

Stoppt er die U-Bahn?

In der vorliegenden Szene stoppt Spiderman durch seine Spinnennetze einen Zug, um diesen vor dem Absturz zu bewahren. Beim Betrachten der Szene stellen sich folgende Fragen:

1. Sind die Fäden in der Lage, den Zug aufzuhalten?
2. Ist Spiderman stark genug, um diese Seile zu halten, ohne dass seine Arme herausgerissen werden?

1 | Halten die Fäden die Bremsung aus?

1.1 Der Zug

Bei dem Zug handelt es sich um das 2200-series Modell aus Chicago mit einer Kapazität von 46 Sitzplätzen und einer Masse von $m_{\text{Wagon}} = 21\,500\text{ kg}$. [Wik22a] Geht man davon aus, dass auf jeden Sitzplatz zwei Stehplätze kommen, und der Zug zu 85% ausgelastet ist, sind in einem Wagon

$$n = 85\% \cdot (46 + 2 \cdot 46) = 117,4 \approx 117.$$

In einem Frame kann man ablesen, dass der Zug aus 6 solcher Wagons besteht. Insgesamt sind in dem Zug also $n_{\text{ges.}} = 6 \cdot n \approx 700$ zu rettende Personen. Nach [Mau16] wiegt der durchschnittliche US-Amerikaner $m_{\text{Person}} = 82,6\text{ kg}$. Die Gesamtmasse des Zuges beträgt also

$$m = n_{\text{ges.}} \cdot m_{\text{Person}} + 6 \cdot m_{\text{Wagon}} = 190\,740\text{ kg}.$$

1.2 Der Bremsvorgang

In einem Frame sieht man, dass der Zug eine Ausgangsgeschwindigkeit von 80 Meilen pro Stunde hat. Dies entspricht ca. $v_0 = 35 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. [Wik21] Misst man die Zeit zwischen dem zweiten Versuch, den Zug mittels den Spinnenfäden zu stoppen ($v_E = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), und dem Stillstand, so erhält man das Ergebnis $t = 45\text{ s}$. Mit den Formeln $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ und $F = m \cdot a$ kann man nun die Kraft zum Bremsen¹ bestimmen.

$$F_{\text{Brems}} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} = m \cdot \frac{v_E - v_0}{\Delta t} = -151\,588,3\text{ N}$$

1.3 Die Fäden

Die Frage, die nun noch offen ist, ist, ob die Fäden diese Kraft aushalten können. Nach [Tip+19] ist diese Kraft

$$F_n = \sigma \cdot A, \quad (1)$$

wobei σ die Zugfestigkeit des Materials ist. (bei Spinnenseide: $\sigma = 1,1 \cdot 10^9\text{ Pa}$, [Mül06]). A ist die Querschnittsfläche des Materials. Angenommen die Fäden seien Zylinder, mit der Grundfläche $G = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2$, so kann man zählen, dass Spiderman 16 dieser Fäden spinnt, die Querschnittfläche beträgt also

$$A = 16G = 16 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (2)$$



¹ Diese Kraft ist negativ, weil die Kraft entgegen der Bewegungsrichtung wirkt. Im folgenden rechne ich aus Gründen der Einfachheit mit dem positiven Wert weiter.



Abb. 1: Frame, in dem man die Fäden abzählen kann.

Damit man die Querschnittsfläche und damit auch die Kraft bestimmen kann, muss man den Durchmesser eines Fadens bestimmen: Über Abb. 2 kann man gut mit Hilfe der Größe des Schauspielers Tobey Maguire [Wik22b] die Länge des Gesichts des Komparsen im Hintergrund bestimmen. In einem anderen Frame (Abb. 3) kann man über diese Gesichtsgröße den Durchmesser $d_{\text{ges}} = 0,02 \text{ m}$ eines Fadenbündels (rechts von Spiderman). In Abb. 1 kann man sehen dass diese Fadenbündel aus 8 Fäden bestimmen. Ein Faden hat also den Durchmesser $d = 0,0025 \text{ m}$. Die Kraft, die diese Fäden halten können ist also

$$F_n = \sigma \cdot A = \sigma \cdot 16 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 1,1 \cdot 10^9 \text{ Pa} \cdot 16 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,0025 \text{ m}}{2}\right)^2 = 86\,393,8 \text{ N}$$

Fazit

Die Kraft, die die Fäden maximal aufbringen können, ist gerade einmal $\frac{F_n}{F_{\text{Brems}}} = 0,57\%$ der benötigten Kraft. Mit den verwendeten Werte ist diese Rettungsaktion also nicht möglich.

2 | Ist Spiderman stark genug?

Die Frage die sich letztlich noch stellt ist, ob Spiderman die Kraft aushalten würde, die von den Fäden ausgeht. In dem Marvel-Wiki [Mar22] heißt es:

Spider-Man besitzt übermenschliche Stärke, welche es ihm erlaubt etwa 20 Tonnen zu heben.²

Er hat also die Kraft $F_{\text{Spiderman}} = 20 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot 9,81 = 196\,200 \text{ N}$.

Fazit

Angenommen die Fäden könnten den Zug aufhalten, so wäre Spiderman auch in der Lage diese Kraft zu halten, und den Zug somit zu stoppen.

3 | Abschließendes Fazit

Die Berechnungen haben gezeigt, dass Spiderman zwar in der Lage wäre die benötigte Kraft zu halten, die Fäden aber nicht in der Lage sind, diese Kraft auszuhalten. Durch leichte Abänderung der Werte (vgl. Abschnitt 4) kann man diese so schönern, dass die Rettungsaktion funktionieren könnte.

