

Untersuchung der Sicherheit von Rollstühlen in Eisenbahnfahrzeugen auf Strecken mit Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen

Schlussbericht

Auftraggeber: Hanspeter Oprecht
Bundesamt für Verkehr (BAV)
Mühlestrasse 6
3063 Ittigen

Hauptverfasser: Markus Muser

e-mail: muser@agu.ch
Tel.: +41 44 251 54 30

Seiten: 1-46

Datum: Zürich, 30.12.2020

Version 1.3

	Name	Ort / Datum	Unterschrift
Autor	Muser	Zürich, 30.12.2020	
Reviewer	Schmitt	Zürich, 30.12.2020	

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 2 von 46	

Referenzen

- [1] Vertrag "Untersuchung der Sicherheit von Rollstühlen in öV-Zweirichtungsfahrzeugen auf Strecken mit Neigungen >>50‰",
- [2] CELEX 32014R1300 DE TXT.pdf (TSI PRM)
- [3] UNECE R107 Amendment 6
- [4] Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV, SR 742.141.11)
- [5] <https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/barrierefreiheit/sicherheitsanforderungenrollstuehleimoev.pdf.download.pdf/sicherheitsanforderungenrollstuehleimoev.pdf>
- [6] <https://msis.jsc.nasa.gov/sections/section03.htm#3.3.7.3.2.1>
- [7] ÖV Planungsrollstuhl, Planungsrollstuhl für Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs, R. Berchtold / A. Scheidegger, BAV 2015,
<https://www.bav.admin.ch/dam/bav/de/dokumente/themen/barrierefreiheit/oev-planungsrollstuhl.pdf.download.pdf/Bericht%20%C3%B6V-Planungsrollstuhl.pdf>
- [8] <https://rehashop.ch/mobilitaet/rollstuehle/rollstuehle/rehashop-rollstuhl-karibu>

Versionen

1.0	mhm	20201130	Erste Version - Zusammenfassung nicht ausformuliert - Empfehlungen nicht ausformuliert
1.1	mhm	20201215	Zusammenfassung und Empfehlungen angepasst
1.2	mhm/ho	20201223	redaktionelle Änderungen, Formulierungen in der Diskussion, Tabelle A-1
1.3	mhm/ho/as	20201230	Tabelle A-1 geändert, Titel angepasst

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.:	kus	Seite:	3 von 46

1. ZUSAMMENFASSUNG	4
2. EINLEITUNG	6
3. LÖSUNGSANSATZ	7
4. RAHMENBEDINGUNGEN	8
4.1. Referenz-Rollstuhl	8
4.2. Dummy	9
4.3. Schwerpunkt Gesamtsystem	10
5. HANDRECHNUNGEN	10
5.1. Rutschen vorwärts	11
5.2. Kippen rückwärts	12
5.3. Wegdrehen seitlich	14
6. VERSUCHE	16
6.1. Versuchsaufbau	16
6.2. Position parallel zur Fahrriichtung	19
6.3. Position quer zur Fahrriichtung	25
7. SIMULATIONEN	33
7.1. Aufbau des Modells	33
7.2. Vergleich mit den Tests	34
7.3. Weitere Simulationen / Resultate	39
8. DISKUSSION / EMPFEHLUNGEN	40
A-1. MÖGLICHE SZENARIEN BEZÜGLICH STEIGUNGSVERLAUF UND SITZPOSITION	41
A-2. DIMENSIONEN DES SYSTEMS ROLLSTUHL - INSASSE	42
A-3. KRITISCHE BESCHLEUNIGUNGEN	43

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus		Seite: 4	von 46

1. Zusammenfassung

Bereits in früheren Arbeiten konnte gezeigt werden, dass rollstuhlfahrende Personen unter den in Schienenfahrzeugen zu erwartenden Bedingungen (mittlere Bremsverzögerung maximal 2.8 m/s^2 in der Ebene) sicher transportiert werden können, wenn der Rollstuhl entgegen der Fahrtrichtung nahe an einer Rückhaltevorrichtung positioniert wird. Da dies in Zweirichtungsfahrzeugen mit entgegengesetzt angeordneten Rollstuhlplätzen nicht ohne weiteres gewährleistet werden kann, haben wir untersucht, unter welchen Bedingungen ein nicht diesen Vorgaben entsprechend positionierter Rollstuhl instabil werden kann. Im Vordergrund standen dabei Strecken, welche ein Gefälle von mehr als 50‰ aufweisen.

Wir haben dazu einerseits Versuche mit verschiedenen Steigungen, Bremsverzögerungen und Rollstuhl-Positionen durchgeführt. Andererseits wurde aber auch ein Modell entwickelt, welches die Simulation verschiedenster Situationen im Rechner erlaubt.

Um die Versuche unter kontrollierbaren und variierbaren Bedingungen durchführen zu können, haben wir die Tests auf einer Schlittentestanlage anstatt wie in früheren Arbeiten in realen Fahrzeugen durchgeführt. Dazu wurde ein Aufbau konstruiert, welcher die relevanten Teile eines Rollstuhlplatzes nachbildet und welcher auf dem Test-Schlitten geneigt werden kann. Es wurden insgesamt 24 Tests mit Neigungen von 50‰ und 0‰ und Positionen in, entgegen, und quer zur Fahrtrichtung durchgeführt.

Das Simulationsmodell wurde anhand der durchgeführten Tests validiert und zeigt eine gute Übereinstimmung mit denselben. Mit dem Modell können nun verschiedene Steigungen, Ausgangspositionen, und vor allem auch Brems-Ausgangsgeschwindigkeiten simuliert werden.

Es zeigte sich, dass der mit einem 50-perzentil männlichen Dummy besetzte, in Fahrtrichtung orientierte Rollstuhl bei einem Gefälle von 50‰ bereits bei Bremsverzögerungen knapp oberhalb von 1 m/s^2 ins Rutschen geraten kann. In der Ebene lag die Grenze bei ca. 1.5 bis 2 m/s^2 . Quer zur Fahrtrichtung lagen die Grenzen um ca. 0.5 m/s^2 höher; in dieser Position dreht sich der Rollstuhl und rutscht gleichzeitig seitlich, was insgesamt einen ungünstigeren Bewegungsablauf darstellt.

Falls ein Rollstuhl nicht entgegen der Fahrtrichtung, sondern mit dem Rücken zum Tal positioniert wird, können Gefahren für die rollstuhlfahrende Person sowie für Mitreisende entstehen, wenn die Strecke nicht eine kontinuierliche Steigung aufweist sondern z.B. nach einer anfänglichen Steigung in die Ebene oder gar in ein Gefälle übergeht.

Die vorliegenden Untersuchungen basieren auf einer mittleren Bremsverzögerung von maximal 2.8 m/s^2 ¹.

Aufgrund dieser Resultate haben wir Empfehlungen für die Gestaltung von Rollstuhlplätzen in Zweirichtungsfahrzeugen auf Strecken mit einem Gefälle von >50‰ erarbeitet. Es wird empfohlen, Rollstühle immer entgegen der Fahrtrichtung, möglichst nahe an der Rückhaltevorrichtung, zu positionieren. Für die hier diskutierten Fahrzeugkategorien bedeutet dies, dass der Rollstuhlplatz mit zwei Rückhaltevorrichtungen ausgerüstet sein muss, welche in einem Abstand von 150 cm (Einzelplatz) bzw. 160 cm (wenn die

¹ vgl. AB-EBV (SR 742.141.11) zu Art. 52, AB 52.2, Ziff. 7.1.4

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	5	von	46

gleichzeitige Beförderung zwei quer gerichteter Rollstühle erlaubt ist) voneinander angeordnet sind. Falls die Strecke monoton steigend ist, genügt eine einzelne Rückhaltevorrichtung. In diesem Fall muss auf geeignete Weise signalisiert sein, dass der Rollstuhl mit dem Rücken zum Tal positioniert werden muss.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 6 von 46		

2. Einleitung

Für Rollstuhlfahrende in Strassenbahnfahrzeugen ist gemäss [4] am Rollstuhlplatz eine passive Rückhaltevorrichtung gefordert. Diese Rückhaltevorrichtung besteht normalerweise aus einer Wand, welche z.T. auch gepolstert ist. Im Falle einer starken Bremsung soll die Vorrichtung eine allfällige Instabilität des Rollstuhls auffangen, also ein Kippen oder Rutschen verhindern.

Unsere in [5] dokumentierten, bereits vor längerer Zeit durchgeführten Arbeiten hatten ergeben, dass unter den bei Schienenfahrzeugen zu erwartenden Bedingungen (Bremsverzögerungen unterhalb von 3 m/s^2) weder für die Rollstuhlfahrenden noch für die übrigen Passagiere Verletzungsgefahren bestehen, wenn der Rollstuhl mit dem Rücken zur Fahrtrichtung nahe an der Rückhaltevorrichtung positioniert wird. Auch bei einer etwaigen Benutzung des Rollstuhlplatzes mit zwei quer zur Fahrtrichtung mit dem Rücken zur Aussenwand positionierten Rollstühlen sind keine Gefahren zu erwarten, wenn beide Rollstühle nahe beieinander und der weiter vorne befindliche Rollstuhl nahe an der Rückhaltevorrichtung stehen. Diese Schlussfolgerungen gelten auch dann, wenn das Fahrzeug eine Strecke mit Gefälle befährt.

Bei Zweirichtungsfahrzeugen sind normalerweise zwei in entgegengesetzter Richtung orientierte Rollstuhlplätze vorhanden. Es kann also die Situation entstehen, dass der Rollstuhl zwar mit dem Rücken gegen die Rückhaltevorrichtung, aber nicht gegen die Fahrtrichtung positioniert wird. Daraus leitet sich die Forderung ab, dass die Rollstuhlplätze für beide Fahrrichtungen gesichert sein müssen. Bei Strecken mit starker Steigung (>50‰) besteht die Empfehlung, dass sich Rollstuhlfahrende nicht mit dem Rücken zur Fahrtrichtung, sondern mit dem Rücken zum Tal positionieren sollen. Falls die Strecke eine konstant hohe Steigung aufweist, wäre wegen der Bremsung „bergauf“ nicht mit einer Instabilität zu rechnen. Falls die Strecke jedoch flache Teile oder sogar Teile mit Gefälle aufweist, kann die Empfehlung dazu führen, dass die oben beschriebene Situation eintritt.

Im vorliegenden Bericht wird auftragsgemäss analysiert,

- a) ab welcher Streckenneigung
- b) ab welcher Bremskraft
- c) welche geeigneten Sicherheitsmassnahmen
- d) bei welchen Rollstuhlpositionen

erforderlich sind, um eine sichere Beförderung der Rollstühle und Mitpassagiere zu gewährleisten.

Da Fahrzeuge auf interoperablen Strecken gemäss [2] weniger weit gehenden Vorschriften unterliegen, können die Schlussfolgerungen aus diesem Bericht nur für nicht-interoperable Fahrzeuge auf Strecken mit Neigungen ab 50‰ angewandt werden.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 7 von 46	

3. Lösungsansatz

In [5] hatten wir Fahrversuche mit einem Bus durchgeführt. Bei diesen Versuchen stand die Frage im Vordergrund, wie sich gleichzeitig auftretende Brems- und Querverzögerungen auf die Stabilität des Rollstuhles auswirken.

Aus diversen Gründen konnten wir im hier diskutierten Projekt nicht auf solche Versuche unter realen Bedingungen zurückgreifen. Einerseits wären diese Versuche sehr aufwändig geworden, da sie nachts und allenfalls mit Streckensperrungen hätten durchgeführt werden müssen. Andererseits war es auch unsicher, ob die Parameter, insbesondere die Neigung und die Bremsverzögerung, im erforderlichen Masse hätten variiert werden können, um die geforderten quantitativen Aussagen machen zu können.

Aus diesem Grund wurde ein aus zwei Elementen bestehendes Vorgehen umgesetzt:

- Auf einer Schlittentestanlage werden die relevanten Teile (Haltestangen, Boden, Rückhaltevorrichtung) aufgebaut, und es werden Tests mit verschiedenen Beschleunigungsverläufen durchgeführt. Solche Testanlagen weisen eine sehr gute Reproduzierbarkeit der Beschleunigungsverläufe auf. Für die Tests wurde ein mit einem Dummy besetzter Rollstuhl verwendet.
- Parallel dazu wurde ein Simulationsmodell aufgebaut, welches den Schlitten-Testaufbau als Computersimulation nachbildet. Das Modell wird mit den Tests validiert; hierauf können die Parameter (Ausgangsgeschwindigkeit, Bremsverzögerung, Position des Rollstuhls etc.) auch ausserhalb der für die Tests gewählten Bedingungen variiert werden.

Um die zu erwartenden Resultate einzugrenzen und die Rahmenbedingungen für die Tests abzustecken, haben wir zudem vorab einige Handrechnungen durchgeführt.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 8 von 46	

4. Rahmenbedingungen

4.1. Referenz-Rollstuhl

In [7] werden die Dimensionen eines Rollstuhls festgelegt, welcher für die Planung von Rollstuhlplätzen im öV eingesetzt werden soll. Die in diesem Bericht definierten Werkzeuge dienen dazu, das Befahren der Rollstuhlplätze zu testen, so dass sichergestellt werden kann, dass ein Rollstuhlplatz mit einem Rollstuhl mit maximal zulässigen Dimensionen erreicht werden kann. Die Spurbreite des Rollstuhls beträgt 60 cm. Der Radstand variiert je nach Stellung der Vorderräder zwischen ca. 42 – 50 cm. Diese Dimensionen stellen den „worst case“ für die Befahrbarkeit dar; bezüglich Stabilität ist jedoch das Gegenteil der Fall. Eine hohe Spurbreite und ein langer Radstand ergeben bei gleicher Schwerpunkthöhe eine bessere Stabilität.

Handrollstühle sind bekanntlich in vielen Bauformen erhältlich. Rollstühle mit kleinerer Spurbreite, kurzem Radstand und einer Schwerpunktlage in Längsrichtung näher an der Hinterachse sind agiler, erfordern aber von der rollstuhlfahrenden Person eine höhere Beweglichkeit. Weil davon auszugehen ist, dass die Person in diesem Fall auch besser auf eine Gefahrensituation reagieren könnte, haben wir uns dazu entschlossen, uns auf einen „Standard-“ oder „Transport-“ Rollstuhl zu konzentrieren.

Wir haben zwei Rollstühle mit Sitzbreiten von 46 cm (normal) und 51 cm (breit) beschafft [8]. Der Rollstuhl mit 46 cm Sitzbreite wurde detailliert vermessen und in ein CAD-Modell übergeführt (Bild 1). Das Modell diente später als Grundlage für die Computer-Simulationen. Durch Messung der Rad-Aufstandskräfte wurde die Schwerpunktlage ermittelt. Die Höhe des Schwerpunktes wurde durch Kippen nach hinten gemessen. Die für die späteren Simulationen relevanten Massenträgheitsmomente wurden anschliessend im CAD berechnet.



Bild 1: CAD-Modell des im Folgenden verwendeten „Standard“ Rollstuhls.

