

Z-v-Diagramm einer Universallokomotive

Das Lastenheft einer Hochleistungs-Universallokomotive sieht – vereinfacht – folgende drei Lastfälle in der Beharrungsfahrt ($a = 0$) vor, die das Z-v-Diagramm als Eckwerte bestimmen sollen:

1. Intercity-Zug	Masse (mit Lok.)	m_1	570 t
	Anzahl der Wagen	n_1	15
	Geschwindigkeit	v_1	220 km/h
	Steigung	s_1	5 ‰
2. Ganzgüterzug	Masse (mit Lok.)	m_2	2200 t
	Geschwindigkeit	v_2	120 km/h
	Steigung	s_2	5 ‰
3. Gemischter Güterzug	Masse (mit Lok.)	m_3	2000 t
	Geschwindigkeit	v_3	75 km/h
	Steigung	s_3	10 ‰

Für die Laufwiderstände sind die DB-Formeln nach *Sauthoff* (für 1.) bzw. nach *Strahl* (2. bzw. 3.) nach 2.2.1 zu verwenden. Der Bogenwiderstand braucht nicht berücksichtigt zu werden, da s als "maßgebende Steigung" diesen schon beinhalten soll ("kompensierte Kurven"). Lastfall 3 soll die Nennzugkraft bestimmen; die dort ermittelte Zugkraft soll auch für den Anfahrpunkt gelten.

- Wie groß sind die Nennleistung P_N und die Nenn-Anfahrzugkraft Z_A ?
- Bei welcher Geschwindigkeit v wird die Nennleistung erreicht?
- In die Skizze der Zugkräfte Z (in kN) in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit soll die Reibungszugkraft nach *Curtius* und *Kniffler* eingetragen werden, wobei eine Lokomotivmasse von 84 t anzusetzen ist!
- Wie groß sind – unter Vernachlässigung der Zugkraftbegrenzung durch den Kraftschlussbeiwert – die erreichten Anfahrbeschleunigungen *in der Ebene* in den drei Lastfällen?

Mechanische Auslegung einer Universallokomotive

Die in Übung 1 leistungsmäßig dimensionierte Universallokomotive soll als vierachsige Drehgestelllokomotive mit einer Dienstmasse von 84 t ausgeführt werden. Weitere Daten:

- ◆ Radsatzabstand $2a = 3000 \text{ mm}$
- ◆ Drehgestellmittenabstand $2b = 9900 \text{ mm}$
- ◆ Zughakenkraft $F_H = 300 \text{ kN}$
- ◆ Zughakenhöhe über SO $h_H = 1030 \text{ mm}$

Wie tief darf der Angriffspunkt der Zugkraftanlenkung im Drehgestell (über SO) gelegt werden, damit die *resultierende Summe der Aufstandskräfte im Drehgestell* bei Anfahrt mit Nennzugkraft 95% der statischen Aufstandskräfte nicht unterschreitet?

Berechnen Sie die Aufstandskräfte aller vier Radsätze und geben Sie die prozentuale Radsatzentlastung an!

Im weiteren Entwurfsverlauf wurde festgelegt:

- ◆ Raddurchmesser (neu) $D_0 = 1250 \text{ mm}$
- ◆ maximale Radreifenabnutzung $\delta R = 40 \text{ mm}$

Wie ist die Getriebeübersetzung i (= Verhältnis Antriebs- zu Abtriebsdrehzahl) zu wählen, dass bei

- ◆ $v_{\max} = 220 \text{ km/h}$, abgenutzten Radreifen und vernachlässigtem Schlupf s_x die zulässige Motordrehzahl von

- ◆ $n_{\text{Mot, max}} = 3950 \text{ min}^{-1}$

nicht überschritten wird? Wie groß ist dann - bei vorausgesetzter Einzelradsatzsteuerung und Vorgabe der Motordrehmomente proportional zur Radaufstandskraft - das Drehmoment des höchstbelasteten Motors (bei neuen Radreifen)? Dabei ist ein

- ◆ Getriebewirkungsgrad $\eta_G = 0,98$ anzusetzen!

