

Energetische Abschätzung einer Bonner Seilbahn

Prof. Dr.-Ing. Marc Gennat, Hochschule Niederrhein

Der elektrische Energiebedarf einer Bonner Seilbahn kann mit veröffentlichten Daten abgeschätzt werden, auch wenn der Seilbahntyp noch nicht endgültig festgelegt ist. Die Pläne der Bonner Seilbahn dürften sich in Richtung einer 1S-Seilbahn entwickeln, da die Transportkapazität gemäß Äußerungen auf dem 2. Bonner Bürgerdialog zwischen 1.100 und 1.800 Personen/Stunde ausreichend scheint [2].

Der Energiebedarf für eine 1S-Seilbahn ist in London veröffentlicht worden [5]. Wird diese Bahn auf den Bonner Fall übertragen, so würde die Seilbahn das knapp Neun- bis Vierzehnfache an elektrischer Energie pro Personenkilometer gegenüber Stadt- und U-Bahnen bzw. Oberleitungsbusen benötigen.

Zu einer ersten Abschätzung des Energiebedarfs einer Seilbahn müssen vorab Rahmenbedingungen geklärt werden. Wie auf dem 2. Bürgerdialog dargestellt wurde, ist die Entscheidung für einen Seilbahntyp nicht gefallen, daher kann man weder Betriebskosten noch Energiebedarf endgültig berechnen. Dementsprechend sind die im Folgenden gezeigten Modellrechnungen genau als solche aufzunehmen: es sind

Modellrechnungen für eine 1S-Seilbahn, basierend auf dem tatsächlichen Energiebedarf dieses Seilbahntyps.

Rahmenbedingungen im Bonner Fall

Die hier betrachtete Variante einer Bonner Seilbahn bezieht sich auf den Planfall 2a und 2b [2], die auf dem 2. Bürgerdialog am 5. Oktober 2016 vorgestellt wurden.

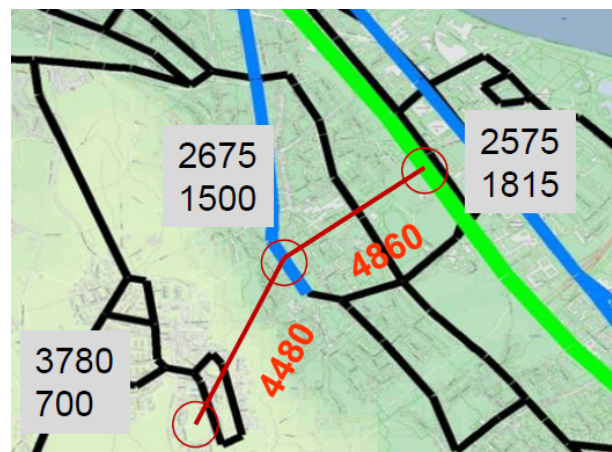


Abbildung 1: Variante 2a und 2b [2]

Tabelle 1: Fahrgäste und Personenkilometer auf der Streckenvariante 2a und 2b

	Fahrgäste Werktag	Fahrgäste Jahr	Strecken- länge	Personen-km im Jahr
Venusberg - Hindenburgplatz	2.133	639.750	1.015 m	649.346 Pkm
Venusberg - Marie-Kahle-Allee	2.348	704.250	1.955 m	1.376.809 Pkm
Hindenburgplatz - Marie-Kahle-Allee	2.043	612.750	940 m	575.985 Pkm
Summe	6.523	1.956.750		2.602.140 Pkm

Die werktäglichen Fahrgastzahlen sind mit den Ein-, Aus- und Umsteiger angegeben. Es gibt in der Daten-grundlage von VSU einen kleinen Fehler — obwohl 4860 Fahrgäste ab/bis zur östlichen Endhaltestelle fahren, steigen dort nur 4390 Fahrgäste ein und aus —, so dass mit den Daten aus Tabelle 1 fortgefahren wird.

Die Gesamtzahl der Fahrgäste im Jahr wird analog zur Hochrechnung der Reisezeitdifferenzen in der standardisierten Bewertung [4] aus den werktäglichen Zahlen mit dem Faktor 300 bestimmt. Die Streckenlänge wird aus dem Streckenverlauf ermittelt. Die Transportleistung der Seilbahn kann somit auf 2,6 Millionen Personenkilometern im Jahr direkt mit den im 2. Bürgerdialog vorgestellten Zahlen abgeschätzt werden.