Der im Folgenden verwendete Rollstuhl weist eine Spurbreite von 523 mm hinten und 476 mm vorne auf. Der Radstand beträgt 400 mm bis 490 mm je nach Stellung der Vorderräder. Das Gewicht beträgt

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	9	von	46

17.2 kg. Damit handelt es sich um einen „durchschnittlichen“ Rollstuhl. Die im Folgenden dargestellten Berechnungen bzw. Überlegungen beziehen sich somit nicht auf einen „worst“ oder „best“ case, sondern auf einen durchschnittlich zu erwartenden Fall.

Tabelle 1: Dimensionen der drei bei [8] erhältlichen Standard-Rollstühle. Es wurden zwei Rollstühle mit einer Sitzbreite von 46 cm und 52 cm beschafft.

Rollstuhl			SW41	SW46	SW52
Sitzbreite	sb	[m]	0.410	0.460	0.510
Spurbreite Hinterachse	b	[m]	0.473	0.548	0.580
Spurbreite Vorderachse	bf	[m]	0.425	0.476	0.535
Radstand	wb	[m]	0.400	0.400	0.400
Durchmesser Hinterrad	dm	[m]	0.590	0.590	0.590
Durchmesser Vorderrad	df	[m]	0.195	0.195	0.195
Nachlauf Vorderrad	lf	[m]	0.045	0.045	0.045
Distanz Lehne-Hinterachse horizontal	dl	[m]	0.050	0.050	0.050
Schwerpunkt vor Hinterachse	xcgw	[m]	0.196	0.196	0.196
Sitzhöhe (belastet)	hs	[m]	0.455	0.445	0.435
Schwerpunkt Höhe über Boden	hcgw	[m]	0.380	0.380	0.380
Gewicht	mr	[kg]	15.8	17.2	18.6

4.2. Dummy

Wenn nicht anders angegeben, beziehen wir uns im Folgenden immer auf eine rollstuhlfahrende Person, welche nach Grösse und Gewicht einem 50-perzentilen Mann entspricht. Dies in erster Linie deshalb, weil es für diese Personengrösse Dummies gibt, die für Versuche eingesetzt werden können. Für die Stabilitätsbetrachtungen muss der Schwerpunkt des Gesamtsystems Dummy-Rollstuhl bekannt sein. Der Schwerpunkt des Rollstuhls kann einfach durch Messung bestimmt werden (s. oben), während der Schwerpunkt des Dummys selbstverständlich von der Sitzposition abhängt. In anthropometrischen Datensammlungen ist aber meist nur der Schwerpunkt einer stehenden Person angegeben. Wir konnten lediglich eine einzige Referenz, in der die Schwerpunkte für verschiedene Körperhaltungen angegeben werden, finden ([6]). Hier werden die Schwerpunkte für sitzende Personen verschiedener Körpergrössen und Gewichte angegeben; mittels Tabellen können die Daten in weitere Körpergrössen umgerechnet werden (Tabelle 2). Nicht berücksichtigt wird hier allerdings, dass der Schwerpunkt einer rollstuhlfahrenden Person tatsächlich etwas höher und etwas weiter hinten liegen käme, wenn die Muskulatur der Beine gegenüber derjenigen des Oberkörpers und der Arme geschwächt wäre.

Tabelle 2: Aus [6] abgeleitete Schwerpunktslagen für sitzende Personen. JF50 bedeutet "50-percentile Japanese female", AM50 bzw. AM95 bedeutet "50- bzw. 95-percentile American male".

Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Höhe Schwerpunkt über Sitzfläche	hcgo_s	[m]	0.239	0.257	0.276
Höhe Schwerpunkt über Boden	hcgo	[m]	0.684	0.692	0.276
Distanz Schwerpunkt vor Sitzlehne	xcgo_s	[m]	0.181	0.207	0.218
Distanz Schwerpunkt vor Hinterachse	xcgo	[m]	0.131	0.157	0.218
Gewicht	mf	[kg]	51.5	82.2	98.5

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 10 von 46	

Die hier angegebenen Körpergrössen und Gewichte weichen leicht von den in den Versuchen verwendeten Dummys ab (78 kg für den 50-perzentilen Dummy, und 101 kg für den 95-perzentilen Dummy). Diese Abweichungen werden vernachlässigt.

4.3. Schwerpunkt Gesamtsystem

Aus Tabelle 1 und Tabelle 2 kann nun der Schwerpunkt des Gesamtsystems berechnet werden.

Tabelle 3: Aus Tabelle 1 und Tabelle 2 kombinierte Schwerpunktslagen des Gesamtsystems Rollstuhl- Insasse.

Personengrösse / Rollstuhl			JF50/SW41	AM50/SW46	AM95/SW52
Höhe Schwerpunkt über Boden	hcg	[m]	0.620	0.646	0.658
Distanz Schwerpunkt vor Hinterachse	xcg	[m]	0.146	0.164	0.172
Gesamtgewicht	mtot	[kg]	67.3	99.4	117.1
Last Hinterachse	Fr	[N]	419	576	654
Last Vorderachse	Ff	[N]	241	399	495
Lastanteil Hinterachse	kr	[-]	0.63	0.59	0.57
Lastanteil Vorderachse	kf	[-]	0.37	0.41	0.43

Bei den Stabilitätsbetrachtungen wie auch bei den Versuchen und Simulationen wird jeweils davon ausgegangen, dass sich das Gesamtsystem starr verhält, dass der Dummy also während des Bremsvorgangs seine Position nicht verändert. Die in den Versuchen verwendeten Dummys entsprechen dieser Annahme, da deren Gelenke unter den auftretenden Belastungen praktisch unbeweglich sind. Eine Veränderung der Position ist in den Versuchen und auch den Handrechnungen schwierig zu berücksichtigen; in der Simulation kann dies jedoch relativ einfach geschehen.

5. Handrechnungen

Die Grenzwerte, bei welchen der Rollstuhl instabil wird, d.h. zu rutschen, zu kippen, oder wegzudrehen beginnt, können verhältnismässig einfach von Hand berechnet werden. Grundsätzlich könnte ein Rollstuhl auf einer Strecke ohne Gefälle, bei einer Bremsverzögerung unterhalb von 3 m/s^2 , und einem Reibungskoeffizienten grösser als 0.3 nicht ins Rutschen geraten, wenn alle vier Räder blockiert wären. Die Summe der an den vier Rädern auftretenden Reibungskräfte wäre unter diesen Bedingungen immer grösser als die entgegengesetzt wirkende Verzögerungskraft. Da aber an einem Handrollstuhl immer nur die Hinterräder gebremst sind, kann es je nach Orientierung dazu kommen, dass die gebremsten Räder entlastet werden und dadurch die Reibung an diesen Rädern reduziert wird. Zwei der drei im Folgenden betrachteten Situationen, Rutschen vorwärts, und Wegdrehen seitlich, sind durch diesen Umstand bedingt. In der dritten Situation, Kippen rückwärts, wird die Last auf die gebremsten Hinterräder durch die Bremsverzögerung erhöht statt reduziert. Bei Reibungskoeffizienten in der zu erwartenden Grössenordnung wird der Rollstuhl daher nicht nach hinten rutschen, sondern kippen.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 11 von 46		

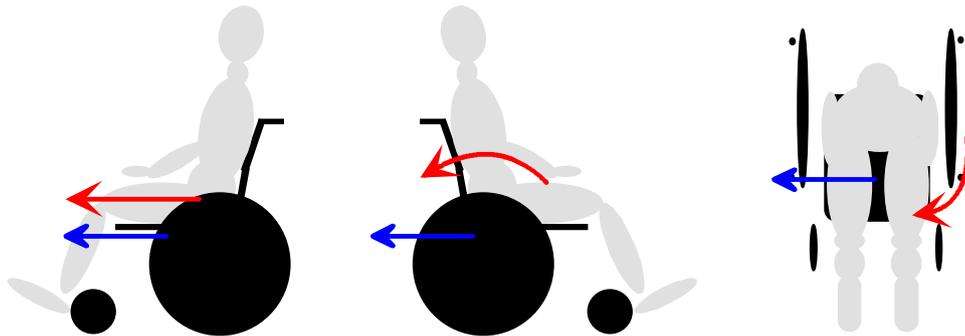


Bild 2: links: Rutschen vorwärts, Mitte: Kippen rückwärts, rechts: Wegdrehen seitlich (Ansicht von oben). Blaue Pfeile: aus Bremsung und ev. Hangabtrieb resultierende Kraft. Rote Pfeile: resultierende Bewegungsrichtung.

Die entsprechenden Verhältnisse sind in Bild 2 dargestellt. Die einzelnen Schritte zur Berechnung der kritischen Bremsverzögerungen sind in Kapitel A-3 aufgeführt. In A-2 finden sich die Definitionen für die in den Tabellen verwendeten Bezeichnungen.

Bei Erreichen einer kritischen Bremsverzögerung beginnt das System Rollstuhl-Insasse die Stabilität zu verlieren; dies bedeutet per se nicht, dass dabei auch eine Verletzungsgefahr für die rollstuhlfahrende Person oder Mitfahrende entsteht. Entscheidend für das Verletzungsrisiko ist vielmehr, wie lange und um wieviel die kritische Verzögerung überschritten wird. Das Verhalten nach Überschreiten der kritischen Verzögerung ist schwieriger durch Handrechnungen zu erfassen und wird deshalb in den folgenden Kapiteln mittels Versuchen und Simulationen untersucht.

5.1. Rutschen vorwärts

Die folgenden Tabellen zeigen die kritischen Bremsverzögerungen in der Ebene und bei einem Gefälle von 50‰, wenn der Rollstuhl in Fahrtrichtung positioniert wird. Einen erheblichen Einfluss hat hier die Orientierung der Vorderräder. Um die Orientierung der Räder nach vorne (also wie bei einer Rückwärtsbewegung des Rollstuhls) zu modellieren wurde der Radstand jeweils um 90 mm (2-facher Nachlauf) erhöht.

Ein mit einer 95-perzentil-männlichen Person besetzter Rollstuhl würde (Tabelle 6 rechte Kolonne) bei 50‰ Gefälle bereits bei einer Bremsverzögerung knapp unterhalb von 1 m/s^2 zu rutschen beginnen. Auch im besten Fall (Tabelle 5, linke Kolonne) liegt die kritische Bremsverzögerung unterhalb von 2 m/s^2 .

Tabelle 4: Kritische Bremsverzögerungen, ohne Gefälle, Vorderräder nach hinten gerichtet (wie bei Vorwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Radstand	wb	[m]	0.40	0.40	0.40
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	0	0	0
Kritische Bremsverzögerung	as	[m/s ²]	1.65	1.51	1.44

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm		Vis.: kus	Seite: 12 von 46	

Tabelle 5: Kritische Bremsverzögerungen, ohne Gefälle, Vorderräder nach vorne gerichtet (wie bei Rückwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Radstand	wb	[m]	0.49	0.49	0.49
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	0	0	0
Kritische Bremsverzögerung	as	[m/s ²]	1.97	1.84	1.78

Tabelle 6: Kritische Bremsverzögerungen, 50‰ Gefälle, Vorderräder nach hinten gerichtet (wie bei Vorwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Radstand	wb	[m]	0.40	0.40	0.40
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	50	50	50
Kritische Bremsverzögerung	as	[m/s ²]	1.16	1.02	0.95

Tabelle 7: Kritische Bremsverzögerungen, 50‰ Gefälle, Vorderräder nach vorne gerichtet (wie bei Rückwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Radstand	wb	[m]	0.49	0.49	0.49
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	50	50	50
Kritische Bremsverzögerung	as	[m/s ²]	1.48	1.35	1.29

5.2. Kippen rückwärts

Die folgenden Tabellen zeigen die kritischen Bremsverzögerungen in der Ebene und bei einem Gefälle von 50‰, wenn der Rollstuhl entgegen der Fahrtrichtung positioniert wird.

Anders als im voran gegangenen Abschnitt hat die Orientierung der Vorderräder hier keinen Einfluss. Weil die blockierten Räder talseitig positioniert sind, wird durch die Bremsverzögerung die Last und somit die Reibungskraft an diesen Rädern erhöht. Deswegen wird der Rollstuhl eher nach hinten kippen als wegrutschen. Erst bei einem Reibungskoeffizienten von ca. 0.2 rutscht der Rollstuhl, anstatt zu kippen.

Tabelle 8: Kritische Bremsverzögerungen, ohne Gefälle

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	0	0	0
Kritische Bremsverzögerung Kippen	ak	[m/s ²]	2.31	2.49	2.57

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 13 von 46	

Tabelle 9: Kritische Bremsverzögerungen, 50‰ Gefälle

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	50	50	50
Kritische Bremsverzögerung Kippen	ak	[m/s ²]	1.82	1.99	2.08

Diese Situation haben wir lediglich der Vollständigkeit halber mit einbezogen; ein korrekt entgegen der Fahrtrichtung positionierter Rollstuhl kann zwar je nach Gefälle und Personengrösse bereits bei Bremsverzögerungen von ca. 1.8 m/s² kippen, er wird aber durch das Rückhaltesystem aufgefangen und es entsteht keine Gefahr für die rollstuhlfahrende Person oder Mitreisende. Bedingung hierfür ist allerdings, dass der Rollstuhl nahe genug am Rückhaltesystem positioniert ist.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm		Vis.: kus	Seite: 14 von 46	

5.3. Wegdrehen seitlich

Falls der Rollstuhl quer zur Fahrtrichtung positioniert wird, wird das Hinterrad auf derjenigen Seite, welche höher liegt, also der Bergseite, entlastet. Durch die Bremsung entsteht ein Drehmoment, welches dazu führen kann, dass sich der Rollstuhl um den Aufstandspunkt des in Fahrtrichtung vorne liegenden, also talseitigen, Hinterrades zu drehen beginnt. Diesen Effekt hatten wir bereits unter den in [5] beschriebenen Versuchsbedingungen beobachtet, wobei damals der Rollstuhl entgegen der Fahrtrichtung positioniert war und die Instabilität durch Querbeschleunigungen in der Kurvenfahrt verursacht wurde.

Die folgenden Tabellen zeigen die kritischen Bremsverzögerungen in der Ebene und bei einem Gefälle von 50‰, wenn der Rollstuhl quer zur Fahrtrichtung positioniert wird. Einen erheblichen Einfluss hat auch hier die Orientierung der Vorderräder; um die Orientierung der Räder nach vorne (also wie bei einer Rückwärtsbewegung des Rollstuhls) zu modellieren, wurde der Radstand jeweils um 90 mm (2-facher Nachlauf) erhöht.

