

UNTERSUCHUNG MÖGLICHER GEFÄHRDUNGSPOTENZIALE

BEI DER

BEFÖRDERUNG VON ELEKTROMOBILEN (E-SCOOTERN)

IN LINIENBUSSEN

SCHLUSSBERICHT

STUVA

Mathias-Brüggen-Str. 41 • 50827 Köln

Auftraggeber

VDV – Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V., Landesgruppe Nordrhein-Westfalen
Ansprechpartner: Volker Wente
Kamekestraße 37-39
50672 Köln

Auftragnehmer

STUVA e. V. (Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V.)
Mathias-Brüggen-Straße 41
50827 Köln
Tel.: 0221/59795-0
Fax: 0221/59795-50
www.stuva.de

Bearbeiter:

Dr.-Ing. Dirk Boenke (Projektleitung)
Dipl.-Phys. Ing. Klaus Martini

Köln, im Mai 2014

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Veranlassung und Aufgabenstellung.....	3
2 Ermittlung spezifischer Gefährdungspotenziale bei der Mitnahme von Elektromobilen in Linienbussen.....	4
2.1 Definition und Kennwerte für „Elektromobile“	4
2.2 Auswahl von Typvarianten	6
2.3 Überprüfung der Standsicherheit.....	7
2.3.1 Rechnerischer Nachweis der Standsicherheit	8
2.3.2 Messungen und Fahrversuche im Realverkehr mit Rollstühlen.....	18
2.4 Weitere Gefährdungspotenziale	20
3 Zusammenfassung und Fazit	22
4 Quellen	25

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Der fortschreitende und grundsätzlich zu begrüßende barrierefreie Ausbau des ÖPNV ermöglicht und vereinfacht auch in zunehmendem Maße die Mitnahme von Elektromobilen (E-Scooter) in den eingesetzten Fahrzeugen. Der VDV hat beobachtet, dass von der Möglichkeit der Mitnahme mit steigender Tendenz Gebrauch gemacht wird und rechnet mit weiter steigenden Beförderungszahlen für diese Gruppe. Beim Ein- und Ausfahren aus den Linienbussen wurden allerdings von verschiedenen Verkehrsunternehmen bereits kritische Situationen beobachtet und auch im Fahrzeug kam es teilweise bereits zu einem Umkippen der Fahrzeuge. Aus diesen Beobachtungen lässt sich ein möglicherweise erhöhtes Gefährdungspotenzial für andere Fahrgäste, den Betrieb allgemein, aber auch für die Nutzer der Elektromobile selbst vermuten.

Die Mitnahme von Hilfsmitteln in öffentlichen Verkehrsmitteln ist grundsätzlich nur zulässig, wenn die betriebliche Sicherheit in keiner Weise gefährdet wird (vgl. §11 Abs. 1 BefBedV) [6]. Auch aufgrund der oben erwähnten eigenen Erfahrungen handhaben die Verkehrsunternehmen in Deutschland die Mitnahme der Elektromobile derzeit allerdings nicht einheitlich (vgl. z. B. [5; 11; 16; 17]):

- In einigen Fällen wurde die Mitnahme bereits gänzlich ausgeschlossen;
- in anderen Fällen bestehen Einschränkungen bei der Mitnahme bei Überschreitung von bestimmten Abmessungen;
- in einigen Verkehrsunternehmen wird eine Entscheidung über die Mitnahme anhand der Kennzeichnung mit einem Versicherungskennzeichen getroffen;
- oftmals wird die Einschätzung der Einhaltung der Vorgaben und die Abschätzung einer Betriebsgefährdung und somit die Entscheidung über eine Mitnahme eines Elektromobils dem Fahrpersonal überlassen;

Diese Vielfalt an Regelungen hat auch bei den Nutzern bereits für Irritationen gesorgt und stellt keine Sicherheit für eine Reiseplanung dar, da die letztendliche Entscheidung über eine Mitnahme in der Verantwortung des Fahrpersonals liegt. Die am Markt erhältliche Typenvielfalt und fehlende Standardisierung lässt allerdings in vielen Fällen keine scharfe Abgrenzung aufgrund von Merkmalen zu. Im Sinne einer verständlichen und nachvollziehbaren Lösung für die Nutzer von Elektromobilen und zur Entlastung des Fahrpersonals wäre – zunächst unabhängig von Sicherheitsfragen – eine eindeutige und einheitliche Regelung anzustreben. Die Gewährleistung der betrieblichen Sicherheit bei der Mitnahme von Elektromobilen spielt dabei allerdings eine zentrale Rolle.

