Bremswiderstände

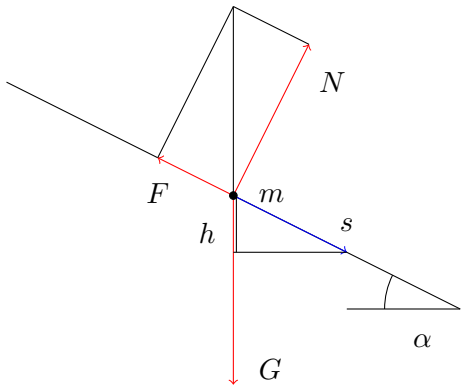

Abbildung 1: Masse m auf schiefer Ebene

Wenn ein Körper sich auf einer schiefen Ebene abwärts bewegt, wird potentielle Energie freigesetzt. Bewegt sich der Körper um die Strecke s abwärts und hat die Ebene den Neigungswinkel α, so leistet das Gravitationsfeld die Arbeit

$$W = F\,s = G\,s\,\sin\alpha = G\,h = m\,g\,h\,. \tag{1}$$

Die freigesetzte Leistung ist

$$P = \frac{dW}{dt} = m\,g\,\frac{dh}{dt} = m\,g\,\frac{ds}{dt}\,\sin\alpha = m\,g\,v\,\sin\alpha\,. \tag{2}$$

Wenn der Körper der Triebwagen einer Bergbahn, z.B. einer Zahnradbahn, ist, kann diese Leistung im Prinzip als elektrische Leistung abgegeben werden, indem die Fahrmotoren als Generatoren betrieben werden.

Das wurde bei der Gornergrat Bahn schon 1898 realisiert [1].

> Die Gornergrat Bahn nutzt die Rekuperation, um Ihre Energieeffizienz zu steigern. Alle Züge haben Asynchronmaschinen als Fahrmotoren, die bei der Talfahrt überschüssige Energie zurück ins Netz speisen. So können bergwärts fahrende Züge diese Energie nutzen. Diesen Prozess gibt es seit der ersten Fahrt 1898.

Auch bei anderen Bergbahnen, z.B. bei der Vitznau-Rigi-Bahn wird die Bremsenergie ausgenutzt [2].

> Beim Bremsen dienen die Motoren als Generatoren, welche die Bewegungsenergie in Strom umwandeln, der via Traktionsumrichter in die Oberleitung zurückfliesst, anstatt die Bremsenergie in Abwärme umzuwandeln. Eine Talfahrt ist auch bei Unterbruch zur Oberleitung gewährleistet – dank Umwandlung der Bremsenergie in elektrische Energie für die Not-Stromversorgung auf dem Fahrzeug. Als Rückfallebene stehen zudem Bremswiderstände zur Verfügung.

Diese Bremswiderstände sind bei den Triebwagen Bdhe 2/4, die schon 1937 eingesetzt wurden, deutlich zu sehen. Sie sind in dem Aufbau auf dem Dach des Triebwagens untergebracht.

Abbildung 2: Triebwagen Bdhe 2/4 [3]

Abbildung 3: Triebwagen Bdhe 2/4 [4]

Abbildung 4: Triebwagen Bdhe 2/4 [5]

Dieser Triebwagen ist in einem 1938 erschienen Artikel [6] der „Schweizerischen Bauzeitung“ [7] beschrieben.