Tabelle 10: Kritische Bremsverzögerungen, ohne Gefälle, Vorderräder nach hinten gerichtet (wie bei Vorwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Spurbreite Hinterachse	b	[m]	0.473	0.548	0.580
Radstand	wb	[m]	0.400	0.400	0.400
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	0	0	0
Krit. Verzögerung Rutschen	as	[m/s ²]	2.80	2.61	2.51
Krit. Verzögerung Wegdrehen	aro	[m/s ²]	2.05	2.13	2.13

Tabelle 11: Kritische Bremsverzögerungen, ohne Gefälle, Vorderräder nach vorne gerichtet (wie bei Rückwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Spurbreite Hinterachse	b	[m]	0.473	0.548	0.580
Radstand	wb	[m]	0.490	0.490	0.490
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	0	0	0
Krit. Verzögerung Rutschen	as	[m/s ²]	3.10	2.94	2.86
Krit. Verzögerung Wegdrehen	aro	[m/s ²]	2.14	2.25	2.27

Tabelle 12: Kritische Bremsverzögerungen, 50‰ Gefälle, Vorderräder nach hinten gerichtet (wie bei Vorwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Spurbreite Hinterachse	b	[m]	0.473	0.548	0.580
Radstand	wb	[m]	0.400	0.400	0.400
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	50	50	50
Krit. Verzögerung Rutschen	as	[m/s ²]	2.80	2.61	2.51
Krit. Verzögerung Wegdrehen	aro	[m/s ²]	1.56	1.64	1.64

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm		Vis.: kus	Seite: 15 von 46	

Tabelle 13: Kritische Bremsverzögerungen, 50‰ Gefälle, Vorderräder nach vorne gerichtet (wie bei Rückwärtsfahrt des Rollstuhls).

Rollstuhl			SW41	SW46	SW51
Personengrösse			JF50	AM50	AM95
Spurbreite Hinterachse	b	[m]	0.473	0.548	0.580
Radstand	wb	[m]	0.490	0.490	0.490
Reibungskoeffizient	μ	[-]	0.45	0.45	0.45
Gefälle	α	[‰]	50	50	50
Krit. Verzögerung Rutschen	as	[m/s ²]	3.10	2.94	2.86
Krit. Verzögerung Wegdrehen	aro	[m/s ²]	1.65	1.76	1.78

Je nach Reibungskoeffizient kann es bei einer Position quer zur Fahrtrichtung neben dem Wegdrehen auch zu einem Rutschen kommen. Die entsprechenden Bremsverzögerungen sind deshalb in den oben stehenden Tabellen mit aufgeführt. Falls die kritischen Bremsverzögerungen für Rutschen und für Wegdrehen nahe beieinander liegen, wird der Rollstuhl gleichzeitig rutschen und sich drehen. Erst ab einem Reibungskoeffizienten unterhalb von ca. 0.25 wird der Rollstuhl hauptsächlich rutschen und nur wenig drehen (s. dazu auch Versuch Q04).

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite:	16	von

6. Versuche

Aus den eingangs erwähnten Gründen haben wir uns dafür entschieden, Versuche nicht in realen Schienenfahrzeugen, sondern auf einer Schlitten-Testanlage durchzuführen. Mit diesen Anlagen werden normalerweise Teile von Fahrzeugen, z.B. Sitze, auf einem Rollwagen (Schlitten) getestet. Der Schlitten wird für den Test in einer ersten Phase auf die gewünschte Kollisionsgeschwindigkeit beschleunigt und in einer zweiten Phase über eine kurze Distanz mit einer hohen Verzögerung wieder abgebremst. Die Abbremsung simuliert dabei den Verzögerungsverlauf eines realen Fahrzeuges in einer Kollision z.B. gegen eine Mauer. Die dabei auftretenden Verzögerungen sind selbstverständlich um Grössenordnungen höher als bei einer normalen Bremsung, z.B. in einem Bereich von 200 – 400 m/s². Die Abbremsdistanz liegt dabei bei einigen cm bis ca. 1 m. Diese Distanz kann nicht ohne weiteres auf die für unsere Versuche benötigten mehreren Meter vergrössert werden.

Man kann aber realistische Beschleunigungsverläufe in der ersten Phase simulieren, da der Antrieb des Schlittens genau regelbar ist. Die Versuche werden deswegen "rückwärts" durchgeführt; der Schlitten steht vor dem Versuch still und wird kontrolliert beschleunigt. Für die Bewegung des auf dem Schlitten positionierten Rollstuhls spielt dies keine Rolle. Nach Beendigung des zu simulierenden Verlaufs hat der Schlitten also eine Geschwindigkeit inne, welche in Realität der Brems-Ausgangsgeschwindigkeit entsprechen würde.

6.1. Versuchsaufbau

Die nutzbare Fläche des Schlittens besteht aus einer flachen Platte, die mit einem Lochraster versehen ist und so den Aufbau verschiedener Testsznarien erlaubt. Für die Versuche wurde eine zweite Stahlplatte auf dem Schlitten montiert, welche durch Unterlegen z.B. mit Kanthölzern geneigt werden konnte. Auf die Platte wurde ein Bodenbelag geklebt, welcher in Schienenfahrzeugen üblich ist². Weiter wurden einige Haltestangen und ein passives Rückhaltesystem, modelliert durch ein Sperrholzbrett, aufgebaut.

Der Aufbau ist in Bild 3 und Bild 4 dargestellt. Aus praktischen Gründen wurden die Haltestangen nur mit einer Höhe von ca. 1 m ausgeführt; sie dienen lediglich dazu, einen allfälligen Sturz des Rollstuhls vom Schlitten zu verhindern.

Vor den eigentlichen Versuchen haben wir den Reibungskoeffizienten der Hinterräder gegenüber dem Bodenbelag gemessen, indem der unbelastete Rollstuhl mit einer Federwaage quer zur Fahrtrichtung gezogen wurde. Es ergab sich ein erstaunlich geringer (Gleit-) Reibungskoeffizient von ca. 0.3 - 0.35. Um eine leichte Abnützung des Reifens und damit eine Erhöhung der Reibung zu simulieren, wurde der Reifen an einer Stelle etwas aufgeraut. Auch so erhält man lediglich einen Reibungskoeffizienten von ca. 0.4 - 0.45. Die Messung wurde später auf verschiedenen anderen Belägen (Laminat-Parkett, Keramikplatten etc.) wiederholt, und die Resultate lagen in einer ähnlichen Grössenordnung. Wir vermuten, dass die eher tiefen Reibungskoeffizienten eine gewünschte Eigenschaft darstellen, da so das Handling des Roll-

² Der Belag wurde freundlicherweise von der VBZ zur Verfügung gestellt und entspricht dem in den Flexity II Trams verwendeten Produkt.

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen	Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	17 von 46

stuhls unter normalen Bedingungen erleichtert wird. Ein Veloreifen mit ähnlichen Abmessungen erreicht jedenfalls einen deutlich höheren Reibungskoeffizienten.

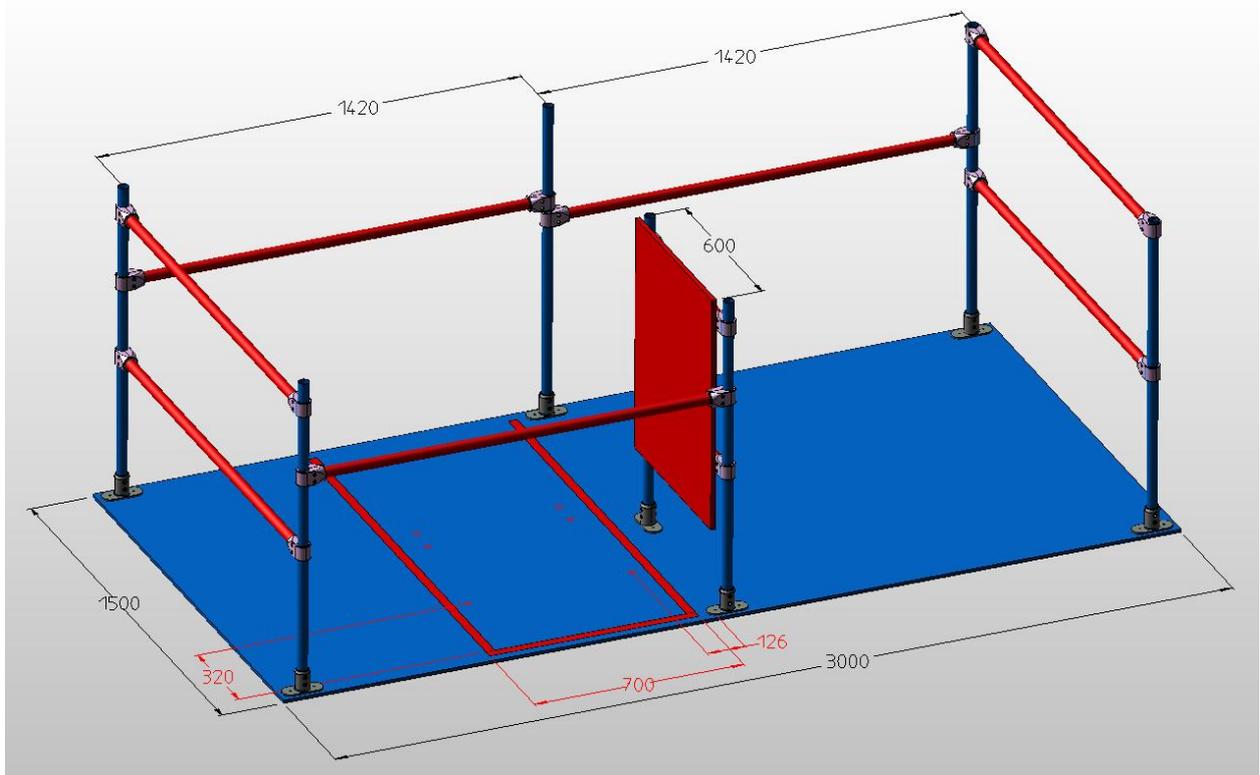


Bild 3: Versuchsaufbau. Die roten Streifen auf dem Boden entsprechen den Klebeband-Markierungen in Bild 4; die roten Kreise markieren die Radaufstandspunkte bei den Versuchen mit quer zur Fahrtrichtung positioniertem Rollstuhl.



Bild 4: Versuchsaufbau mit quer zur Fahrtrichtung positioniertem Rollstuhl.

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	18	von	46

Da der Schlitten nach der eigentlichen Versuchsphase möglichst sanft wieder abgebremst werden sollte ergab sich aus der zur Verfügung stehenden Länge der Teststrecke eine maximale Geschwindigkeit (entsprechend der maximalen Brems-Ausgangsgeschwindigkeit in der Realität) von 25 km/h. Eine Bremsung aus höheren Geschwindigkeiten kann aber ohne weiteres in der Simulation (Kapitel 7) untersucht werden. Die gefahrenen Brems-Verläufe sind trapezförmig, die Verzögerung steigt also linear auf ein bestimmtes Niveau an, welches für einige Sekunden gehalten wird. Danach sinkt die Verzögerung wieder auf null. Der "Ruck", also die zeitliche Änderung der Verzögerung, variierte zwischen ca. 0.75 bis 2.5 m/s³. Aufgrund der Resultate der Handrechnungen haben wir verschiedene Verläufe mit Niveaus von 1 m/s² bis 2.5 m/s² und Geschwindigkeiten von 15 - 25 km/h getestet. Da der Umbau der Versuchseinrichtung auf ein anderes Gefälle aufwändig ist, haben wir lediglich die Situation in der Ebene sowie bei einem Gefälle von 50‰ getestet. Weitere Situationen können einfacher in der Simulation getestet werden.

Die Versuche wurden am 29. und 30.9.2020 am Dynamic Test Center (DTC) in Vauffelin durchgeführt. Alle Versuche wurden mit zwei mitfahrenden Videokameras gefilmt. Die Ausgangs- und Endpositionen des Rollstuhls wurden fotografisch dokumentiert. Insgesamt wurden 24 Versuche durchgeführt. In 13 Versuchen wurden Positionen des Rollstuhls quer zur Fahrriichtung untersucht, wobei bei einem dieser Versuche zwei Rollstühle nebeneinander standen (der zweite Rollstuhl war mit einer 95 % Person besetzt). In 11 Versuchen war der Rollstuhl parallel zur Fahrriichtung positioniert, wobei bei zwei Versuchen der Rollstuhl entgegen der Fahrriichtung, aber relativ weit weg von der Rückhaltevorrichtung, positioniert wurde, um das Kippen rückwärts nachzuweisen. In den übrigen 9 Versuchen war der Rollstuhl in Fahrriichtung positioniert.

6.2. Position parallel zur Fahrtrichtung

In Tabelle 14 sind die Versuche zusammengefasst, in denen der Rollstuhl in Fahrtrichtung ausgerichtet war. Die Versuche bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse aus den Handrechnungen. Die Bremsverzögerungen, bei denen die Instabilität beginnt, liegen zwischen 1.5 und 2 m/s^2 in der Ebene und zwischen 1 und 1.5 m/s^2 bei 50% Gefälle. Die Orientierung der Vorderräder spielt erwartungsgemäss eine nicht unerhebliche Rolle. Wenn die Räder etwas schräg ausgerichtet sind (vermutlich in der Realität der Normalfall) kann sich der Rollstuhl zu drehen beginnen. Versuch V08 zeigt schliesslich, dass bei 50% Gefälle und einer Bremsverzögerung von 2 m/s^2 eine erhebliche Gefahr v.a. für die Mitreisenden entsteht, wenn der Rollstuhl nicht gesichert ist.

Tabelle 14: Versuche mit Rollstuhl in Fahrtrichtung.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat
V01	15	1	0	hinten	stabil
V02	15	2	0	hinten	rutscht
V03	15	1.5	0	hinten	rutscht knapp
V04	15	1.5	0	vorn	rutsch < 1 mm
V05	15	1.8	0	vorn	rutscht 25 mm
V06	15	2	0	schräg	rutscht 80 mm
V07	15	1	50	hinten	rutscht 45 mm
V08	15	2	50	hinten	rutscht weit
V09	15	2	50	schräg	rutscht, richtet sich aus

In den folgenden Bildern sind für alle Versuche jeweils links die Ausgangsposition und rechts die Endlage des Rollstuhls dargestellt.



Bild 5: Versuch V01, $v=15 \text{ km/h}$, $a=1 \text{ m/s}^2$, Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt stabil.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 20 von 46	



Bild 6: Versuch V02, $v=15$ km/h, $a=2$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl rutscht deutlich nach vorne und dreht sich leicht.