Der VDV möchte aufgrund dieser Ausgangslage das möglicherweise vorhandene betriebliche Gefährdungspotenzial (vor allem bezüglich der Standsicherheit) durch Elektromobile bei der Mitnahme in Linienbussen abschätzen lassen. Das Ergebnis ist von hoher Relevanz für die Ausgestaltung einer zukünftigen Mitnahmeregelung für diese Fahrzeuge.

Die vorliegende Untersuchung analysiert das mögliche Gefährdungspotenzial bei der Mitnahme von Elektromobilen in Linienbussen. Dabei wird insbesondere die Standsicherheit mittels Berechnungsverfahren auf Grundlage physikalischer Gegebenheiten untersucht. Die Bewertung stützt sich zudem

auf eine bereits abgeschlossene Untersuchung, bei der Messungen und Beobachtungen beim Transport von Rollstühlen in Linienbussen erfolgten. Eine Durchführung von eigenen Messungen an Elektromobilen während des Transports war nicht Bestandteil des Arbeitsprogramms der hier vorgelegten Untersuchung. Ebenso war die Beurteilung rechtlicher Fragen bezüglich der Mitnahmeregelung von Elektromobilen im öffentlichen Personennahverkehr nicht Bestandteil der Aufgabenstellung.

2 Ermittlung spezifischer Gefährdungspotenziale bei der Mitnahme von Elektromobilen in Linienbussen

Zunächst wurde anhand einer einfachen Markterhebung (Internetrecherche) eine Typenerhebung der am Markt erhältlichen Elektromobile durchgeführt (ohne Anspruch auf Vollständigkeit). Dabei wurden z. B. Gewicht und mögliche Zuladung sowie Anzahl der Räder erhoben. Anschließend wurden auf Grundlage dieser Einstufung und mithilfe eines Hilfsmittelvertriebs drei unterschiedliche Typen von Elektromobilen für die Untersuchung ausgewählt, welche die wichtigsten Merkmale der am häufigsten anzutreffenden Modelltypen abdecken sollten. Für diese Modelle wurde der rechnerische Nachweis der Standsicherheit bei bestimmten Fahrmanövern eines Linienbusses durchgeführt (Kippen, Rutschen). Für diesen Nachweis wurden Kraft-Rechenmodelle entwickelt und angewendet. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials im Betrieb analysiert. Abschließend wurden weitere Gefährdungspotenziale, die sich beim Transport von Elektromobilen in Linienbussen einstellen können, ermittelt.

2.1 Definition und Kennwerte für „Elektromobile“

„Elektromobil“ (auch E-Scooter oder Seniorenmobil) ist die gebräuchliche Bezeichnung für kleine, mehrspurige, offene und elektrisch angetriebene Leichtfahrzeuge, die nur einen Fahrzeugführer (zuzüglich einer geringen Menge Gepäck, z. B. Einkäufe) befördern können. Gemäß der „Verordnung über die Zulassung von Fahrzeugen zum Straßenverkehr“ (FZV) [7] handelt es sich bei Elektromobilen um *„einsitzige, nach der Bauart zum Gebrauch durch körperlich behinderte Personen bestimmte Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb, einer Leermasse von nicht mehr als 300 kg einschließlich Batterien jedoch ohne Fahrer, einer zulässigen Gesamtmasse von nicht mehr als 500 kg, einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von nicht mehr als 15 km/h und einer Breite über alles von maximal 110 cm“* (§ 2 Abs. 13 FZV). Der rechtlich korrekte Begriff lautet „motorisierter Krankenfahrstuhl“. In diesem Bericht wird der gebräuchliche Begriff „Elektromobil“ verwendet.¹ Durch die Definition in der FZV wird bereits die mögliche Spannweite bei der Ausgestaltung der Elektromobile deutlich.