Weiterhin wurde angegeben, dass die Fahrgeschwindigkeit mit 7 Metern pro Sekunde, also 25 km/h angenommen wird. Bei einer 3S-Seilbahn mit 35 Personen pro Gondel würde ein 2 Minuten Takt ausreichen, um 1050 Personen pro Stunde befördern zu können. Würde mit einer 1S-Seilbahn und 8 Personen pro Gondel weitergeplant, so müsste alle 27 Sekunden eine Gondel losfahren. Mehr Annahmen sind für eine erste Abschätzung des Energiebedarfs der Bonner Seilbahn nicht notwendig.

Energieverbrauch der Londoner Emirates Air Line Seilbahn

Die britischen Behörden und angeschlossenen Institutionen müssen gemäß Freedom of Information Act [3] den Bürgern Auskunft erteilen. Ein Bürger hat eine Anfrage zum Energieverbrauch gestellt [5], die Ergebnisse sind in Tabelle 2 wiedergegeben.

Da keine Tourismusbahn mit einer in den ÖPNV eingebundenen Bahn direkt verglichen werden kann, müssen die Energieverbräuche sowohl bezüglich der Geschwindigkeit als auch bezüglich der Betriebszeiten angepasst werden. Daher wird im ersten Schritt der durchschnittliche stündliche Verbrauch der Londoner Seilbahn ermittelt, in dem der Gesamtverbrauch durch die Betriebszeiten geteilt wird. Die Emirates Air Line wird gemäß Transport For London zu den angegebenen Zeiten [6] betrieben. Die Betriebszeiten belaufen sich gemäß Addition der einzelnen Jahreszeiten

$$\begin{aligned}
 h_{\text{Jahr}} &= 181 \text{ Tage} \cdot 14,57 \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} \\
 &+ 91 \text{ Tage} \cdot 15,29 \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} \\
 &+ 93 \text{ Tage} \cdot 16,00 \frac{\text{Stunden}}{\text{Tag}} = 5400 \text{ Stunden}
 \end{aligned}$$

insgesamt auf 5400 Stunden im Jahr und die Geschwindigkeiten können bei der 1100 Meter langen Londoner Seilbahn gemäß Tabelle 3 bestimmt werden.

Tabelle 2: Emirates Air Line Energiebedarf

	Q1 2013	Q2 2013	Q3 2013	Q4 2013	Jahr 2013
Seilbahnsystem	180.415 kWh	186.537 kWh	198.215 kWh	187.866 kWh	753.033 kWh
restliches System	94.592 kWh	87.500 kWh	74.705 kWh	84.221 kWh	341.018 kWh
Gesamtsystem	275.007 kWh	274.037 kWh	272.920 kWh	272.087 kWh	1.094.051 kWh

Tabelle 3: Emirates Air Line Betriebs- und Fahrzeiten

	Transport for London Fahrzeitangabe	Fahrzeit Minuten	Geschwin- digkeit
Monday to Friday between 07-09:0	approximately five minutes	5	3,67 m/s
After 19:00 every day	12-13 minutes (night flight exp.)	12	1,53 m/s
All other times	approximately 10 minutes	10	1,83 m/s
Durchschnittliche Geschwindigkeit (5400 Betriebsstunden)			2,04 m/s

Tabelle 4: Abschätzung maximaler Leistungsbedarf bei 7 Metern pro Sekunde

	London Jahr 2013	Leistung Energie/Stunde bei 2,04 m/s und 5400 Betriebsstunden	Leistung Energie/Stunde bei 7 m/s
Seilbahnsystem	753.033 kWh	139 kW	455 kW
restliches System	341.018 kWh	63 kW	63 kW
Gesamtsystem	1.094.051 kWh	203 kW	518 kW

Die Londoner Emirates Air Line ist als Tourismusbahn im Durchschnitt mit zwei Metern pro Sekunde, dies entspricht 7,2 km/h, sehr langsam unterwegs. Im Bonner Fall wird mit sieben Metern pro Sekunde von einer dreieinhalbfachen Geschwindigkeit ausgegangen. Gemäß dem Handbuch Energiemanagement Bergbahnen [8] benötigt eine Seilbahn bei 20% schnellerer Fahrt 19% mehr Energie.

Anpassung des Leistungsbedarfs an die Geschwindigkeit

Auch im Alltag wird der doppelte Energiebedarf pro Stunde bei der doppelten Geschwindigkeit direkt ersichtlich: wird mit einem PKW eine Stunde lang mit 50 km/h gefahren und benötigt der Wagen sechs Liter/100 km, so sind drei Liter an Kraftstoff hierfür notwendig. Wird der gleiche PKW mit 100 km/h gefahren und der Luftwiderstand vernachlässigt, so benötigt der Wagen bei sechs Liter/100 km genau sechs Liter Kraftstoff. Doppelte Geschwindigkeit führt zu doppeltem Energiebedarf pro Zeiteinheit.