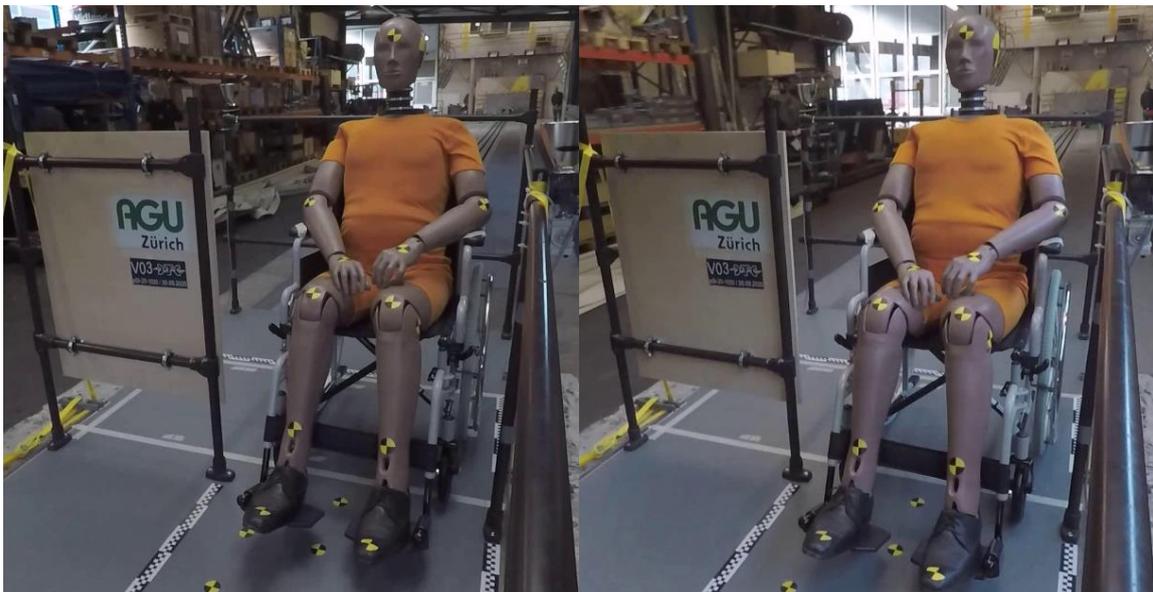


Bild 7: Versuch V03, $v=15$ km/h, $a=1.5$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl rutscht wenig nach vorne.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 21 von 46	



Bild 8: Versuch V04, $v=15 \text{ km/h}$, $a=1.5 \text{ m/s}^2$, Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt knapp stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt (stabiler als V03).



Bild 9: Versuch V05, $v=15 \text{ km/h}$, $a=1.8 \text{ m/s}^2$, Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt rutscht einige cm. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt (stabiler als V03).

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 22 von 46	

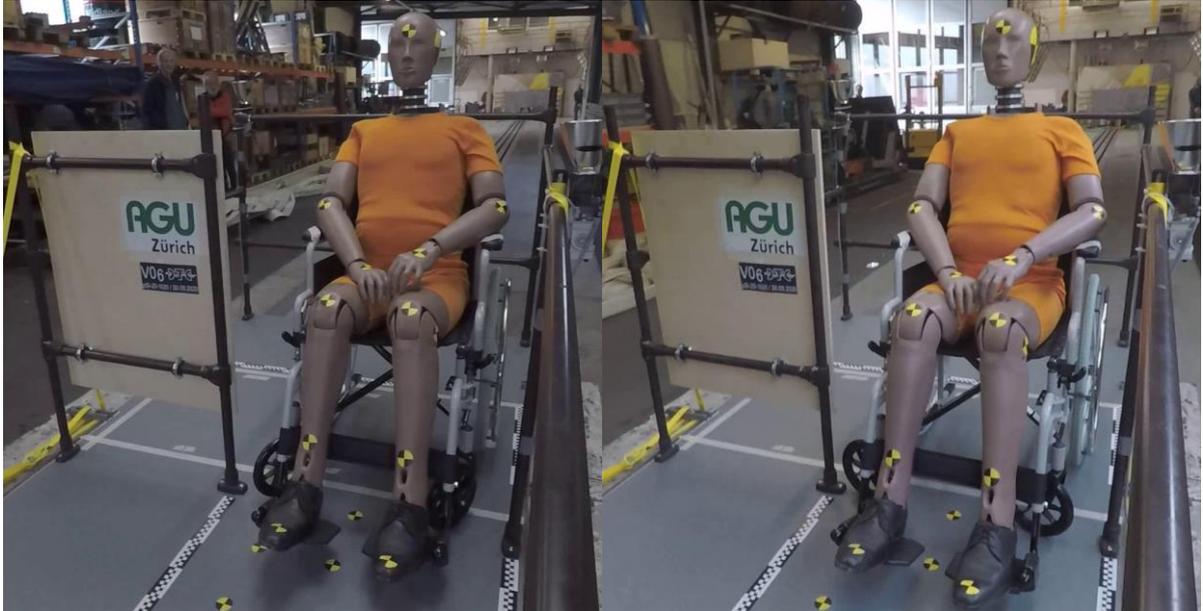


Bild 10: Versuch V06, $v=15$ km/h, $a=2.0$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl rutscht ca. 8 cm. Die Vorderräder sind in schräg gestellt (weniger stabil als V05).

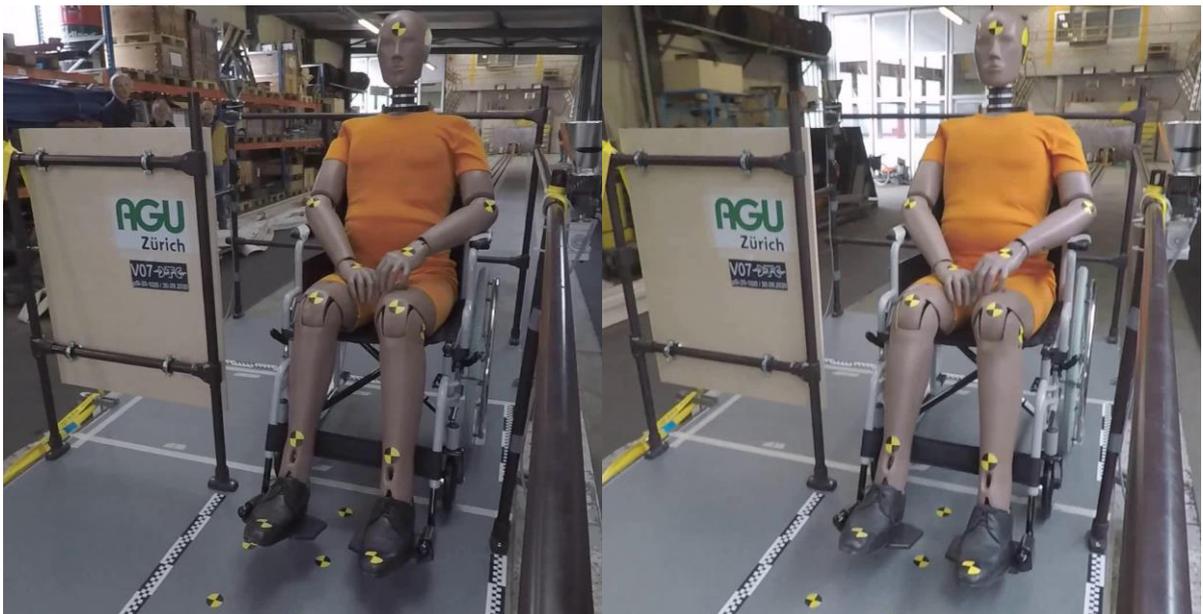


Bild 11: Versuch V07, $v=15$ km/h, $a=1.0$ m/s², Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl rutscht ca. 5 cm. Gegenüber V03 beginnt die Instabilität wegen dem Gefälle viel früher.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 23 von 46	

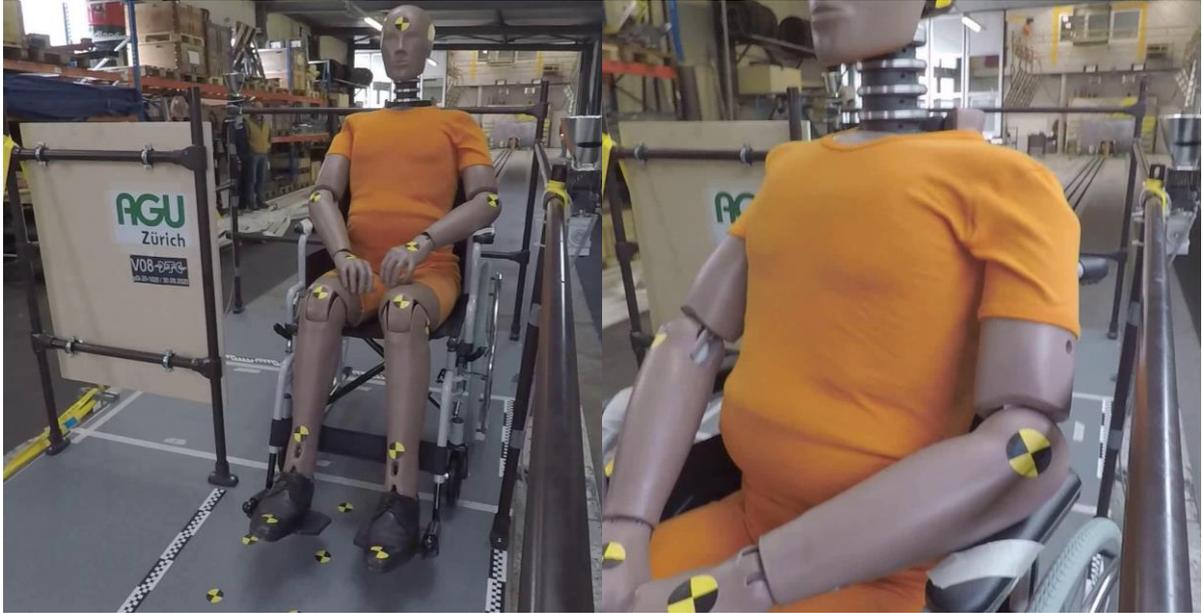


Bild 12: Versuch V08, $v=15\text{ km/h}$, $a=2.0\text{ m/s}^2$, Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl rutscht weit.

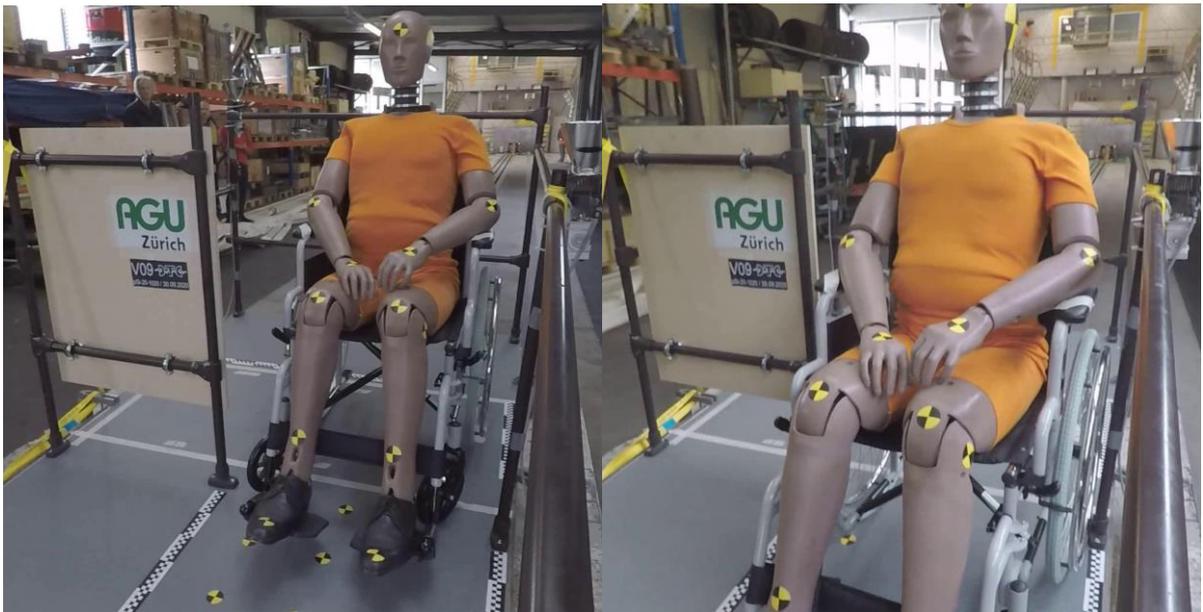


Bild 13: Versuch V09, $v=15\text{ km/h}$, $a=2.0\text{ m/s}^2$, Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl rutscht weit und dreht sich leicht. Die Vorderräder sind schräg gestellt.

In Tabelle 15 sind die Versuche zusammengefasst, in welchen der Rollstuhl entgegen der Fahrrichtung positioniert war. Erwartungsgemäss sind die kritischen Bremsverzögerungen hier etwas höher als in den entsprechenden Versuchen V07 bis V09. Allerdings ist ein Kippen nach hinten für die rollstuhlfahrende Person auch deutlich verletzungsgefährlicher als ein Rutschen nach vorn. Insgesamt wird die Forderung bestätigt, dass der Rollstuhl so nahe wie möglich am Rückhaltesystem positioniert werden soll.

Tabelle 15: Versuche mit Rollstuhl entgegen der Fahrtrichtung.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat
V10	15	2	50	gerade	kippt leicht
V11	15	2.5	50	gerade	kippt



Bild 14: Versuch V10, $v=15$ km/h, $a=2.0$ m/s², Gefälle=50 %. Die Vorderräder werden leicht abgehoben.



Bild 15: Versuch V11, $v=15$ km/h, $a=2.5$ m/s², Gefälle=50 %. Der Rollstuhl kippt vollständig.

6.3. Position quer zur Fahrtrichtung

In Tabelle 16 sind die Versuche zusammengefasst, in denen der Rollstuhl quer zur Fahrtrichtung ausgerichtet war. Die Versuche bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse aus den Handrechnungen. Die Bremsverzögerungen, bei denen die Instabilität beginnt, liegen zwischen 2 und 2.5 m/s² in der Ebene und zwischen 1.5 und 2 m/s² bei 50‰ Gefälle. Die Orientierung der Vorderräder spielt erwartungsgemäss eine nicht unerhebliche Rolle. In allen Versuchen wurde der Rollstuhl so positioniert, dass die Aufstandspunkte der Hinterräder in einem Abstand von 140 mm zur Rückhaltevorrichtung lagen. In Versuch Q07 und Q08 wurde der Rollstuhl gegenüber der Rückhaltevorrichtung um 100 mm (aus Sicht des Rollstuhlfahrers) nach vorne geschoben. Auch in dieser Position wurde der Rollstuhl unter allen Bedingungen durch die Rückhaltevorrichtung aufgehalten. Im Versuch Q13 wurden zwei Rollstühle nebeneinander aufgestellt. Der näher an der Rückhaltevorrichtung positionierte Rollstuhl drehte sich und prallte gegen die Rückhaltevorrichtung. Der weiter entfernte Rollstuhl drehte sich ebenfalls und kollidierte mit dem ersten Rollstuhl. Insgesamt wurde die Bewegung aber zuverlässig durch die Rückhaltevorrichtung aufgehalten, obwohl diese lediglich eine Breite von 600 mm aufwies.