Elektromobile werden von den Krankenkassen als orthopädisches Hilfsmittel verschrieben, *„wenn die Benutzung handgetriebener Rollstühle aufgrund der Behinderung nicht mehr möglich ist, die sachgerechte Bedienung eines elektromotorischen Antriebes aber noch möglich ist. Eine Restgehfähigkeit ist für die Nutzung derartiger Produkte erforderlich.“* [14]. Elektromobile werden zunehmend von älteren Menschen als Freizeitgeräte angeschafft, um ihren Mobilitätsradius zu erweitern.

¹ Der Begriff E-Scooter (oder Elektro-Scooter) wird zudem in der Regel im Zusammenhang mit Elektromotorrollern verwendet (kleine Motorroller mit elektrischem Antrieb).

Elektromobile sind bezüglich ihrer Abmessungen nicht genormt.² Sie werden daher in unterschiedlichen Konfigurationen mit einer großen Typvielfalt im Rahmen der o. g. Definition angeboten. Stichpunktartige Recherchen bei verschiedenen Herstellern und im Hilfsmittelverzeichnis ergaben eine erhebliche Spannweite, z. B. bei den Abmessungen, beim Leergewicht und bei der zulässigen Zuladung (vgl. Tabelle 1). Elektromobile werden als vierrädrige, aber auch als dreirädrige Fahrzeuge angeboten.

Elektromobile haben eine Höchstgeschwindigkeit von $v_{\max} = 6 \text{ km/h}$, 10 km/h , 12 km/h oder bis zu 15 km/h (vgl. § 2 Abs 13 FZV). Sie dürfen generell ohne Führerschein bewegt werden. Die Fahrzeugtypen der langsamen Klasse (6 km/h) dürfen nur auf Rad- und Gehwegen fahren. Die schnelleren Fahrzeugtypen (Klassen ab 10 km/h) dürfen auch auf der Straße fahren. Für letztgenannte Fahrzeuge ist der Abschluss einer Haftpflichtversicherung vorgeschrieben und sie erhalten in der Regel ein Versicherungskennzeichen. Für die langsamen Fahrzeugtypen wird von verschiedenen Herstellern der Abschluss einer Versicherung empfohlen. Zwischen den einzelnen Geschwindigkeitsklassen gibt es praktisch keine baulichen Unterschiede. Zahlreiche Modelle sind für unterschiedliche Geschwindigkeitsklassen (mindestens zwei) in baugleicher Ausstattung verfügbar (z. B. 6 km/h und 10 km/h). In den höheren Geschwindigkeitsklassen sind allerdings (auch bedingt durch die Größe der Batterie) nur noch schwere Fahrzeuge mit größeren Abmessungen verfügbar. Das Hilfsmittelverzeichnis listet nur Fahrzeuge mit einer maximalen Geschwindigkeit von 6 km/h auf.

Tabelle 1: Kennwerte von ausgewählten Merkmale bei Elektromobilen (Spannweite, nicht vollständige Marktanalyse ermittelt auf Basis von [14])

Merkmale	Kennwerte
Geschwindigkeit v_{\max}	6 km/h bis 15 km/h
Anzahl Räder	3 oder 4
Länge	ca. 90 cm bis 161 cm
Gesamtbreite	ca. 49 cm bis 78 cm
Wendekreis	ca. 160 cm bis 330 cm
Leergewicht (inkl. Batterie)	ca. 45 kg bis 230 kg
Zuladung	ca. 100 kg bis 220 kg
zulässiges Gesamtgewicht	ca. 210 kg bis 450 kg

Die Nenn-Reichweite der Elektromobile ist unterschiedlich und wird maßgeblich durch die Leistung der Batterie bestimmt. Eine hohe Leistung bedeutet auch ein hohes Gewicht (und einen hohen Kaufpreis). Die im Rahmen der Recherchen ermittelte Nenn-Reichweite liegt etwa zwischen 20 und 80 km. Die praktische Reichweite variiert im Betrieb und ist z. B. von der zu bewegenden Masse und der Topografie abhängig.