In Tabelle 4 ist der Londoner Energiebedarf bei der Geschwindigkeit von zwei Metern pro Sekunde auf den Bonner Fall gemäß der von VSU angegebenen Geschwindigkeit von sieben Metern pro Sekunde hochgerechnet worden. Nur das Seilbahnsystem ist hierbei geschwindigkeitsabhängig angenommen worden. Das restliche System mit Beleuchtung, Kommunikation

sowie Aufzügen dürfte keinen höheren Leistungsbedarf bei höheren Seilbahngeschwindigkeiten aufzeigen.

In Tabelle 5 wird nun angenommen, dass der in London ermittelte Energiebedarf neben den Betriebsstunden auch noch tägliche Vorlauf- und Nachlaufzeiten von jeweils 30 Minuten beinhaltet. Damit müssten bei 357 Betriebstagen — neben einem Weihnachtstag ist die Seilbahn zur Wartung an sieben weiteren Tagen außer Betrieb — noch 357 zusätzliche Stunden angenommen werden, womit die Gesamtbetriebsstunden auf etwa 5750 steigen würde. Weiterhin wird mit einer reduzierten Geschwindigkeit von sechs Metern pro Sekunde im energieärmeren Fall — die Annahme mit dem minimalen Leistungsbedarf — gerechnet.

Diese Leistungsaufnahmen werden nun auf den Bonner Fall umgerechnet. Hierbei bleibt unberücksichtigt, dass die Bonner Seilbahnvariante 2a und 2b mit knapp zwei Kilometern deutlich länger ist. Das Bonner Seilbahnsystem muss sowohl mehr Kabel ziehen, dieses Kabel sowie die Gondeln über mehr Rollstationen und Stützen als in London bewegen. Das Kabel selber dürfte ebenso dicker sein und damit schwerer werden. Durch die Zwischenstation — in London gibt es nur die Stationen am Anfang und Ende der Seilbahn — müssen alle Gondeln nochmals beschleunigt werden, damit diese an das Seil gekuppelt werden können. Diese ganzen Einflussfaktoren würden den Energiebedarf einer Seilbahn erhöhen. In dieser ersten Abschätzung werden diese Faktoren allerdings nicht berücksichtigt.

Tabelle 5: Abschätzung minimaler Leistungsbedarf bei 6 Metern pro Sekunde

	London Jahr 2013	Leistung Energie/Stunde bei 2,04 m/s und 5757 Betriebsstunden	Leistung Energie/Stunde bei 6 m/s
Seilbahnsystem	753.033 kWh	131 kW	366 kW
restliches System	341.018 kWh	59 kW	59 kW
Gesamtsystem	1.094.051 kWh	190 kW	425 kW

Tabelle 6: möglicher Energiebedarf einer Bonner Seilbahn mit den Streckenvarianten 2a und 2b

	Leistung Energie/Stunde bei 6 m/s	minimaler Energiebedarf 6700 Betriebsstd.	Leistung Energie/Stunde bei 7 m/s	maximaler Energiebedarf 6342 Betriebsstd.
Seilbahnsystem	366 kW	2.449.383 kWh	455 kW	2.883.746 kWh
restliches System	59 kW	396.870 kWh	63 kW	400.499 kWh
Gesamtsystem	425 kW	2.846.253 kWh	518 kW	3.284.245 kWh
Personenkilometer		2.602.140 Pkm		2.602.140 Pkm
Energie pro Personenkilometer		1,094 kWh/Pkm		1, 262 kWh/Pkm

Um zu überprüfen, ob eine 1S-Seilbahn tatsächlich einen Leistungsbedarf von 366 bis 455 kW benötigen könnte, werden die Werte mit einer Ausarbeitung zur Trierer Petrisberg Seilbahn verglichen. In der Diplomarbeit von Wolfram Auer [1] — betreut wurde diese Arbeit von Prof. Heiner Monheim — wird der Leistungsbedarf einer 1S-Seilbahn mit 430 kW angegeben und liegt damit im hier abgeschätzten Leistungsbereich. Die in der Diplomarbeit untersuchte Seilbahn fährt allerdings langsamer, hat dafür eine höhere Transportleistung.

Spezifischer Energiebedarf einer Bonner Seilbahn

Somit kann der Energiebedarf einer Bonner Seilbahn mit ÖPNV-üblichen Betriebszeiten (montags bis samstags von 6 bis 24 Uhr und sonntags von 8 bis 24 Uhr) abgeschätzt werden.