Tabelle 16: Versuche mit Rollstuhl quer zur Fahrtrichtung.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat
Q01	15	1	0	vorn	stabil
Q02	15	2	0	vorn	stabil
Q03	15	2	0	hinten	knapp stabil
Q04	15	2	0	hinten	rustcht quer
Q05	15	2.5	0	hinten	dreht und rutscht
Q06	15	2.5	0	vorn	dreht und rutscht
Q07	15	2.5	0	vorn	dreht und rutscht
Q08	25	2.5	0	vorn	dreht und rutscht
Q09	15	1	50	vorn	stabil
Q10	15	1.5	50	vorn	dreht ganz leicht
Q11	15	2	50	vorn	dreht / rutscht / schlägt an wand
Q12	15	2.5	50	vorn	dreht / rutscht / schlägt an wand
Q13	15	2	50	vorn	

In den folgenden Bildern sind für alle Versuche jeweils links die Ausgangsposition und rechts die Endlage des Rollstuhls dargestellt.

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen	Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	26 von 46



Bild 16: Versuch Q01, $v=15$ km/h, $a=1$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt (stabiler als Q03)



Bild 17: Versuch Q02, $v=15$ km/h, $a=2$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt (stabiler als Q03)

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 27 von 46	



Bild 18: Versuch Q03, $v=15$ km/h, $a=2$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl bleibt knapp stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach hinten gestellt.



Bild 19: Versuch Q04, $v=15$ km/h, $a=2$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Reibungskoeffizient ist nur 0.3, gegenüber 0.45 in allen anderen Versuchen. Der Rollstuhl rutscht seitlich und dreht sich leicht. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach hinten gestellt.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 28 von 46	



Bild 20: Versuch Q05, $v=15$ km/h, $a=2.5$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach hinten gestellt.



Bild 21: Versuch Q06, $v=15$ km/h, $a=2.5$ m/s², Gefälle=0 ‰. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 29 von 46	



Bild 22: Versuch Q07, $v=15 \text{ km/h}$, $a=2.5 \text{ m/s}^2$, Gefälle=0 ‰. Position 10 cm weiter vorn. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.



Bild 23: Versuch Q08, $v=25 \text{ km/h}$, $a=2.5 \text{ m/s}^2$, Gefälle=0 ‰. Position 10 cm weiter vorn und höhere Geschwindigkeit. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen	Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus
			Seite:	30 von 46

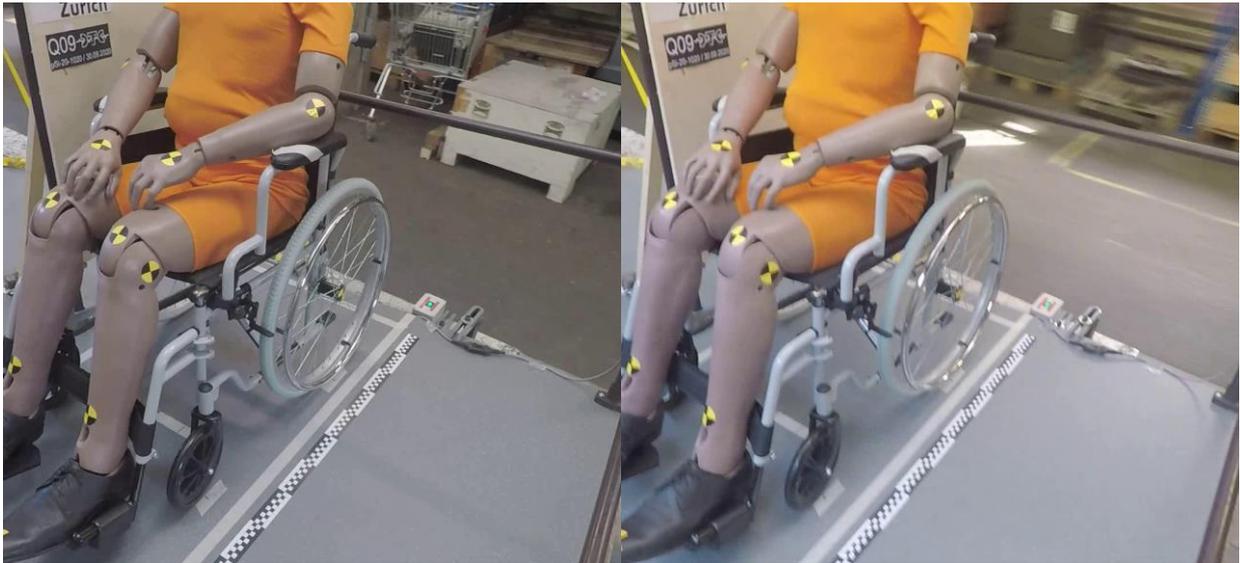


Bild 24: Versuch Q09, $v=15$ km/h, $a=1$ m/s², Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl bleibt stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.

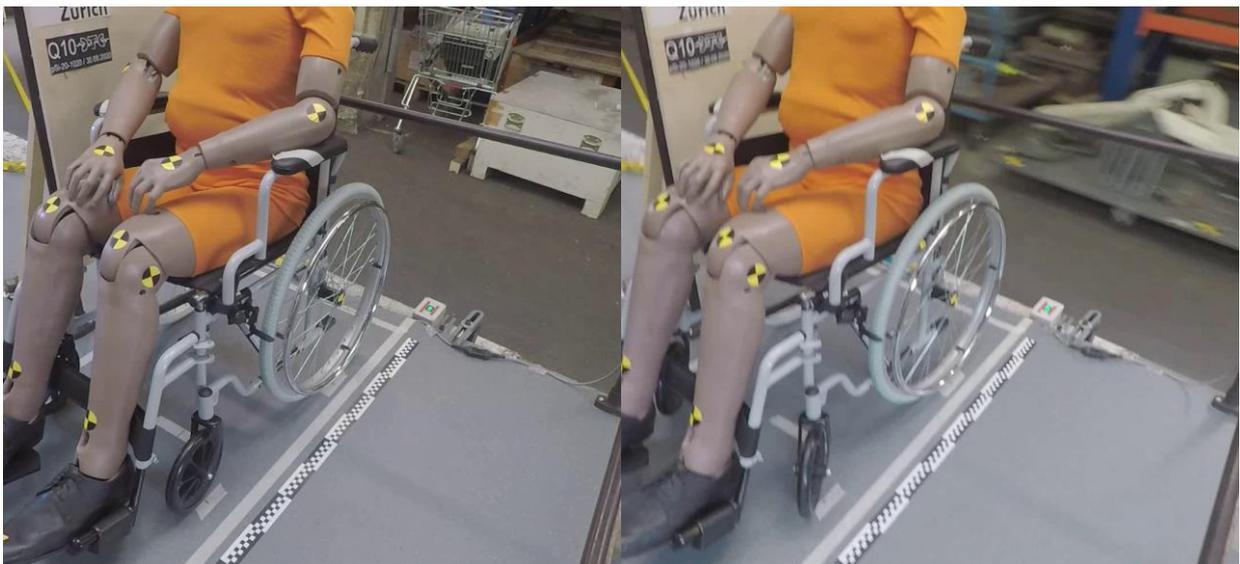


Bild 25: Versuch Q10, $v=15$ km/h, $a=1.5$ m/s², Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl bleibt knapp stabil. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 31 von 46	



Bild 26: Versuch Q11, $v=15$ km/h, $a=2$ m/s², Gefälle=50 ‰. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.



Bild 27: Versuch Q12, $v=15$ km/h, $a=2.5$ m/s², Gefälle=50 ‰, Position 10 cm weiter vorn. Der Rollstuhl rutscht etwas seitlich und dreht sich. Anprall ans RHS. Die Vorderräder sind in Fahrrichtung nach vorn gestellt.

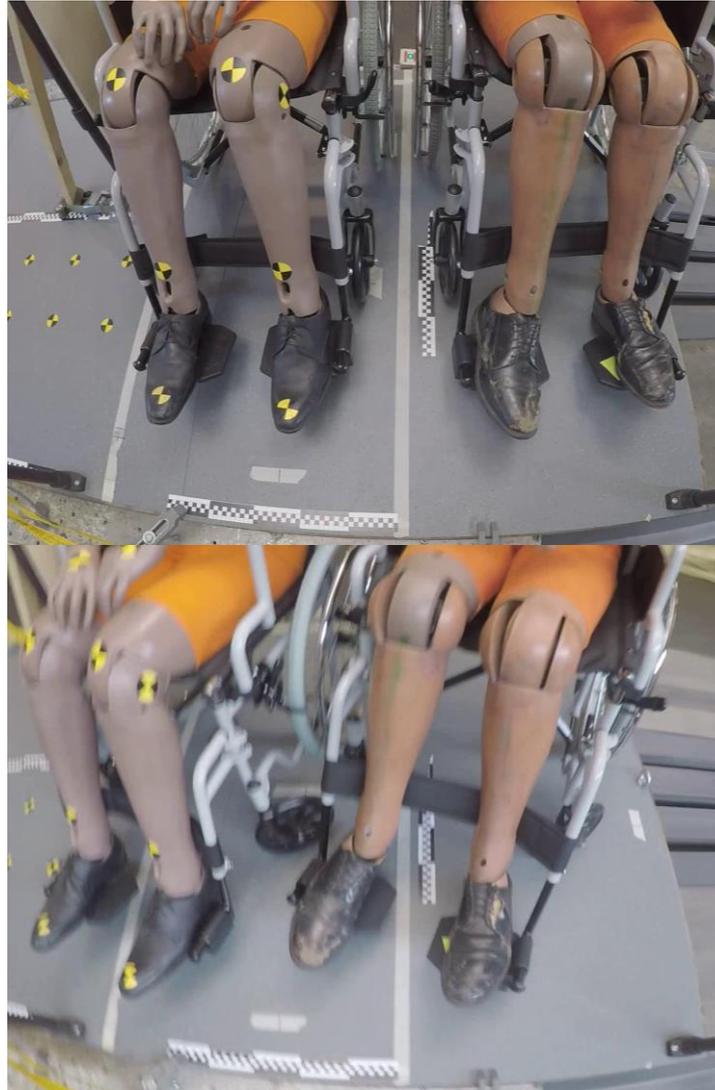


Bild 28: Versuch Q13, $v=15 \text{ km/h}$, $a=2 \text{ m/s}^2$, Gefälle=50 ‰, links: 50-perzentiler männlicher Dummy, rechts: 95-perzentiler männlicher Dummy auf 6 cm breiterem Rollstuhl. Die Rollstühle rutschen etwas seitlich und drehen sich. Anprall ans RHS und Kollision der beiden Rollstühle. Die Rollstühle stabilisieren sich gegenseitig und werden durch das RHS zurückgehalten.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 33	von 46	

7. Simulationen

7.1. Aufbau des Modells

Wie in Kapitel 6 erwähnt sind die durchgeführten Versuche gewissen Einschränkungen unterworfen. Ein grösserer Parameterbereich kann abgedeckt werden, in dem die getestete Konfiguration durch Computersimulationen ergänzt wird. Hierzu eignen sich insbesondere Simulationen mit Mehrkörper-Systemen (MKS). Mehrkörpermodelle approximieren komplexe Strukturen, wie beispielsweise ein Fahrzeug oder einen Dummy, durch einzelne starre Körper, welche durch kinematische Gelenke oder durch masselose Elemente wie Federn oder Dämpfer miteinander verbunden sind. Durch die Gelenke werden Relativbewegungen zweier benachbarter Körper eingeschränkt und dadurch die Freiheitsgrade des Systems reduziert. Zur Modellierung von Kontakten (z.B. zwischen Rollstuhl und Rückhaltevorrückung) sowie zur Visualisierung können den verwendeten Starrkörpern geometrische Formen zugeordnet werden. Für die Modellierung des Menschen oder von Dummies werden dazu meist Ellipsoide, Ebenen und/oder Zylinder verwendet. MKS Modelle bieten die Möglichkeit, komplexe kinematische Modelle effizient zu lösen. Die benötigten Rechenzeiten sind dabei wesentlich kleiner als bei FE-Berechnungen. Ausserdem ist meist auch der Aufbau von MKS-Modellen einfacher.

Die hier diskutierten Simulationen wurden mit dem Programm PC-Crash (V 13, DSD Datentechnik, Linz) durchgeführt. Dieses Programm wurde in erster Linie für die Rekonstruktion von Kollisionen im Strassenverkehr entwickelt. Für die Berechnung z.B. von Fussgängerunfällen steht ein MKS Modul zur Verfügung; das Programm stellt ausserdem Modelle von Fussgängern bzw. Fussgänger-Dummies zur Verfügung, welche in Bezug auf Körpergrösse und –gewicht skaliert werden können.

Zunächst wurde der oben beschriebene Schlitten-Testaufbau modelliert, indem ein generisches Fahrzeugmodell aus der Datenbank mit einer dem Boden des Schienenfahrzeugs entsprechenden Oberfläche versehen wurde. Darauf wurden die Haltestangen mit Zylindern, und eine Rückhaltevorrückung mit einer senkrecht dazu stehenden Ebene modelliert. Um gleiche Bedingungen wie bei den Tests zu erhalten, wurde die Anordnung ebenfalls gekippt, um eine Neigung von 50‰ zu erhalten. Das „Fahrzeug“ fährt also, wie in den Tests, auf einer ebenen Bahn. Im Prinzip kann dies auch geändert werden, das Fahrzeug kann auf jeden beliebigen Neigungsverlauf gebracht werden. Wenn das Modell jedoch möglichst genau den Verhältnissen im Test nachgebildet wird, kann die Übereinstimmung zwischen Test und Simulation besser beurteilt werden, d.h. das Modell kann validiert werden.

Der Rollstuhl wurde entsprechend der im Kapitel 6.1 gezeigten CAD-Zeichnung aufgebaut. Das Modell besteht aus insgesamt 19 Starrkörpern. Ausser den Achsen der Räder und, bei den Vorderrädern, den vertikalen Achsen für die frei nachlaufende Lenkung sind alle Körper mit blockierten Gelenken verbunden. Das Gestänge und der Sitz etc. können sich also in der Simulation nicht gegeneinander bewegen. Die Massen-Trägheitseigenschaften des Rollstuhls wurden aus der CAD-Zeichnung berechnet und sind in einem einzigen Körper, der sich im Schwerpunkt des Rollstuhls befindet, konzentriert. Dies hat den Vorteil, dass man alle anderen Teile (Sitzfläche, Fussstützen, Armlehnen etc.) masselos oder mit geringer Masse definieren kann und somit nicht alle Teile hinsichtlich der Trägheitseigenschaften korrekt nachbil-

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 34 von 46	

den muss. Dennoch erhält man so das korrekte dynamische Verhalten. Die in Bild 29 sichtbaren, rechteckigen Rollstuhlteile sind Hyper-Ellipsoide. Insbesondere die Fussstützen sind etwas massiver repräsentiert als im Original, dies hat technische Gründe und keinen Einfluss auf die Resultate. Die Antriebsräder werden mit Ellipsoiden modelliert, da im benutzten Programm keine Tori zur Verfügung stehen.

Schliesslich kann nun der Rollstuhl auf dem Testaufbau platziert und ein Dummy-Modell in den Rollstuhl eingesetzt werden. Alle hier diskutierten Simulationen wurden mit einem 50-perzentilen männlichen Modell durchgeführt.

