14,1 cm. Gegeben ist ferner die Kerninduktion und ein Eisenfüllfaktor von  $\varphi_{FE} 0,96$ .

- Zeichnen Sie das Trafo-Ersatzschaltbild und bestimmen Sie das Übersetzungsverhältnis ü.
- Welcher maximale, magnetische Fluss herrscht im Eisenkern des Transformators, wenn der Spitzenwert der Kerninduktion  $\hat{B}=1,6$  Vs/m<sup>2</sup> beträgt?
- Welche Windungszahl(n) muss der Transformator primär- bzw. sekundärseitig besitzen, um diesen Fluss zu erzeugen?
- Zeichnen Sie das Zeigerdiagramm!

2) In der Zuleitung eines Wechselstrommotors für 220 V fließt ein Strom von 40 A. Der Leistungsfaktor beträgt  $\cos(\varphi) = 0,85$  bei einer Frequenz von 50 Hz.

- Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild und bezeichnen Sie die interessierenden elektrischen Größen!
- Wie groß sind die Scheinleistung, die Wirkleistung und die Blindleistung des Motors?
- Berechnen Sie Impedanz Z, Resistanz R und Reaktanz X des Motors.
- Um die Aufnahme induktiver Blindleistung zu reduzieren, wird ein Kondensator mit einer Kapazität von 1500µF in Reihe zum Motor geschaltet. Skizzieren Sie das (prinzipielle) Zeigerdiagramm der Anordnung.
- Berechnen Sie die neue Gesamtimpedanz des Netzes (Betrag und Phasenlage). Welcher Strom stellt sich ein?
- Berechnen Sie die Wirk- und Blindleistungsaufnahme des Motors mit vorgeschaltetem Kondensator und den neuen Wirkleistungsfaktor  $\cos(\varphi)$ . Was fällt auf? Welchen Einfluss hat die zusätzliche Kapazität?

## Übung 7 – Dreiphasensystem

### Vorbemerkung

In modernen elektrischen Fahrzeugen werden heute (fast) ausschließlich Asynchron-Drehstrommotoren als Fahrmotoren eingesetzt.

### Aufgabe

1. Auf dem Leistungsschild eines Fahrmotors eines U-Bahn-Wagens ist angegeben:
  - Leiter-Leiter-Spannung (Nennspannung): 726 V
  - Nennleistung: 300 kW
  - Leistungsfaktor: 0,91
  - Y-Schaltung
- a) Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild des Motors. Tragen Sie die Strangströme und Strangspannungen ein.
- b) Wie viel Strom fließt bei Nennbetrieb des Motors in der Zuleitung?
  
2. Berechnen Sie die, von einem Dreiphasengenerator abgegebenen Schein-, Wirk- und Blindleistung, wenn die Nennspannung  $U_N=380$  V beträgt und der abgenommene Strom 120 A beträgt. Der Leistungsfaktor ist 0,80.
3. Mit welcher Stromstärke sind die Wicklungsstränge eines Dreiphasenmotors in Dreieckschaltung belastet, wenn der Strom in den Zuleitungen 80 A beträgt?
4. Gegeben ist eine Dreieckschaltung mit den Widerständen  $R_{12}$ ;  $R_{23}$ ;  $R_{13}$ . Leiten Sie die Berechnungsgleichungen für die Widerstände  $R_{10}$ ,  $R_{20}$  und  $R_{30}$  der zugehörigen Stern-Ersatzschaltung ab. Zeichnen Sie die jeweiligen Ersatzschaltbilder.

*Hinweis: Beide Schaltungen können hinsichtlich des Strom-Spannungs-Verhaltens an den Klemmen 1, 2 und 3 jeweils als Ersatzschaltung der anderen betrachtet werden.*