² Die DIN EN 12184 unterscheidet drei Klassen (A bis C), die sich aber auf Anforderungen bezüglich der dynamischen Stabilität, Wirksamkeit der Feststellbremsen usw. beziehen ([9], S. 31).

Elektromobile sind für den Transport im Pkw in mehrere kleinere Einzelteile zerlegbar (geringe Unterschiede je nach Hersteller und Modell). Sie verfügen derzeit (2014) nicht über geeignete Rückhaltesysteme, für die sichere Beförderung des Elektromobils mit einer aufsitzenden Person zu transportieren ([22], S. 15). Elektromobile verfügen zwar teilweise über einen Anschnallgurt (oftmals optionales Ausstattungselement); dieser ist allerdings nur zur Sicherung des Nutzers während der eigenständigen Fahrt mit dem Fahrzeug vorgesehen. Bei einem Transport in einem Fahrzeug bietet der Gurt keine ausreichenden Sicherungsmöglichkeiten als Rückhaltesystem. Daher schreiben die Hersteller vor, dass das Elektromobil während des Transports in Fahrzeugen zu verlassen ist, um Personen- und Sachschäden zu vermeiden (z. B. [22], S. 15; [20], S. 16).

Grob unterteilt lassen sich die am Markt verfügbaren Elektromobile auf Grundlage ihrer Kennwerte für verschiedene Merkmale (Reichweite, Zuladung, Gesamtlänge, Breite, Ausstattung, Geschwindigkeit usw.) in vier Klassen³ unterteilen:

- Basisklasse (leicht),
- Kompaktklasse (mittleres Gewicht),
- Komfortklasse (schwer) sowie
- Luxusklasse.

Bei einzelnen Merkmalen sind die Übergänge mindestens zu der jeweils nächsten Klasse allerdings teils fließend.

Zur Überprüfung der Standsicherheit wurden Fahrzeuge ausgewählt, die den ersten drei Klassen zuzuordnen sind (s. Kap. 2.2). Die Luxusklasse wurde nicht berücksichtigt, da in der Regel schnelle Fahrzeuge in dieser Klasse vertreten sind und zudem die Streuung der Kennwerte für die einzelnen Merkmale sehr groß ist. Für die Einstufung in die Luxusklasse spielen oftmals eher besondere Ausstattungsmerkmale eine Rolle (z. B. besonders starke Batterie, Möglichkeit zum Überfahren von hohen Bordsteinkanten, Sitz für zwei Personen).

2.2 Auswahl von Typvarianten




Bei der Auswahl wurden lediglich Elektromobile betrachtet, die eine Höchstgeschwindigkeit von $v_{\max} = 6$ km/h erreichen, da diese im Hilfsmittelverzeichnis gelistet sind und demnach als orthopädisches Hilfsmittel gelten. Die Fahrzeuge der schnelleren Klassen unterscheiden sich in ihrer Bauart teilweise allerdings nicht von den größeren Elektromobilen der Geschwindigkeitsklasse $v_{\max} = 6$ km/h. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind daher auch für diese Klassen grundsätzlich übertragbar.

Ein Merkmal für eine beschränkte Typauswahl kann eine hohe Anzahl von verkauften Fahrzeugen einer Klasse sein. Eine durch den VDV durchgeführte Anfrage bei Krankenkassen über die Verkaufszahlen von bestimmten Fahrzeugtypen aus dem Segment der Elektromobile brachte allerdings keine Erkenntnisse über häufig vertriebene Modellvarianten. Auch bei den angefragten Herstellern konn-

³ Die Einteilung nach diesen Klassen erfolgt auf einer selbstgetätigten, groben Unterteilung auf Grundlage von Kennwerten. Es gibt keine normierte Klassenbildung für Elektromobile. Einige Hersteller unterscheiden allerdings Klassen nach dem Einsatzzweck (Innen- oder Außenbereich oder beides; vgl. auch Fußnote 2).

ten keine konkreten Zahlen oder Schätzwerte benannt werden. Die Auswahl der Typvarianten erfolgte letztendlich mit Unterstützung eines europaweit tätigen, größeren Hilfsmittelvertriebs. Die für die Untersuchung getroffene Auswahl repräsentiert häufig verkaufte Modelle dieses Vertriebs mit verschiedenen Kennwerten. Die Auswahl berücksichtigte z. B. verschiedene Ausstattungs- und Gewichtsvarianten oder eine unterschiedliche Anzahl von Rädern (Tabelle 2). Sie stellt daher einen guten Querschnitt der häufig im Einsatz befindlichen Modellvarianten der Elektromobile dar.