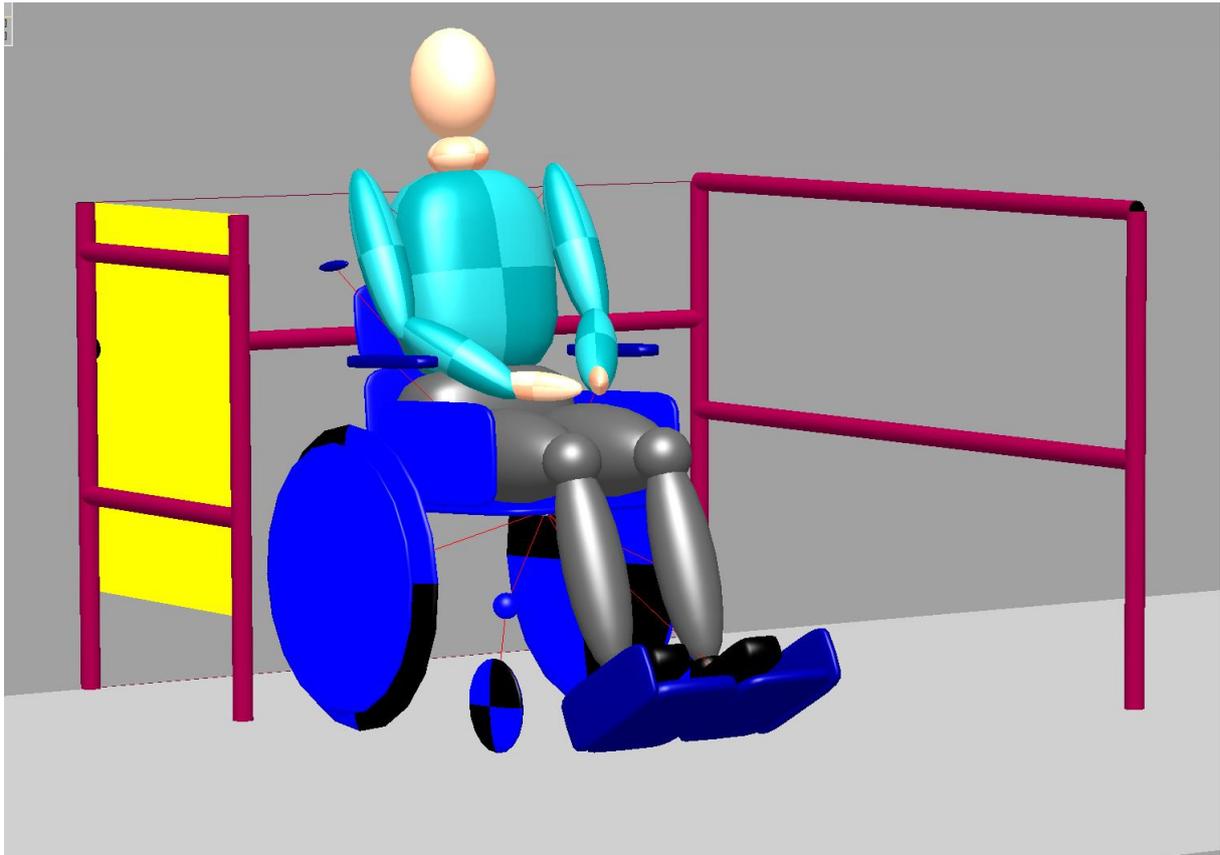


Bild 29: Das fertig aufgebaute Modell mit Testaufbau, Rollstuhl, und 50-perzentilem Dummy. Der Rollstuhl ist im Bild quer zur Fahrtrichtung positioniert. Er befindet sich zu weit vor der Rückhaltevorrichtung, aus Gründen der besseren Darstellbarkeit.

7.2. Vergleich mit den Tests

Um die Plausibilität der Resultate aus der Simulation zu gewährleisten, muss jedes Modell validiert werden. Hier kann das einfach durch einen Vergleich mit den durchgeführten Tests erreicht werden. Wir haben deshalb alle durchgeführten Tests mit entsprechend konfigurierten Simulationen verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 17, Tabelle 18 und Tabelle 19 aufgeführt. Es ergab sich eine gute Übereinstimmung der Simulationen mit den Tests. Unter den Bedingungen, welche in den Tests zu einem Rutschen über eine kurze Distanz führten, rutschte bzw. bewegte sich der Rollstuhl in den Simulationen teilweise etwas weiter. Dies ist zu erwarten, da die Verhältnisse in den Tests nicht immer genau abgebildet werden können. Zu Abweichungen führt, neben den Toleranzen z.B. in der Geometrie und Sitzposition des Dummies im Test gegenüber dem Modell, vor allem die relativ einfache Modellierung der Reibung.

	Titel:	Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum:	1.3 / 2020-12-30		
	Autoren:	mhm	Vis.:	kus	Seite:	35	von	46

Da in den Tests lediglich der Bewegungsablauf des Rollstuhls aufgezeichnet wurde, wird für die Validierung ebenfalls nur der Bewegungsablauf bewertet. Weitere Grössen, wie z.B. an verschiedenen Komponenten auftretende Beschleunigungen, können aus dem validierten Modell entnommen werden. Für die in diesem Bericht im Vordergrund stehenden Fragen sind allerdings lediglich die Bewegungsabläufe bzw. die Bedingungen, unter welchen sich der Rollstuhl überhaupt bewegt, relevant.

Tabelle 17: Versuche mit Rollstuhl in Fahrtrichtung. "ok" bedeutet, dass die Simulation ein sehr ähnliches Resultat wie der Test ergab. Die mit "-" bezeichneten Versuche wurden nicht nachgebildet.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat Test	Simulation
V01	15	1	0	hinten	stabil	ok
V02	15	2	0	hinten	rutscht	ok, s. Bild 30
V03	15	1.5	0	hinten	rutscht knapp	ok, s. Bild 30
V04	15	1.5	0	vorn	rutsch < 1 mm	ok
V05	15	1.8	0	vorn	rutscht 25 mm	ok
V06	15	2	0	schräg	rutscht 80 mm	-
V07	15	1	50	hinten	rutscht 45 mm	ok
V08	15	2	50	hinten	rutscht weit	ok, s. Bild 31
V09	15	2	50	schräg	rutscht, dreht	-

Tabelle 18: Versuche mit Rollstuhl entgegen der Fahrtrichtung. "ok" bedeutet, dass die Simulation ein sehr ähnliches Resultat wie der Test ergab. Die mit "-" bezeichneten Versuche wurden nicht nachgebildet.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat Test	Simulation
V10	15	2	50	gerade	kippt leicht	ok
V11	15	2.5	50	gerade	kippt	ok, s. Bild 32

Tabelle 19: Versuche mit Rollstuhl quer zur Fahrtrichtung. "ok" bedeutet, dass die Simulation ein sehr ähnliches Resultat wie der Test ergab. Die mit "-" bezeichneten Versuche wurden nicht nachgebildet.

Nr	v	a	Gefälle	Fronträder	Resultat Test	Simulation
Q01	15	1	0	vorn	stabil	ok
Q02	15	2	0	vorn	stabil	ok
Q03	15	2	0	hinten	knapp stabil	ok rutscht weiter
Q04	15	2	0	hinten	rutscht quer	ok, s. Bild 33
Q05	15	2.5	0	hinten	dreht und rutscht	ok, s. Bild 33
Q06	15	2.5	0	vorn	dreht und rutscht	ok, s. Bild 33
Q07	15	2.5	0	vorn	dreht und rutscht	ok, s. Bild 34
Q08	25	2.5	0	vorn	dreht und rutscht	
Q09	15	1	50	vorn	stabil	ok, leicht drehend
Q10	15	1.5	50	vorn	dreht ganz leicht	ok, s. Bild 35
Q11	15	2	50	vorn	schlägt an wand	ok, s. Bild 35
Q12	15	2.5	50	vorn	schlägt an wand	ok
Q13	15	2	50	vorn		-

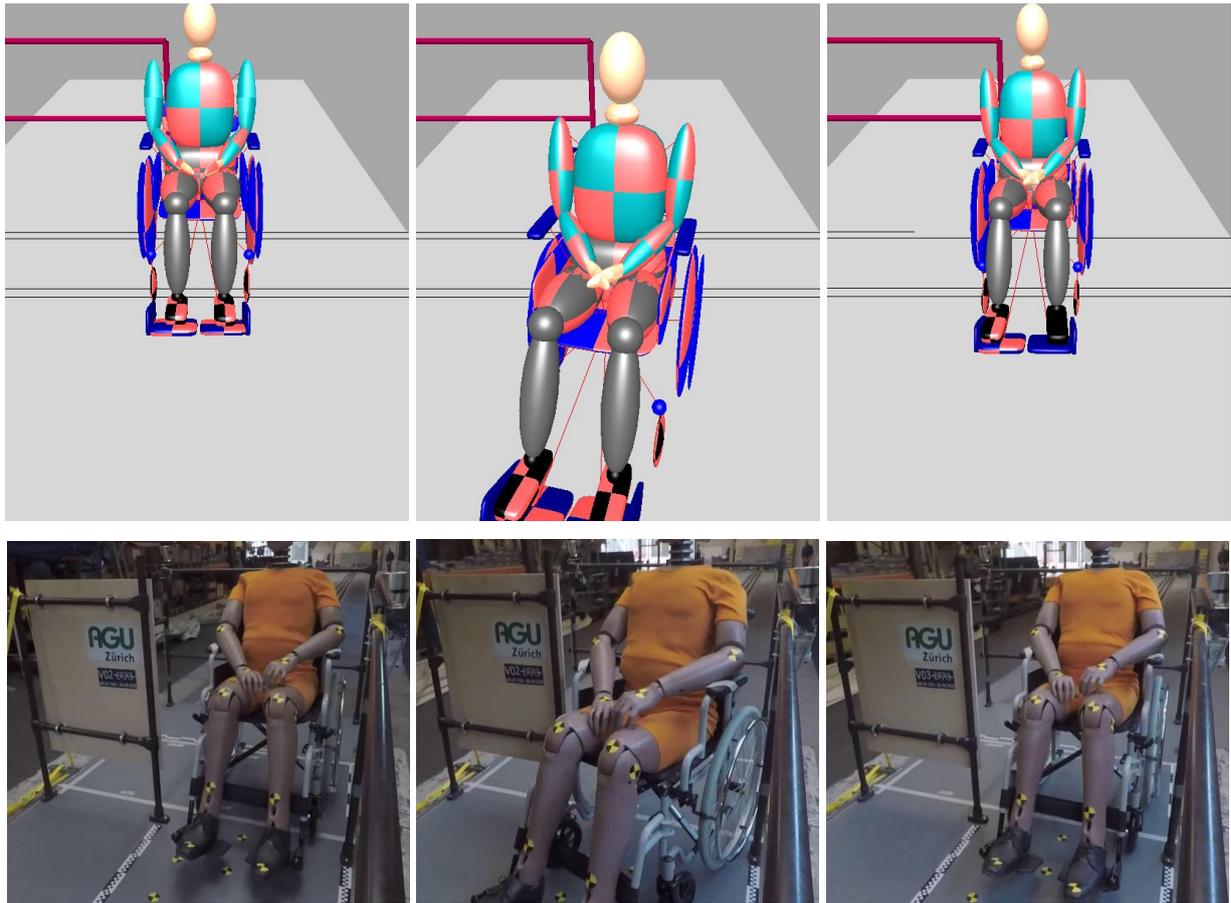


Bild 30: Vergleich Simulation und Test. Links Ausgangsposition, Mitte V02, rechts V03.

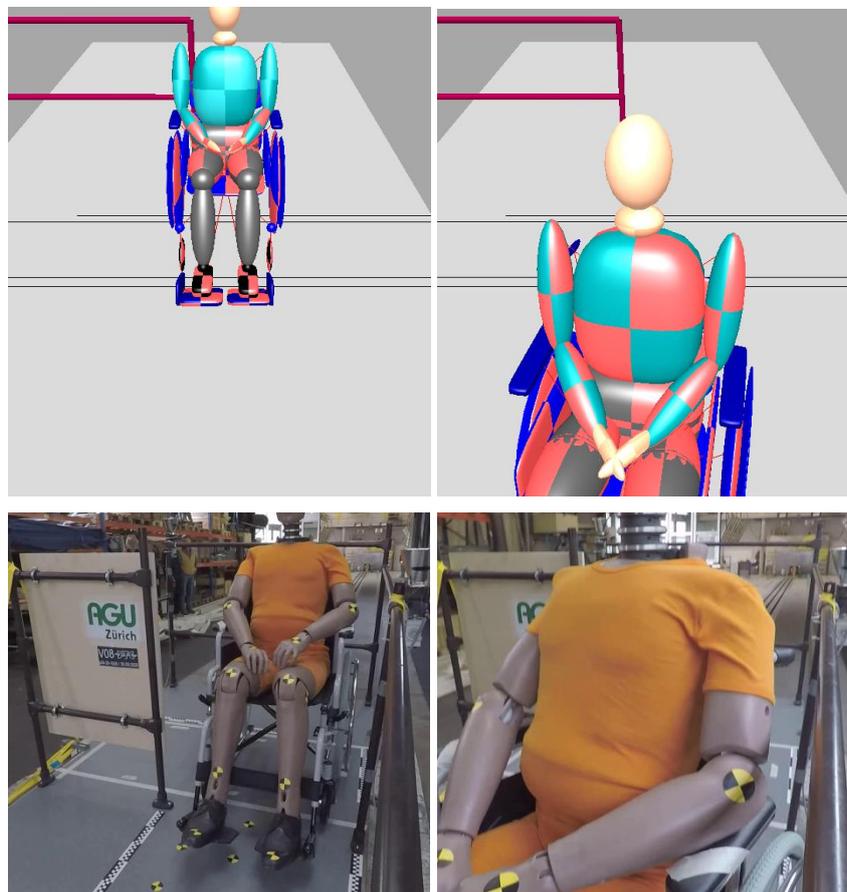


Bild 31: Vergleich Simulation und Versuch V08 ($v=15 \text{ km/h}$, $a=2.0 \text{ m/s}^2$, Gefälle=50 ‰)