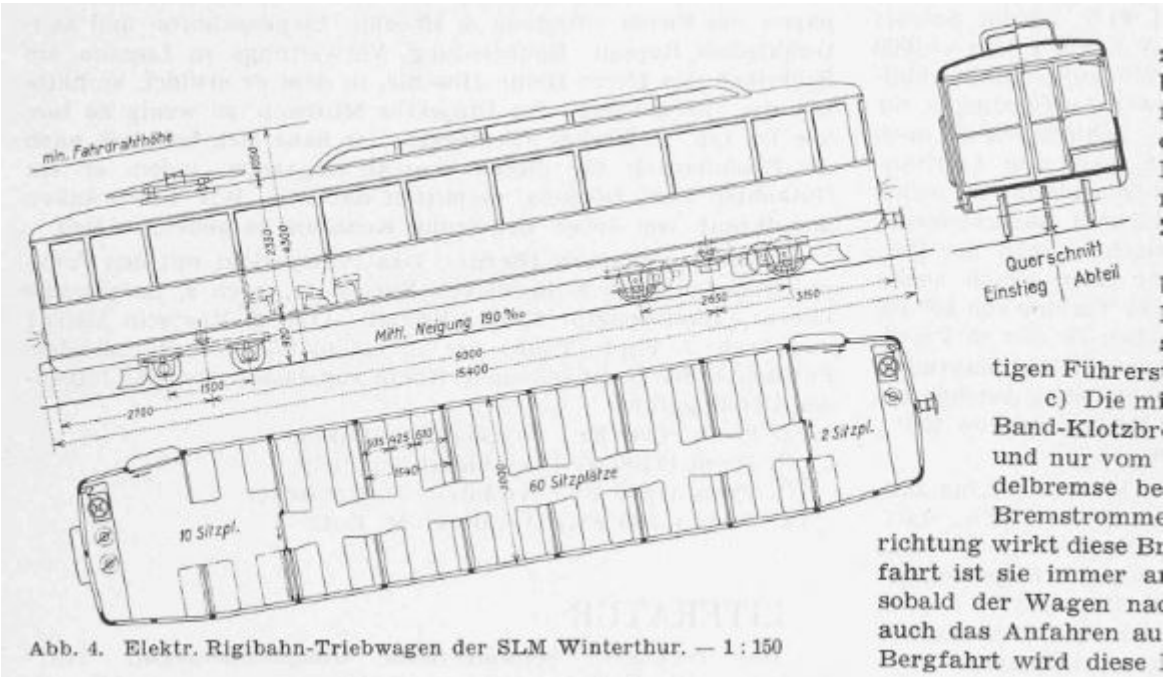

Abbildung 5: Triebwagen Bdhe 2/4 [6]

Der Triebwagen hat eine Länge von 15.4 m. Aus der Abbildung kann entnommen werden, dass der Dachaufbau, der die Bremswiderstände enthält, eine Länge von 7.1 m und eine Breite von 1.2 m hat.

Technische Daten des Triebwagens Bdhe 2/4:

Spurweite:	1435	mm (!)
Länge:	15.4	m
Leermasse:	16.7	t
Sitzplatzzahl	72	
Max. Geschw. Talfahrt	12	km/h

Wenn der Triebwagen mit 72 Passagieren mit je 80 kg (inkl. Gepäck) besetzt ist, beträgt seine totale Masse 22.5 t.

Die maximale Steigung zwischen Vitznau und Rigi beträgt 250 ‰.

Bei der maximalen Steigung ergibt sich aus $\tan\alpha = 0.25$ für α der Wert 14.04° und $\sin\alpha$ wird 0.2425.

Damit ergibt sich bei der Talfahrt eines vollbesetzten Triebwagens an der steilsten Stelle die freigesetzte Leistung

$$P = 22.5 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot \frac{12}{3.6} \cdot 0.2425 = 1.78 \cdot 10^5\,. \tag{3}$$

Wenn keine elektrische Leistung in die Fahrleitung zurück geliefert werden kann, müssen also 178 kW über die Bremswiderstände auf dem Dach des Triebwagens an die Umgebung abgegeben werden.

Die Leistung P muss in Form von Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Dabei gibt es zwei Arten von Wärmetransport:

Konvektion und Leitung
Wärmestrahlung

Somit ist

$$P = \dot{Q}_k + \dot{Q}_s\,. \tag{4}$$

Dabei ist $\dot{Q}_k$ die durch Konvektion und Leitung abgegebene Wärmeleistung und $\dot{Q}_s$ ist die durch Strahlung abgegebene Wärmeleistung.

Es gilt

$$\dot{Q}_k = \alpha\,(T_w - T)\,A_k \tag{5}$$

$$\dot{Q}_s = \varepsilon\,\sigma\,(T_w^4 - T^4)\,A_s\,. \tag{6}$$

Dabei ist

$\alpha =$ Wärmeübergangszahl
$T_w =$ Temperatur der „Wand“, d.h. der heissen Oberfläche
$T =$ Temperatur der Umgebung
$A_k =$ Fläche der „Wand“
$\varepsilon =$ Emissionsgrad
$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{W\ m^{-2}K^{-4}} =$ Stefan-Boltzmann-Konstante
$A_s =$ effektive Fläche der strahlenden Elemente.