Tabelle 2: Ausgewählte Typvarianten für die Untersuchung [18; 19; 20 und eigene Messungen]

	Elektromobil 1	Elektromobil 2	Elektromobil 3
Klasse*	Basis	Kompakt	Komfort
Räder	4	3	4
Länge	1,05 m	1,11 m	1,31
Breite	0,55 m	0,60 m	0,61 m
Leergewicht (inkl. Batterie)	56 kg	80 kg	97,35 kg
zul. Zuladung	125 kg	115 kg	135 kg
Bild			
* Die Einteilung nach diesen Klassen erfolgt auf einer selbstgetätigten, groben Unterteilung auf Grundlage von Kennwerten. Es gibt keine normierte Klassenbildung für Elektromobile. Einige Hersteller unterscheiden allerdings Klassen nach dem Einsatzzweck (Innen- oder Außenbereich oder beides; vgl. auch Fußnote 2, S. 5).			

2.3 Überprüfung der Standsicherheit

Die Überprüfung der Standsicherheit (Kippen und Rutschen) von Elektromobilen beim Transport in Linienbussen erfolgte zunächst rechnerisch auf Basis von Rechen- bzw. Kraftmodellen und Berechnungsverfahren. Die Berechnung erfolgte getrennt für Kippen und Rutschen. Der in der Praxis bestehende Zusammenhang bzw. teilweise fließende Übergang zwischen diesen beiden Zuständen konnte im Berechnungsverfahren nicht berücksichtigt werden. Ebenso konnten keine dynamischen Einwirkungen berücksichtigt werden, die sich im Realverkehr ergeben (z. B. durch Lastwechsel). Diese Einflüsse lassen sich nur durch computergestützte Simulationsverfahren oder Messungen während realer Fahrten bzw. deren Simulation ermitteln (vgl. Kap. 2.3.2).

Neben diesen Berechnungsverfahren wurden die Ergebnisse von Mess- und Testfahrten mit Rollstühlen, welche vor einigen Jahren gemeinsam von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) und der

Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) durchgeführt wurden, für eine Plausibilitätsprüfung und zur weiteren Beurteilung herangezogen [4]. Diese Versuche fanden seinerzeit statt, um die Sicherheit bei der Mitnahme von Rollstühlen in Linienbussen (und Behinderten-transportwagen).

2.3.1 Rechnerischer Nachweis der Standsicherheit

Um den rechnerischen Nachweis der Standsicherheit führen zu können, mussten zunächst die Masse und der Schwerpunkt jedes der ausgesuchten Elektromobile sowie Masse und Schwerpunkt einer aufsitzenen Person bestimmt werden. Die Masseverteilung und damit die Lage des Schwerpunkts sind bei den Fahrzeugen aufgrund der baulichen Unterschiede bzw. Unterschiede der Massen einzelner Bauteile (z. B. Batterie) abweichend. Daher musste für jeden Fahrzeugtyp ein spezifischer Schwerpunkt bestimmt werden.

2.3.1.1 Ermittlung der Masse und des Schwerpunkts bei den Elektromobilen

Der Schwerpunkt eines Elektromobils variiert je nach Aufbau des Fahrzeugs bzw. je nach Masse, Abmessung und Lage von Einzelkomponenten (z. B. Batteriepack, Sitz, Zuladung usw.). Für eine hinreichend genaue Bestimmung des Gesamtschwerpunkts des geometrisch komplexen Systems „Elektromobil“ werden zunächst die Massen und Schwerpunkte von geometrisch einfacheren Einzelbauteilen ermittelt. Die Zerlegung der Elektromobile in Einzelkomponenten erfolgte auf Grundlage der in den Bedienungsanleitungen der Hersteller angegebenen Hinweise. In den Bedienungsanleitungen ist angegeben, in welche Einzelteile sich das Fahrzeug für den Transport zerlegen lässt. Dabei werden in der Regel auch die Massen der Bauteile genannt (in einigen Fällen wird allerdings nur das schwerste Bauteil benannt; dies ist verpflichtend).