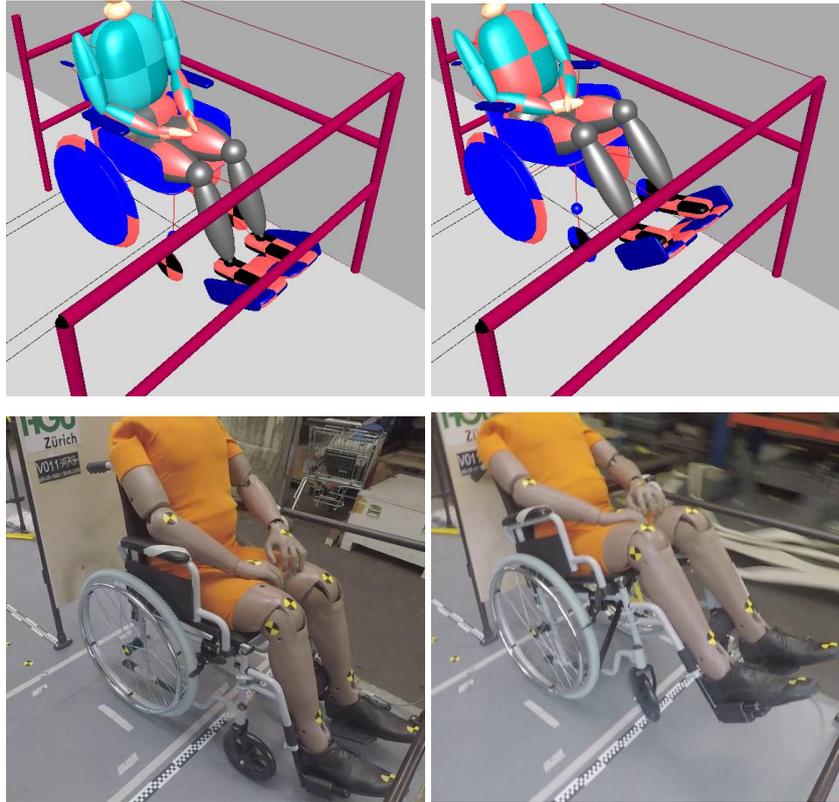


Bild 32: Vergleich Simulation und Versuch V11 ($v=15 \text{ km/h}$, $a=2.5 \text{ m/s}^2$, Gefälle=50 ‰)

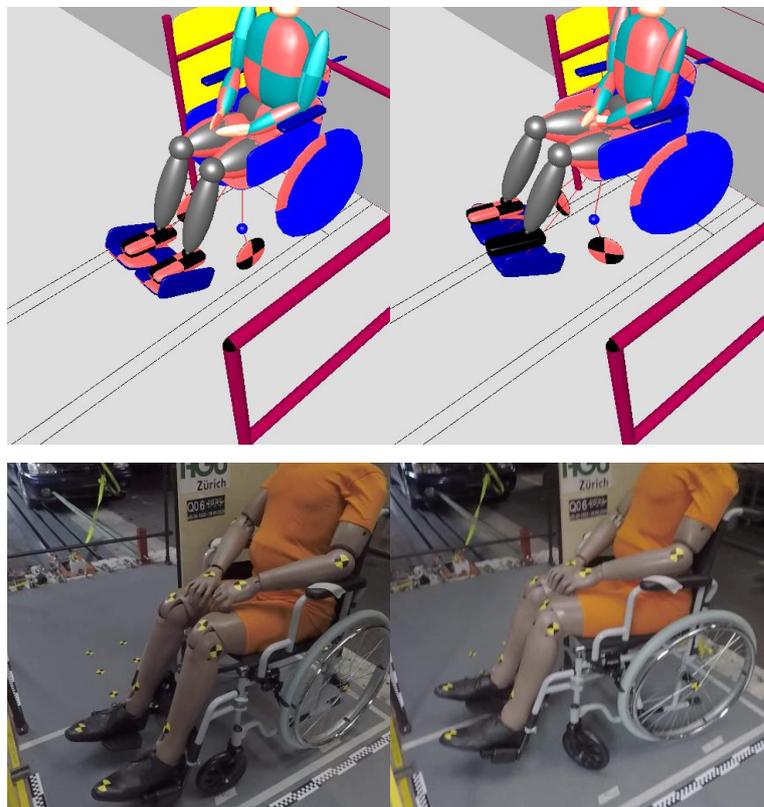


Bild 33: Vergleich Simulation und Versuche Q04 – Q06 (unterschiedliche Beschleunigungen, ohne Gefälle). Die Endlagen waren jeweils sehr ähnlich; hier sind die Simulation und der Versuch Q06 dargestellt.

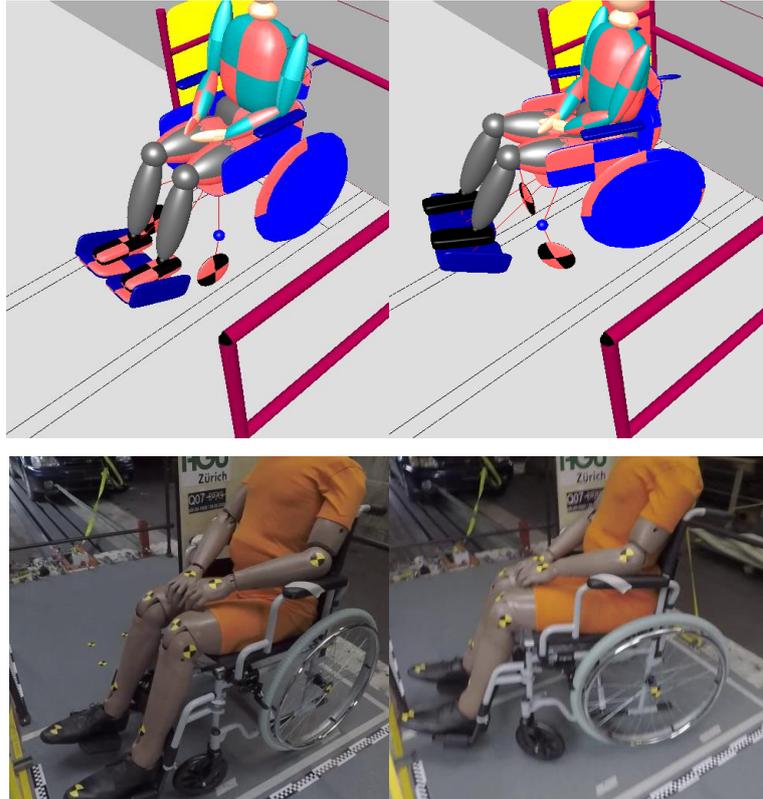


Bild 34: Vergleich Simulation und Versuche Q07 (10 cm weiter vorn als Q04 – Q06).

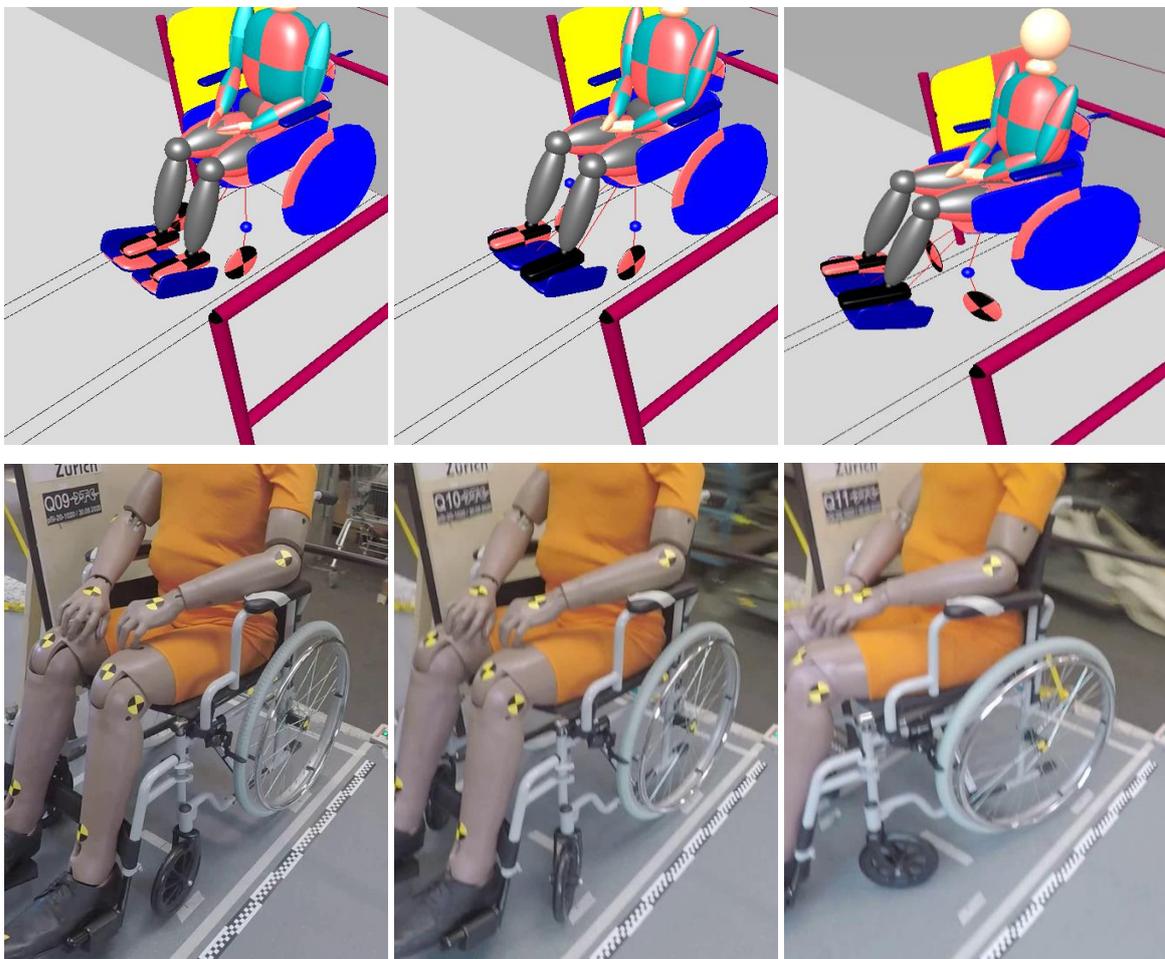


Bild 35: Vergleich Simulation und Versuche Q10 und Q11 (unterschiedliche Beschleunigungen, Gefälle=50 ‰). Die Endlagen waren jeweils sehr ähnlich; Mitte: Endlage Q10, rechts: Endlage Q11.

7.3. Weitere Simulationen / Resultate

Aus den nun vorhandenen Modellen können einerseits weitere Parameter isoliert werden, andererseits können auch weitere Ausgangspositionen, Gefälle oder Brems-Ausgangsgeschwindigkeiten simuliert werden.

Als Beispiel haben wir in Bild 36 Weg und Geschwindigkeit des Rollstuhls relativ zum Fahrzeug unter Bedingungen wie bei V08 ($v=15 \text{ km/h}$, $a=2.0 \text{ m/s}^2$, Gefälle=50 %) aufgezeichnet. Nach ca. 2 s. erreicht der Rollstuhl eine Geschwindigkeit von rund 3 km/h (langsame Fussgänger-Geschwindigkeit), und er ist ca. 40 cm gerutscht. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Anprall an eine 40 cm entfernt stehende Person unter diesen Bedingungen bereits bei einer Brems-Ausgangsgeschwindigkeit von 8 km/h (grüne Kurve in Bild 36) erfolgen würde.

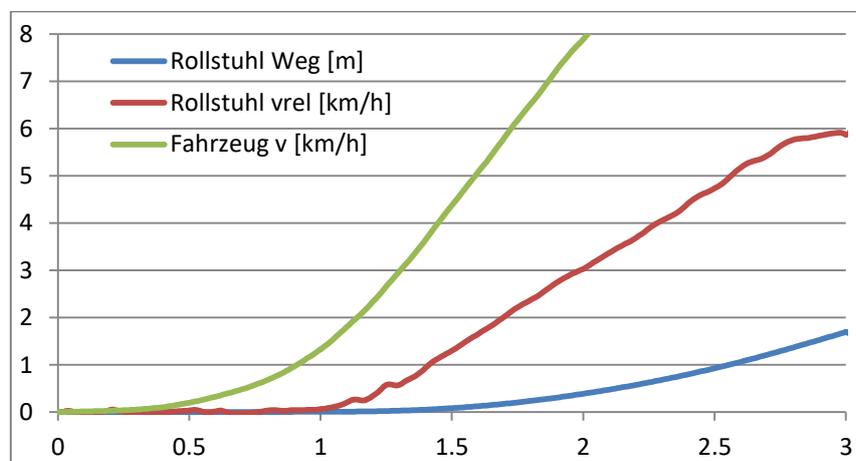


Bild 36: Simulation V08: Weg (blau) und Geschwindigkeit(rot) des Rollstuhls relativ zum Fahrzeug, und Brems-Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs (grün).

Als Beispiel für weitere Simulationen haben wir modelliert, wie sich ein weit entfernt von der Rückhaltevorrichtung quer zur Fahrtrichtung positionierter Rollstuhl verhalten würde. Diese Situation kann zum Beispiel eintreten, wenn der Platz von zwei Personen benutzt wird, und die näher an der Rückhaltevorrichtung positionierte Person das Fahrzeug verlässt.

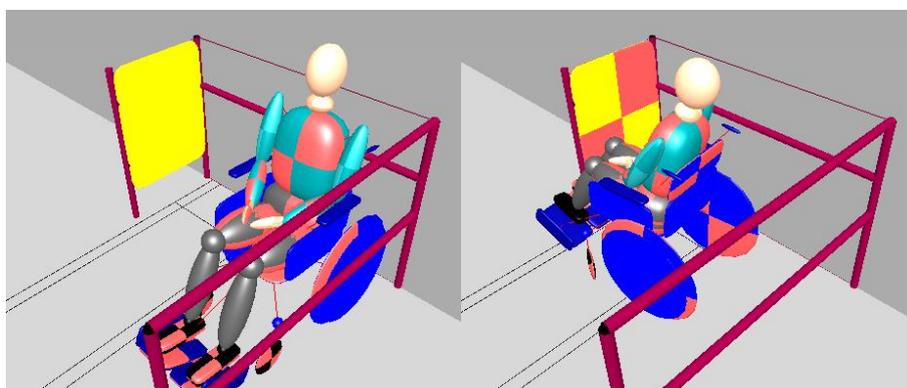


Bild 37: Wenn die rollstuhlfahrende Person nicht nahe genug an der Rückhaltevorrichtung positioniert ist, dreht sich der Rollstuhl vollständig ab und prallt mit den Fuss-Stützen seitlich an die Rückhaltevorrichtung (Bedingungen wie Q11, $v=15 \text{ km/h}$, $a=2 \text{ m/s}^2$, Gefälle=50 %).

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen			Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 40	von 46	

8. Diskussion / Empfehlungen

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass ein in Fahrtrichtung positionierter Rollstuhl auch auf ebener Strecke ins Rutschen gerät, wenn die Bremsverzögerung ca. 1.5 m/s^2 überschreitet. Bei einem Gefälle von 50 ‰ geschieht dies sogar bereits zwischen 1.0 und 1.5 m/s^2 . Die Betriebsbremsung muss nach EN 13452-1 mindestens 1.2 m/s^2 (maximal zulässig sind 2.0 m/s^2) erreichen. Verzögerungen in dieser Größenordnung sind also verhältnismässig oft zu erwarten.

Die Position entgegen, also mit dem Rücken zur Fahrtrichtung, ist daher aus Sicht der Stabilitätsbetrachtungen in jedem Fall vorzuziehen. Diese Position bietet einen ausreichenden Schutz auch bei höheren Verzögerungswerten (z.B. 2.8 m/s^2).

Zwar hat die vorliegende Arbeit gezeigt, dass der Rollstuhl bei Bremsverzögerungen ab ca. 2 m/s^2 (Gefälle = 50 ‰) kippen kann. Wenn der Rollstuhl aber in einer Distanz kleiner als ca. 10 cm vom Rückhaltesystem entfernt positioniert wird, entsteht dadurch keine Gefahr.