Mittlere Reisegeschwindigkeit einer U-Bahn

Gegeben ist ein U-Bahn-Zug mit einer Masse von 90 t, der unter Nennbedingungen eine Anfahrbeschleunigung von $a_a = 1,2 \text{ m/s}^2$ bis zu einer Geschwindigkeit $v_1 = 36 \text{ km/h}$ einhalten soll; der Zuschlagsfaktor für die rotierenden Massen betrage $\xi = 1,11$. Bis zur Höchstgeschwindigkeit $v_E = 80 \text{ km/h}$ geht die Zugkraft entsprechend der Leistungshyperbel zurück; für den Bremsbetrieb ist ein spiegelbildliches Verhalten anzusetzen. Der Fahrwiderstand darf vernachlässigt werden.

1. Wie groß sind die Nennanfahrzugkraft Z_A und die Nennleistung P_N ?
2. Man berechne die Zeiten t_1 bzw. t_E , zu denen die Geschwindigkeiten v_1 bzw. v_E erreicht

werden. Die Lösung der Differentialgleichung $\frac{dv}{dt} = \frac{K}{v}$ ist $v = \sqrt{2 \cdot K \cdot t + C}$

3. Man bestimme die zu den Zeitpunkten t_1 und t_E zurückgelegten Wege s_1 bzw. s_E !

$$\int \sqrt{a \cdot x + b} \cdot dx = \frac{2}{3 \cdot a} \cdot \sqrt{(a \cdot x + b)^3}$$

4. Man bestimme den Zeitverlust bei Beschleunigung und beim Bremsen!
5. Wie groß ist die mittlere Reisegeschwindigkeit \bar{v} bei einem mittleren Haltestellenabstand $L = 1000 \text{ m}$ und einer mittleren Haltezeit in den Stationen von $\bar{t}_H = 20 \text{ s}$?

	Elektrische Bahnen	Ü 504
---	---------------------------	--------------

Gleichstromstellergespeister Gleichstrom-Traktionsmotor

Ein fremderregter Gleichstrommotor eines U- oder S-Bahn-Antriebs mit einer Nennspannung $U_{AN} = 750 \text{ V}$ und einer Nennleistung $P_N = 300 \text{ kW}$ soll über einen Gleichstromsteller mit einer Schaltfrequenz von $f_Z = 500 \text{ Hz}$ aus der 750-V-Fahrleitung gespeist werden.

Die Verluste aller Bauteile dürfen vernachlässigt werden.

1. Bestimmen Sie die erforderliche Induktivität L_2 der (linear anzunehmenden) Glättungs-drosselspule, so dass die Schwankungsweite des Motorstroms $\Delta i_2 / \overline{i_2}$ 40 % nicht übersteigt!
2. Bestimmen Sie die erforderliche Kapazität C_1 des EingangsfILTERKONDENSATORS (unter der vereinfachenden Annahme unendlich großer Eingangsinduktivität L_1), so dass die Schwankungsweite der Filterspannung $\Delta u_1 / \overline{u_1}$ den Wert 10 % nicht übersteigt!
3. Stellen Sie $\Delta i_2 / \overline{i_2}$ sowie $\Delta u_1 / \overline{u_1}$ in einem Diagramm in Abhängigkeit von der Aussteuerung a des Stellers dar!
4. Die Eckfrequenz des Eingangsfilters soll $f_e = 35 \text{ Hz}$ betragen. Wie groß ist die Induktivität L_1 zu wählen, wenn C_1 aus Teilaufgabe 2 verwendet wird und die Induktivitäten der Zuleitung und des Unterwerks vernachlässigt werden?
5. Bestimmen Sie die taktfrequente Komponente des Netzstroms $I_{N(500 \text{ Hz})}$; dabei darf bei der harmonischen Analyse der Stellerstrompulse die Dachschräge vernachlässigt werden! Wie groß ist $\Delta u_1 / \overline{u_1}$ jetzt (Rechnung nur mit taktfrequenter Komponente!)?

Asynchronfahrmotoren für Universallokomotive 6400 kW

Die in Ü501 und Ü502 definierte und mechanisch ausgelegte Universallokomotive 6400 kW soll mit Asynchron-Kurzschlussläufermotoren ausgerüstet werden, deren elektrische Daten bestimmt werden sollen.