Folgende Einzelbauteile wurden für die Berechnung festgelegt:

- Vorderwagen mit Lenker,
- Antriebseinheit,
- Batteriepack sowie
- Sitz.

Diese vier Bauteile stellen die Einzelteile dar, in die sich Elektromobile in der Regel für den Transport zerlegen lassen. Geringe Abweichungen bei einzelnen Bauteilen sind möglich).

Anschließend wurden die genauen Maße, Massen und Schwerpunkte der Einzelteile für die drei ausgewählten Modelltypen (Kap. 2.2) an den realen Fahrzeugen ermittelt (vgl. Tabelle 2).⁴ Dafür wurden die Elektromobile in die benannten Bauteile zerlegt. Alle Bauteile wurden gewogen und der Schwerpunkt mittels einer Ausbalancierung ermittelt und vermessen und später rechnerisch überprüft. Aus den Schwerpunkten der Einzelteile wurde die Lage des Schwerpunktes für das jeweilige Gesamtsystem (mit und ohne Zuladung, s. auch Kap. 2.3.1.2) anhand eines geometrisch vereinfachten Modells ermittelt (Abbildung 1).

⁴ Die genaue Ermittlung der erforderlichen Kenndaten wurde durch Unterstützung der Firma Vermeiren Deutschland (Düsseldorf) ermöglicht.

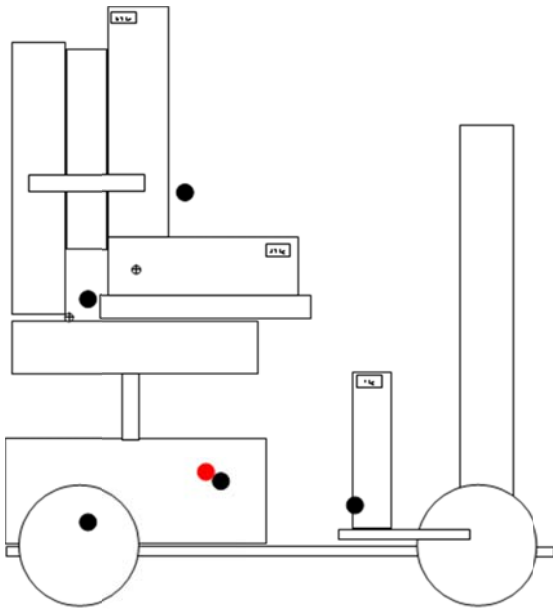


Abbildung 1: Lage des Gesamtschwerpunktes (rot) und der Schwerpunkte der Einzelteile (schwarz) (hier bereits mit Zuladung bzw. aufsitzender Person)

Die Ermittlung des Schwerpunktes auf Basis der Einzelschwerpunkte der maßgeblichen Bauteile diente als hinreichend genaue Grundlage für den rechnerischen Nachweis der Standsicherheit.

2.3.1.2 Zuladung

Beim Transport von Elektromobilen in anderen Fahrzeugen bestehen – losgelöst von haftungsrechtlichen Fragen und sofern es das Raumangebot im Transportfahrzeug zulässt – grundsätzlich zwei Möglichkeiten für die aufsitzende Person (Kap. 2.3.1.4 und 2.3.1.5):

- Das Elektromobil wird im Fahrzeug abgestellt und der Nutzer nimmt an einer anderen Stelle im Fahrzeug Platz oder
- der Nutzer verbleibt auch während des Transports im Fahrzeug auf dem Sitz seines Elektromobils.