In Zweirichtungsfahrzeugen von Strassenbahnen oder von Bahnen mit Strecken / Streckenabschnitten mit Neigungen >50 ‰ müssen Rollstuhlplätze vorhanden sein, welche für beide Fahrtrichtungen je eine Rückhaltevorrückung aufweisen. Am Rollstuhlplatz ist ein entsprechender Hinweis bezüglich der Positionierung rückwärts zur Fahrtrichtung anzubringen. Die Rückhaltevorrückungen sollen in einem Abstand von 150 cm angeordnet sein. Falls der gleichzeitige Transport von zwei nebeneinander quer zur Fahrtrichtung orientierten Rollstühlen erlaubt wird (nur bei Strassenbahnen), soll der Abstand 160 cm betragen. Falls sich eine Person im Rollstuhl in der falschen Richtung platziert, wird so die Rutschdistanz und damit die Geschwindigkeit, mit welcher ein Anprall an die Rückhaltevorrückung erfolgte, auf ein akzeptables Mass begrenzt. Tabelle 20 im Anhang A-1 zeigt die verschiedenen möglichen Steigungsverläufe und Rollstuhl-Positionen.

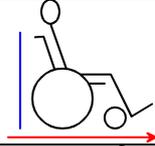
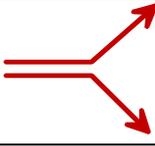
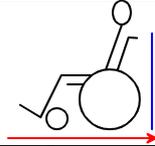
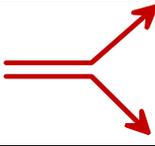
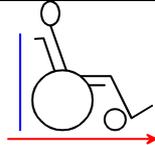
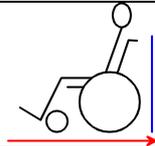
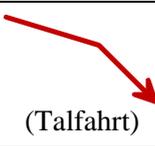
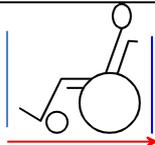
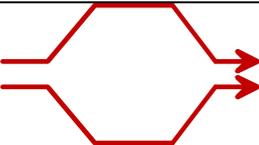
Aufgrund der bisherigen Diskussionen sind Vorrichtungen, welche eine Bedienung durch die rollstuhlfahrende Person erfordern (Gurte, Schranken, Bügel etc.) problematisch, vor allem, weil sie von vielen rollstuhlfahrenden Personen nicht selber bedient werden können. Ein Bodenbelag mit höherer Reibung ist aus operationellen Gründen schwierig (Reinigung).

Auf Strecken mit Steigungen im Bereich von 130 ‰ und mehr, also z.B. Zahnradbahnen, sollte der Rollstuhl immer mit dem Rücken zum Tal positioniert werden; andernfalls könnte er bereits durch Vibrationen oder ein Schwanken des Fahrzeugs ins Rutschen geraten.

Elektrorollstühle wurden auftragsgemäss in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Unserer Einschätzung nach dürfte das Gefahrenpotenzial insgesamt jedoch etwas tiefer liegen als bei Handrollstühlen, weil Elektrorollstühle einen tieferen Schwerpunkt als Handrollstühle aufweisen. Durch das höhere Gewicht wird auch der Schwerpunkt des Gesamtsystems Person-Rollstuhl nach unten verlagert. Nach einer groben Abschätzung erhöhen sich dadurch die kritischen Bremsverzögerungen für alle Situationen um ungefähr 0.5 m/s^2 . Ein nach den oben aufgeführten Empfehlungen konzipierter Rollstuhlplatz dürfte somit auch für Elektrorollstühle tauglich sein.

A-1. Szenarien bezüglich Steigungsverlauf und Rollstuhlorientierung

Tabelle 20: Verschiedene Kombinationen von Steigungsverlauf und Orientierung des Rollstuhls in oder entgegen der Fahrtrichtung.

Szenario	Sitzposition	Steigungsverlauf	Kommentar
A			Strecke mit Neigungen bis 50‰ (in neuen Strassenbahnen nicht erlaubt)
B			Strecke mit Neigungen bis 50‰ (empfohlen)
C1		 (Bergfahrt)	Strecke mit Steigungen >50‰ ohne Gegengefälle
C2		 (Talfahrt)	Strecke mit Neigungen >50‰ ohne Gegensteigung
D			Strecke mit Neigungen >50‰ mit Gegengefälle / Gegensteigung (nur Zweirichtungsfahrzeuge)

A-2. Dimensionen des Systems Rollstuhl - Insasse

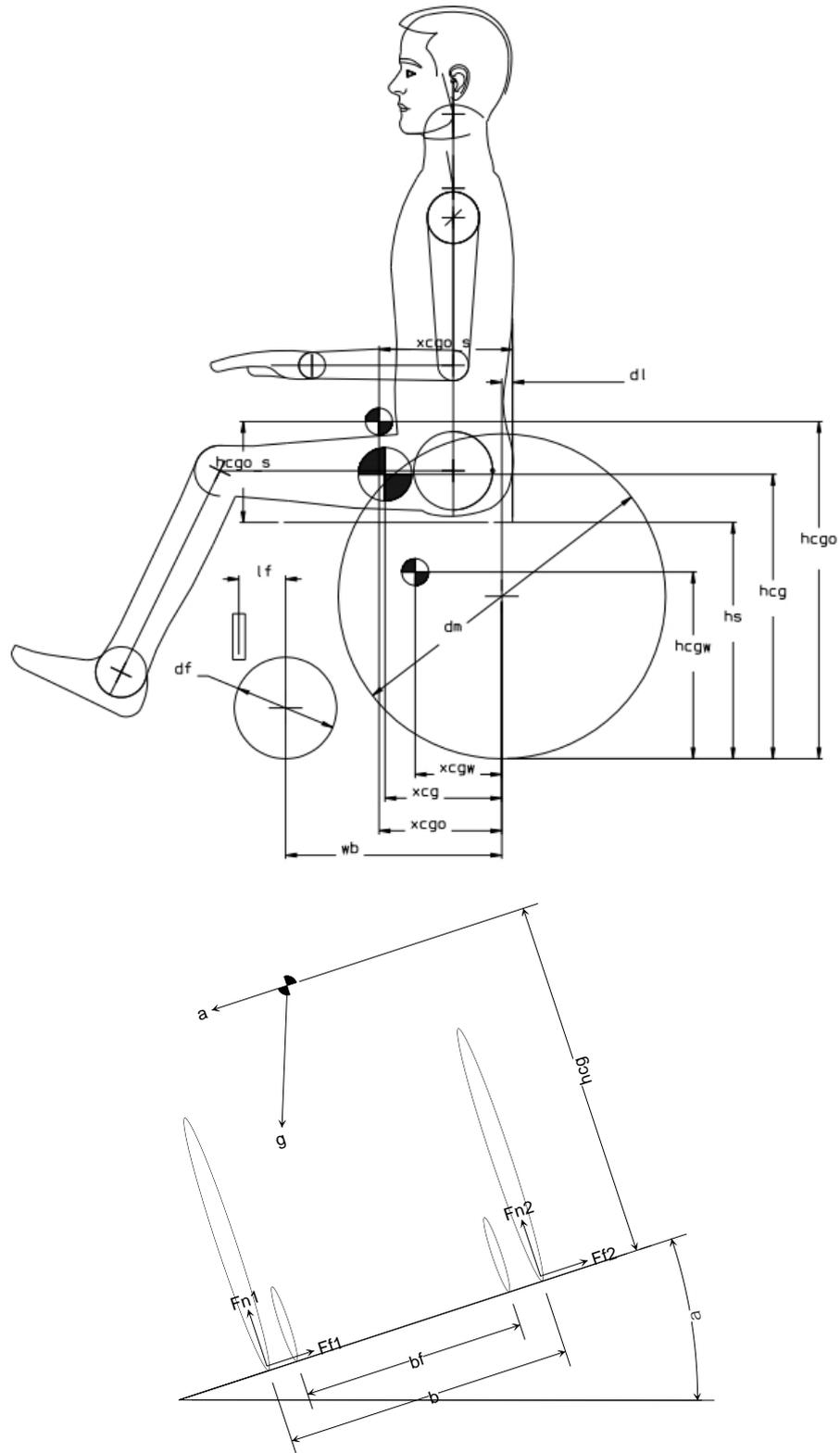


Bild 38: oben: Dimensionen des Systems Rollstuhl-Insasse und die im Bericht verwendeten Bezeichnungen. Unten: am System angreifende Kräfte und die dafür verwendeten Bezeichnungen.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 43 von 46	

A-3. Kritische Beschleunigungen

Annahmen

Für die Berechnungen wird von den folgenden Annahmen und Voraussetzungen ausgegangen:

- Nur die Hinterräder sind gebremst. Die gesamte Reibungskraft wird demnach entsprechend der Lastverteilung zwischen Hinter- und Vorderachse reduziert (kr in Tabelle 3)
- Das Schienenfahrzeug fährt auf einer Strecke mit Gefälle α . Die Bremsverzögerung a wirkt entlang, bzw. parallel zu der Schiene. Kräfte etc. sind immer in einem Koordinatensystem angegeben, welches parallel zur Schiene orientiert ist.
- Der Umstand dass sich der Radstand ändert weil die Vorderräder frei drehen können wird vernachlässigt. Ebenso wird vernachlässigt, dass die Spurbreite der Vorderräder normalerweise etwas kleiner ist als diejenige der Hinterräder. Diese Vereinfachungen ergeben eine etwas höhere Stabilität des Rollstuhls.
- Das System Rollstuhl plus Dummy wird als starr angesehen, der Schwerpunkt ändert sich also nicht weil der Dummy z.B. zur Seite oder nach vorn kippen könnte.

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 44 von 46	

Rutschen vorwärts

Der Rollstuhl beginnt zu rutschen, wenn die Reibungskraft, welche durch die gebremsten Hinterräder aufgebracht wird, kleiner wird als die Kraft, welche durch die Bremsverzögerung und die Hangabtriebskraft entsteht. Da die Reibung an den Vorderrädern hier mit Null angenommen wird, kann der Rollstuhl nach dieser Berechnung nicht kippen, nur Rutschen.

- (1) Die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kräfte sind:

$$F_{n1} = \frac{xcg}{wb} mg \cos \alpha + \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha) \text{ and}$$

$$F_{n2} = \frac{wb - xcg}{wb} mg \cos \alpha - \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha)$$

Wobei F_{n1} für das tiefer liegende, F_{n2} für das höher liegende Rad gilt.

- (2) Die kritische Bremsverzögerung ist:

$$F_{n2} \mu = m(a + g \sin \alpha)$$

- (3) nach a aufgelöst erhält man:

$$a = g \cdot \frac{\mu(wb - xcg) \cos(\alpha) - (wb + \mu \cdot h) \sin(\alpha)}{wb + \mu \cdot h}$$

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 45 von 46	

Kippen rückwärts

Der Rollstuhl beginnt zu kippen, wenn die normal zur Standfläche an den Vorderrädern angreifende Kraft Null ist. Er beginnt zu rutschen, wenn der Reibungskoeffizient klein genug ist, dass die Bedingung (2) vor der Bedingung (3) erfüllt ist.

- (1) Die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kräfte sind:

$$F_{n1} = \frac{wb - xcg}{wb} mg \cos \alpha + \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha)$$

$$F_{n2} = \frac{xcg}{wb} mg \cos \alpha - \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha)$$

Wobei F_{n1} für das tiefer liegende, F_{n2} für das höher liegende Rad gilt.

- (2) Der kritische Fall für Rutschen ist:

$$F_{n1} \mu = m(a + g \sin \alpha)$$

- (3) nach a aufgelöst erhält man:

$$a = g \cdot \frac{\mu \cdot (wb - xcg) \cdot \cos(\alpha) - (wb - \mu \cdot h) \sin(\alpha)}{wb - \mu \cdot h}$$

- (4) Der kritische Fall für Kippen ist

$$F_{n2} = \frac{wb - xcg}{wb} mg \cos \alpha - \frac{h}{wb} m(a + g \sin \alpha) = 0$$

- (5) nach a aufgelöst erhält man:

$$a = g \cdot \frac{xcg \cdot \cos(\alpha) - h \cdot \sin(\alpha)}{h}$$

	Titel: Rollstühle in Eisenbahnfahrzeugen bei Neigungen >50‰ und in Zweirichtungs-Strassenbahnfahrzeugen		Version / Datum: 1.3 / 2020-12-30	
	Autoren: mhm	Vis.: kus	Seite: 46 von 46	

Drehen / Rutschen seitwärts

Die Gesamtkraft, welche auf den Schwerpunkt des Systems Rollstuhl-Dummy wirkt setzt sich zusammen aus der Bremskraft ma plus der parallelen Komponente der Gewichtskraft (Hangabtriebskraft) $mg\sin(\alpha)$. Diese Kraft erzeugt ein Drehmoment um den Aufstandspunkt des tiefer liegenden Rades. Wenn dieses Moment gross genug wird, um die vom höher liegenden Rad erzeugte Reibungskraft zu kompensieren, beginnt sich der Rollstuhl zu drehen und zu rutschen.

- (1) Die normal zum Fahrzeugboden wirkenden Kräfte sind:

$$F_{n1} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha + \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha)$$

$$F_{n2} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha - \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha)$$

Wobei F_{n1} für das tiefer liegende, F_{n2} für das höher liegende Rad gilt. Wenn man

$$F_{n2} = \frac{1}{2}mg\cos\alpha - \frac{h}{b}m(a + g\sin\alpha) = 0$$

nach a auflöst erhält man die kritische Beschleunigung für ein allfälliges Kippen.

- (2) Das Drehmoment um den unteren Radaufstandspunkt beträgt:

$$M = xcg \cdot m(a + g\sin\alpha)$$

und erzeugt die Kraft

$$F_r = \frac{M}{b} = \frac{1}{b} \cdot xcg \cdot m(a + g\sin\alpha)$$

am höher liegenden Rad.

- (3) Der Rollstuhl dreht sich wenn

$$F_{n2}\mu k_r < F_r$$

wobei μ der Haftreibungskoeffizient zwischen Rad und Fahrzeugboden ist. k_r ist die Lastverteilung zwischen Vorder- und Hinterachse, da nur die Hinterachse gebremst ist.

- (4) Der kritische Fall

$$F_{n2}\mu k_r = F_r \quad \text{i.e.} \quad \frac{1}{b} \cdot xcg \cdot m(a + g\sin\alpha) = \frac{1}{2}m\mu k_r g\cos\alpha - \frac{h}{b}m\mu k_r(a + g\sin\alpha)$$

wird nach a aufgelöst:

- (5) Womit sich für die kritische Bremsverzögerung ergibt:

$$a_{ro} = \frac{\frac{b}{2}\mu k_r g\cos\alpha - h\mu k_r g\sin\alpha - xcg \cdot g\sin\alpha}{xcg + h\mu k_r}$$