4 | Wie genau ist das Ergebnis

Im Lauf der Berechnungen wurden viele Annahmen getroffen:

Faktisch belegt	mit Anhaltspunkten abgeschätzt	frei geschätzt
Masse des Zugs	Masse der Passagiere	Zahl der Insassen (Kapazität, Auslastung)
Zugfestigkeit Geschwindigkeit	Fadendurchmesser Fadenzahl Anhaltezeit	

Auch hat man Faktoren wie die bremsende Wirkung des Endblocks vernachlässigt. Im folgenden soll also untersucht werden, wie man bestimmte Variablen ändern müsste, damit es die Szene physikalisch möglich ist.

Damit die Szene möglich ist, muss $F_n = F_{\text{Brems}}$ gelten. Formelmäßig sähe dies so aus:

$$F_n = F_{\text{Brems}} \Rightarrow \sigma \cdot N \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \Rightarrow \frac{N}{4} \cdot \sigma \cdot \pi \cdot d^2 = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (3)$$



Abb. 2



Abb. 3

² Natürlich ist ein "Marvel-Wiki" nicht die vertrauenswürdigste Quelle, allerdings handelt es sich über einen Superhelden mit übernatürlichen Kräften, zu dem es keine Studien geben wird.

Tabelle 1: Variablen nach Eindeutigkeit

N ist dabei die Anzahl der Fäden.

4.1 Durchmesser

Stellt man vorherige Gleichung nach d um, so erhält man

$$d^* = \sqrt{\frac{F_{\text{Brems}}}{4\sigma\pi}} = 0,0033 \text{ m} = 3,3 \text{ mm}$$

d^* ist damit ca. 32% größer als d . ($\frac{d^*}{d} = 1.32$)

4.2 Anzahl der Fäden

Auch hier kann man (3) umformen, um

$$N^* = \frac{F_{\text{Brems}}}{\sigma G} = 28$$

zu erhalten. Das heißt, dass Spiderman 28 Fäden vom Durchmesser $d = 0,0025 \text{ m}$ spannen müsste, um die benötigte Kraft zu erreichen. Das entspricht 75% mehr als der verwendeten Fadenzahl.

4.3 Anhaltezeit

Ändert man die Zeit, so muss sich die Bremskraft, an die Kraft der Spinnenfäden anpassen, es gilt also:

$$\Delta t^* = m \cdot \frac{\Delta v}{F_n} \approx 79 \text{ s}$$

Vergrößert sich die Anhaltezeit um ca. 75%, so wird die benötigte Bremskraft auf die der Spinnenfäden reduziert.

Man muss aber auch sagen, dass die Anhaltezeit schwer variabel ist, da das Messergebnis doch relativ statisch ist.

Fazit

Durch leichte Abänderung der Werte lässt sich das Ergebnis so hinrechnen, dass die Rettungsaktion physikalisch funktioniert.

Literatur

- [Mar22] Marvel Charaktere Wiki. *Spider-Man*. 24.10.2022. url: <https://marvel-charaktere.fandom.com/de/wiki/Spider-Man>.
- [Mau16] Ernst Mauritz. "US-Bürger sind so dick wie noch nie". In: *kurier.at* (4.08.2016). url: <https://kurier.at/wissen/us-buerger-sind-so-dick-wie-noch-nie/213.657.105>.
- [Mül06] Martin Müller. *Vorlesung Biomaterialien: Spinnenseide*. Vorlesungsfolien. Kiel, 29.05.2006.
- [Tip+19] Paul A. Tipler et al. *Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 360. doi: 10.1007/978-3-662-58281-7.
- [Wik21] Wikipedia. *Meilen pro Stunde* — *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 25. Oktober 2022]. 2021. url: https://de.wikipedia.org/wiki/Meilen_pro_Stunde.
- [Wik22a] Wikipedia. *2200-series (CTA)* — *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 25. October 2022]. 2022. url: [https://en.wikipedia.org/wiki/2200-series_\(CTA\)](https://en.wikipedia.org/wiki/2200-series_(CTA)).
- [Wik22b] Wikipedia. *Tobey Maguire* — *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. [Online; Stand 30. Oktober 2022]. 2022. url: https://de.wikipedia.org/wiki/Tobey_Maguire.

Quelle des ersten Bildes: [freepnglogos.com \(https://www.freepnglogos.com/images/spiderman-10259.html\)](https://www.freepnglogos.com/images/spiderman-10259.html).

Alle Dateien unter <https://github.com/lukassemrau/WSem-HA>. (QR-Code)

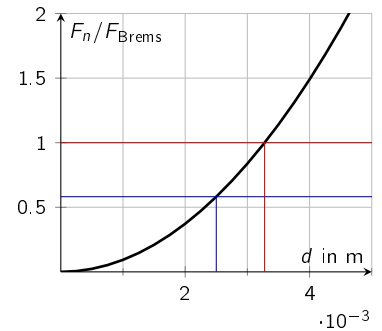


Abb. 4: Das Verhältnis aus F_n und F_{Brems} in Abhängigkeit des Durchmessers. Rot die Soll- und blau die Ist-Linie.

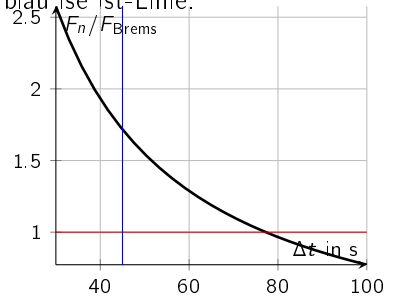


Abb. 5: $\Delta t - \frac{F_n}{F_{\text{Brems}}}$ -Diagramm. Rot ist Soll- und blau die Ist-Linie