1. Man berechne die elektrische Drehkreisfrequenz ω am Leistungspunkt $v_1 = 76,8$ km/h mit neuen Radreifen ($D_0 = 1250$ mm, $i = 3,96$) für einen vierpoligen Motor!
2. Die Streuinduktivität L_σ bestimmt sich aus der Forderung, dass der Motor bei höchster Fahrgeschwindigkeit und ganz abgenutzten Radreifen ($\delta R = 40$ mm) ein der um 5% erhöhten Nennleistung entsprechendes Drehmoment gerade mit seinem Kippmoment erbringt. Der Zuschlag von 5 % soll die bei Einzelachssteuerung mögliche Zugkrafterhöhung entsprechend der Radsatzlasterhöhung ermöglichen und einen Sicherheitszuschlag enthalten. Der speisende U-WR habe eine Zwischenkreisspannung von $U_d = 2800$ V und wird im betrachteten Betriebspunkt mit Grundfrequenztaktung betrieben. Wie groß ist am Kippunkt mit konstanter Spannung die Rotorkreisfrequenz ω_r ? Die Rotorkurzschlusszeitkonstante L_σ/R_r betrage bei der höchsten Betriebstemperatur von 150 °C 50 ms; der Ständerwiderstand soll vernachlässigt werden.
3. Die (flussunabhängig linear) anzunehmende Magnetisierungsinduktivität L_μ ist aus dem vorgegebenen Streufaktor $\sigma = L_\sigma / (L_\sigma + L_\mu) = 10\%$ zu bestimmen!
4. Im Anfahrbereich ($v \leq v_1$) sollen die Motoren mit kleinstem Ständerstrom betrieben werden; wie groß muß dazu (bei linearer Magnetisierungsinduktivität) die Rotorkreisfrequenz ω_r sein? Bestimmen Sie den für das maximale Drehmoment von $13,7$ kNm (nach Ü 502) erforderlichen Ständer- sowie Magnetisierungsstrom und den Ständerfluss! Zeichnen Sie das Heyland-Kreisdiagramm ($\lambda_i = 200$ A/cm)! Wie groß ist der Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$?
5. Der für den Anfahrpunkt ermittelte Fluss kann am Nenn- = Typenpunkt wegen der erhöhten Eisenverluste nicht zugelassen werden. Der Typenpunkt wird so bestimmt: Er soll mit dem Leistungspunkt zusammenfallen. Bestimmen Sie den Ständer-(Nenn-)fluss-Effektivwert (näherungsweise mit ω_r aus Teil 4), den zugehörigen Magnetisierungsstrom I_μ sowie Rotorkreisfrequenz ω_r und Ständerstrom am Leistungspunkt bei Nennfluss! Wie groß ist $\cos \varphi$?
6. Wie groß sind Ständerstrom und -fluss bei maximaler Frequenz und Leistung nach Teilaufgabe 2? Bitte auch diese Ergebnisse in das Heylanddiagramm eintragen!

Radreifendurchmesserunterschiede bei Gruppenspeisung von ASM

Eine dieselelektrische Lokomotive mit Gruppenspeisung der Fahrmotoren eines Drehgestells kommt zur Reparatur in die Werkstätte: Antriebssatz 1 muss wegen eines Schadens am Fahrmotor ausgetauscht werden. Nach Austausch werden im Drehgestell 1 folgende Radreifendurchmesser gemessen:

$$D_1 = 1118,0 \text{ mm (neu)}$$

$$D_2 = 1107,0 \text{ mm}$$

$$D_3 = 1112,4 \text{ mm}$$

1. Leiten Sie die Abhängigkeit der Drehmomente der (drei) Fahrmotoren allgemein unter der vereinfachenden Voraussetzung gleicher Umfangsgeschwindigkeit ab, wobei $\omega_r \ll \omega_{rK}$ gesetzt werden darf!
2. Tragen Sie die Drehmomente (und die prozentualen Abweichungen vom Mittelwert) in die unten stehende Tabelle ein (Auszug aus dem M_d - n -Diagramm des Fahrmotors; $p = 2$) und stellen Sie das Ergebnis grafisch dar!
3. Bestimmen Sie die Gesamtleistung P_{Ges} der Lokomotive am Radreifen unter der Voraussetzung, dass Drehgestell 2 wie Drehgestell 1 gesteuert wird; der Getriebewirkungsgrad darf zu 1 gesetzt werden! Tragen Sie P_{Ges} in das Diagramm ein! Berechnen Sie die Geschwindigkeit, wobei die Getriebeübersetzung $i = 83:16$ ist (kein mechanischer Schlupf)!