Hier muss nochmals erwähnt werden, dass die den Energiebedarf steigernden Faktoren, wie eine längere Strecke, mehr Stützen, Seilumlenkungen und mehr Stationen, nicht berücksichtigt sind. Daher könnte der Energiebedarf der Bonner Seilbahn tatsächlich höher liegen. Im Gegenzug kann durch eine weitere Absenkung der Geschwindigkeit und durch Reduzierung des Gondelinsatzes der Energiebedarf gesenkt werden. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass die Reduzierung der Taktes der Gondelabfahrten keinen so großen Effekt auf den Energiebedarf wie eine Geschwindigkeitsreduktion hat, da

- (i) das Gewicht aller Gondeln etwa drei Viertel des Gesamtgewichts der bewegten Massen ist – die Halbierung der Gondelzahl würde die bewegte Masse nur um ein Drittel reduzieren –,
- (ii) Elektromotoren im Teillastbetrieb deutlich höhere Verluste aufweisen und

- (iii) ein beträchtlicher Teil der Energie durch die Umformung des Stahlseils an allen Seilumlenkungen und Rollenstationen thermisch umgesetzt wird.

Tabelle 7: Vergleich spezifischer Energiebedarf verschiedener Verkehrsmittel

	Energie Pers-km
Seilbahn 7 m/s	1,262 kWh/Pkm
Seilbahn 6 m/s	1,094 kWh/Pkm
Stadtbahn	0,125 kWh/Pkm
U-Bahn	0,116 kWh/Pkm
O-Bus	0,089 kWh/Pkm

Diese für die Bonner Seilbahn nun in Tabelle 6 abgeschätzten knapp 1,1 bis 1,3 Kilowattstunden pro beförderten Fahrgast und Kilometer können nun mit anderen innerstädtischen strombetriebenen Verkehrsmitteln verglichen werden. Hierzu wird auf Daten des Verbandes deutscher Verkehrsbetriebe [7] zurückgegriffen, die den elektrischen Energiebedarf pro Personenkilometer von verschiedenen Verkehrsmitteln angibt.

Damit kann in einer ersten Abschätzung gezeigt werden, dass für den Bonner Fall und den angegebenen Randbedingungen eine Seilbahn das knapp Neun- bis Vierzehnfache an Energie pro Personenkilometer gegenüber elektrischen Stadt- und U-Bahnen bzw. Oberleitungsbussen benötigen würde.

Tabelle 8: Vergleich spezifischer Energiebedarf Seilbahn mit anderen Verkehrsmitteln

	Seilbahn 6 m/s	Seilbahn 7 m/s
Faktor zur Stadtbahn	8,8	10,1
U-Bahn	9,4	10,9
O-Bus	12,3	14,2

Literaturverzeichnis

- [1] Wolfrang Auer. “Der Einsatz von Luftseilbahnen als öffentliche Verkehrsmittel in urbanen Räumen”. Diplomarbeit. Universität Trier, 2007.
- [2] Thomas Baum. *Machbarkeitsstudie Seilbahn Bonn - Bürgerdialog 05.10.2016*. Techn. Ber. VSU GmbH, 2016. URL: <https://www.bonn-macht-mit.de/sites/default/files/unit/files/2.Veranstaltung-Zwischenstand%20Machbarkeitsstudie.pdf> (besucht am 31.10.2016).
- [3] *Freedom of Information Act*. Act of Parliament. 2000. URL: <http://www.legislation.gov.uk/ukpga/2000/36/contents> (besucht am 31.10.2016).
- [4] Intraplan Consult GmbH und Verkehrswissenschaftliches Institut Stuttgart GmbH. *Standardisierte Bewertung von Verkehrsweginvestitionen des öffentlichen Personennahverkehrs und Folgekostenrechnung*. Techn. Ber. im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2006.
- [5] Freedom of Information Act. *Emirates Air Line Energy Consumption*. 2016. URL: <https://www.whatdotheyknow.com/request/emirates-air-line-energy-consump?unfold=1> (besucht am 31.10.2016).
- [6] Transport For London. *Emirates Air Line Operating Hours*. 2016. URL: <https://tfl.gov.uk/modes/emirates-air-line/opening-hours-frequency> (besucht am 31.10.2016).
- [7] Verband Deutscher Verkehrsunternehmen. *VDV-Statistik 2009*. Techn. Ber. Verband Deutscher Verkehrsunternehmen, 2010. URL: <https://www.vdv.de/statistik-2009.pdf> (besucht am 31.10.2016).
- [8] Roland Zegg, Thomas Küng und Roman Grossrieder. *Energiemanagement Bergbahnen: Handbuch*. Bern/Chur: Seilbahnen Schweiz und Grischconsulta, 2010.