Damit die von den Bremswiderständen abgegebene Wärme besser an die Umgebungsluft übertragen werden kann, wird angenommen, dass nicht eine horizontale Fläche aufgeheizt wird, sondern 7 vertikal stehende parallele Lamellen, die 40 cm hoch sind und in einem Abstand von 20 cm zueinander in Fahrtrichtung so angeordnet sind, dass der Fahrtwind zwischen ihnen durchströmen kann. Unter dieser Annahme wird

$$A_k = 2 \cdot 7 \cdot 7.1 \cdot 0.4 = 39.8\,. \tag{7}$$

Der Faktor 2 ergibt sich, weil die Lamellen auf beiden Seiten von der Luft umströmt werden.

Für die Wärmeübergangszahl α kann

$$\alpha = 2 + 12 \cdot \sqrt{v} \tag{8}$$

gesetzt werden [8, 9, 10]. Für $v = 12$ km/h $= 3.33$ m/s wird $\alpha = 23.9$ Wm^{-2}K^{-1}.

Für die Temperaturdifferenz $T_w - T$ wird 200 K angenommen und für den Emissionsgrad der (sicher oxydierten) Heizdrähte wird 0.9 eingesetzt [11].

Da die heissen Lamellenoberflächen sich gegenseitig bestrahlen, kann für die Oberfläche der Abstrahlung nicht A_k eingesetzt werden; als abstrahlende Oberfläche wirkt nur die nach oben gerichtete Fläche der ganzen Anordnung:

$$A_s = 1.2 \text{ m} \cdot 7.1 \text{ m} = 8.5 \text{ m}^2\,. \tag{9}$$

Für die Temperatur T_w der strahlenden Oberfläche wird 500 K angenommen und für die Temperatur T der Umgebung wird 300 K eingesetzt.

Mit diesen Werten ergibt sich

$$\dot{Q}_w = 23.9 \cdot 200 \cdot 39.8 = 1.90 \cdot 10^5 \tag{10}$$

$$\dot{Q}_s = 0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (500^4 - 300^4) \cdot 8.5 = 2.36 \cdot 10^4 \tag{11}$$

und

$$\dot{Q}_w + \dot{Q}_s = 2.14 \cdot 10^5\,, \tag{12}$$

also könnten unter den getroffenen Annahmen 214 kW Bremswärme abgegeben werden.

Die oben berechnete Bremsleistung von 178 kW ist ein Maximalwert, der für die maximale Steigung und die maximale Belegung berechnet wurde.

Wenn für die Temperatur der Bremswiderstände 470 K (197 °C) angenommen wird, ergibt sich

$$\dot{Q}_w = 23.9 \cdot 170 \cdot 39.8 = 1.62 \cdot 10^5 \tag{13}$$

$$\dot{Q}_s = 0.9 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot (470^4 - 300^4) \cdot 8.5 = 1.77 \cdot 10^4 \tag{14}$$

und

$$\dot{Q}_w + \dot{Q}_s = 1.79 \cdot 10^5\,, \tag{15}$$

also 179 kW und damit eine ausreichende Wärmeabgabe.

28. September 2025
A. Ruh

Literatur

[1] https://www.gornergrat.ch/de/stories/nachhaltigkeit-gornergrat-bahn

[2] https://www.electrosuisse.ch/de/mit-energieeffizienten-bahntechnologien-hoch-hinaus/

[3] Triebwagen Bdhe 2/4 Bild 1
https://www.rigi.ch/_Resources/Persistent/37917da543c50ce48429a2d1fd0ca1c346e952ea/Triebwagen2.jpg

[4] Triebwagen Bdhe 2/4 Bild 2
https://www.rigi.ch/_Resources/Persistent/0334206df69e514fb059ea52b16c5f0e35109e7a/Triebfahrzeug2_.jpg

[5] Triebwagen Bdhe 2/4 Bild 3
https://www.rigi.ch/_Resources/Persistent/35f11190f5cba7956e4defc772d69446f3e9a883/Triebfahrzeug2_1.jpg

[6] https://www.e-periodica.ch/cntmng?pid=sbz-002:1938:111::561
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch.

[7] https://doi.org/10.5169/seals-49929
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch.

[8] https://de.wikipedia.org/wiki/Wärmeübergangskoeffizient

[9] Wärmeübergang Luft
https://www.schweizer-fn.de/stoff/wuebergang_gase/wuebergang_gase.php#wueb_luft_ruhend

[10] https://www.chemie.de/lexikon/Wärmeübergangskoeffizient.html

[11] Strahlungswärme
https://www.schweizer-fn.de/stoff/strahlungswaerme/strahlungswaerme.php