$\bar{n} / \text{min}^{-1}$	0	337	666	1480	3190	3435
M_{dsoll} / Nm	15.000	15.000	7.620	3.430	1.590	1370
f_r^* / Hz	0,4	0,4	0,3	0,66	1,2	1,2
\bar{f} / Hz						
M_{d1} / Nm						
$\delta M_{d1} / M_d$						
M_{d2} / Nm						
$\delta M_{d2} / M_d$						
M_{d3} / Nm						
$\delta M_{d3} / M_d$						
P_{Ges} / kW						
$v / \text{km/h}$						

Vierquadrantsteller für Universallokomotive 6400 kW mit ASM

Die in Ü 501, Ü 502 und Ü 506 ausgelegte Universallokomotive für 6400 kW mit Asynchron-Kurzschlussläufer-Fahrmotoren soll mit je zwei Vierquadrantstellern pro Drehgestell aus dem 16,7-Hz-15 kV-Bahnnetz gespeist werden.

1. Man berechne die Eingangsleistung eines Vierquadrantstellers (4q-S) bei Fahr-Nennleistung von 6400 kW am Radumfang bei 5% Drehgestellmehrbelastung (Ü502) unter Annahme folgender pauschaler Wirkungsgrade:

$$\eta_{\text{Getriebe}} = 0,98$$

$$\eta_{\text{Motor}} = 0,95$$

$$\eta_{\text{WR}} = 0,985.$$

Die Verluste von 4q-S und Saugkreis sollen vernachlässigt werden!

2. Die 4q-S haben folgende Daten:

$$U_{\text{dN}} = 2800 \text{ V}$$

$$f_z = 250 \text{ Hz}$$

$$T_{\text{min}} = 200 \text{ } \mu\text{s}$$

Berechnen Sie die maximale Stellerspannung U_{Smax} !

3. Mit $u_{\text{xN}} = 0,333$ und $u_{\text{rN}} = 0,05$ ist die sekundäre Transformator-Leerlaufspannung U_{F} so zu bemessen, dass bei 15 % Netzüberspannung und $\cos \varphi_1 = +1$ die maximale Stellerspannung nicht überschritten wird. Man beachte, dass u_{xN} und u_{rN} für U_{FN} definiert sind!
4. Man berechne für Netznennspannung den Stellereingangsstrom und damit die absoluten Werte der Transformator-Streuinduktivität und des Transformator-Längswiderstands! Berechnen Sie U_{S} und ψ_1 !
5. Man gebe den Ausgangs-Gleichstrom \bar{i}_{d} und den Effektivwert des Saugkreisstroms I_{d2} an! Wie groß sind C_2 und L_2 zu wählen, wenn die Amplitude der Wechselkomponente der Saugkreiskondensatorspannung 800 V nicht überschreiten soll?
6. Wie groß ist der Effektivwert des dem Stellereingangsstrom überlagerten Wechselanteils?
7. Man bestimme I_{F} , U_{S} , ψ_1 , \bar{i}_{d} und I_{d2} für den Netz-Bremsbetrieb bei Netznennspannung, wenn die Bremsleistung am Rad gleich der negativen Fahrleistung gefordert ist!
8. Im Bremsbetrieb ist bei maximaler Fahrdrachtspannung ($1,15 \cdot U_{\text{FN}}$) ein Verschiebungswinkel von 164° erforderlich, um die maximale Stellerspannung einzuhalten ("Induktives Bremsen"). Man bestimme I_{F} , ψ_1 , \bar{i}_{d} und I_{d2} und weise nach, dass $U_{\text{S}} \leq U_{\text{Smax}}$!

	Elektrische Bahnen	Ü 509
---	---------------------------	--------------

Bremswege eines Straßenbahnzuges mit und ohne Magnetschienenbremse

Ein vollbesetzter achtachsiger Straßenbahn-Doppeltriebwagen (wie Stuttgart DT 8) mit einer Gesamtmasse von $m = 85 \text{ t}$ soll auf einer 70 ‰-Gefällestrecke aus einer Geschwindigkeit von $v_0 = 45 \text{ km/h}$ mit Hilfe der Magnetschienenbremse (MSB) und/oder der Radbremse zum Stehen gebracht werden, wobei die jeweils erzielten Bremswege zu bestimmen sind.

Weitere Daten:

- Kraftschlussbeiwert der Räder beim Bremsen $f_R = 0,15$
 - 8 Bremsmagnete, Anpresskraft eines Magneten $F_{NM} = 60 \text{ kN}$
 - Reibbeiwert der Bremsmagnete $f_M = 0,2$
 - Zuschlag für rotierende Massen nach Abschnitt 2.2.4 $\xi = 1,11$
(wie Übung 17.3)
1. Bestimmen Sie die Gesamtbremskraft der Räder!
 2. Bestimmen Sie die Gesamtbremskraft der Magnete!
 3. Bestimmen Sie die Bremsverzögerung a_b sowie den Bremsweg s_b
 - a) bei Bremsung mit Radbremse und MSB im Gefälle 70 ‰
 - b) bei Bremsung nur mit Radbremse im Gefälle 70 ‰
 - c) bei Bremsung mit Radbremse und MSB in der Ebene
 - d) bei Bremsung nur mit Radbremse in der Ebene
 4. Die letzten beiden Berechnungen sind für $v_{0,\max} = 80 \text{ km/h}$ zu wiederholen!

Speisung von elektrifizierten Bahnstrecken aus dem 50-Hz-Landesnetz

In dieser Übung sollen Argumente überprüft werden, die für Elektrifizierungsvorhaben in den 60er Jahren entscheidend waren. Bei heutigen Systementscheidungen sind noch viele zusätzliche Fragen zu untersuchen!

Ein zweigleisiger, elektrifizierter Streckenabschnitt der Länge $L = 80$ km werde beidseitig von gleichen Unterwerken mit den Transformatoraten

$$S_N = 20 \text{ MVA}$$

$$U_0 = 1,1 U_N$$

$$u_x = 10 \% \text{ (bei } U_0 \text{ definiert!)} \quad u_r = 0$$

gespeist. Die – quergekuppelten – Fahrleitungen werden durch die Parameter

$$l' = 1,2 \text{ mH / km}$$

$$r' = 0,118 \text{ } \Omega \text{ / km}$$

beschrieben. Die Kurzschlussleistung des speisenden Netzes werde als unendlich groß angenommen. Die Verbraucher sind in der Mitte des Speiseabschnitts konzentriert anzunehmen.

1. Der Abschnitt werde mit $U_N = 15$ kV, $f_N = 16^{2/3}$ Hz gespeist; es werden überwiegend Fahrzeuge mit WS-Kommutatormotoren vorausgesetzt. Wie groß darf die mit einem anzunehmenden Grundschiebungsfaktor $\cos \varphi = 1$ entnommene Leistung sein, dass die Spannung am Stromabnehmer auf $0,9 \cdot U_N$ zurückgeht?
2. Wie hoch ist die Nennspannung U_N (bei gleichen Trafo- und Streckendaten) zu wählen, dass bei einer Netzfrequenz von 50 Hz und einem Grundschiebungsfaktor $\cos \varphi = 0,91$ ind. die Spannung am Stromabnehmer wie bei $16^{2/3}$ -Hz-Speisung auf $0,9 \cdot U_N$ zurückgeht? ($\cos \varphi = 0,91$ berücksichtigt den überwiegenden Einsatz von Fahrzeugen mit Thyristorsteuerung; der Querschnitt der Leitung und damit der ohmsche Belag soll – ungeachtet der kleineren Ströme – konstant angenommen werden, um die Rechnung nicht unnötig zu komplizieren!)
3. Bei 50-Hz/25-kV-Speisung werde der Abschnitt (nach 2.) aus den Leitern L1 und L2 eines Drehstromversorgungsnetzes gespeist. Man gebe die Netzströme \underline{I}_{L1} , \underline{I}_{L2} und \underline{I}_{L3} sowie Mitsystem \underline{I}' und Gegensystem \underline{I}'' an!
4. Wie groß muss die Kurzschlussleistung S_K des Drehstromversorgungsnetzes mindestens sein, damit das Gegensystem der Spannung 1% von U_N nicht übersteigt?