Dadurch ergibt sich eine Spannbreite für die Zuladung: vom Lastfall „ohne Zuladung“ bis (theoretisch) zur Ausschöpfung der maximal zulässigen Zuladung gemäß Herstellerangaben. Eine mögliche Überschreitung der durch die Hersteller angegebenen zulässigen Zuladung wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Für den Nachweis der Standsicherheit wurden jeweils drei Lastfälle betrachtet:

- Keine Zuladung (nur Ansatz des Leergewichts des Elektromobils),
- Ansatz von 70 % der zulässigen Zuladung sowie
- Ansatz von 100 % der zulässigen Zuladung.

Dieser gestaffelte Ansatz diente dem Zweck, den Einfluss der Zuladung auf die Standsicherheit in Abhängigkeit des jeweiligen Fahrzeugtyps zu ermitteln und die Streuung beim Gewicht einer aufsitzenden Person zu berücksichtigen.

Für die Berechnung war somit auch der Schwerpunkt einer aufsitzenden Person zu ermitteln, um den Gesamtschwerpunkt des Systems bei Zuladung bestimmen zu können. Dies erfolgte auf Grundlage

eines Berechnungsansatzes gemäß DIN EN 12184:2009-12 „Elektrorollstühle und -mobile und zugehörige Ladegeräte – Anforderungen und Prüfverfahren“ [9]. Für Prüfungen im Rahmen der Norm wird eine so genannte Prüfpuppe verwendet, die sich aus mehreren Einzelteilen mit unterschiedlicher Abmessung und Massen zusammensetzt (Abbildung 2). Diese Prüfpuppe kann durch Zusatzgewichte mit unterschiedlicher Gesamtmasse erstellt werden (100 kg, 125 kg und 150 kg).

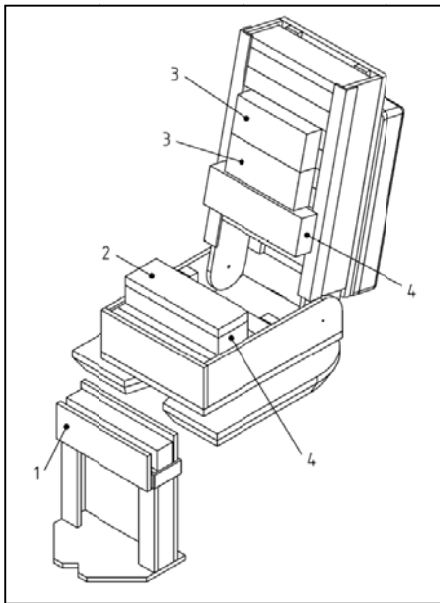


Abbildung 2: Anordnung von Massen bei einer Prüfpuppe nach DIN EN 12184 (im Beispiel 125 kg)⁵ [9]

Für die hier durchgeführte Untersuchung wurde die Ausführung als 100 kg Prüfpuppe zugrunde gelegt und für diese der Schwerpunkt ermittelt (also ohne Berücksichtigung von Zusatzgewichten wie in Abbildung 2 dargestellt). Es erfolgte keine neue Schwerpunktberechnung für jeden Einzelfall. Die Abweichung der Schwerpunktlage infolge der Gewichtsdivergenz infolge der variierenden Zuladung⁶ und damit der Einfluss auf das Kippmoment ist vernachlässigbar gering. Wie in Abbildung 2 ersichtlich, sind Gewichtsanpassungen bei der Prüfpuppe auf mehrere kleinere Massen verteilt, die auch über den Körper der Prüfpuppe verteilt sind. Dadurch ergibt sich zwar ein höheres Gesamtgewicht, aber die Lage des Schwerpunktes bleibt nahezu unverändert.⁷

2.3.1.3 Lastfälle

Für den Nachweis der Standsicherheit (Kippen) wurden mit starker Betriebsbremsung und Gefahrenbremsung zwei maßgebliche Lastfälle, die im täglichen Linienbusbetrieb vorkommen (können), angesetzt. Für jeden der beiden Lastfälle ergibt sich eine maximale Kraft aus der Bremsverzögerung, welche dann als äußere, in Fahrtrichtung des Busses gerichtete Kraft auf das Elektromobil und seinen Nutzer wirkt. Für die starke Betriebsbremsung wurde eine maximale Verzögerung von $3,5 \text{ m/s}^2$ ange-

⁵ Die Nummern verweisen auf Stahlblöcke unterschiedlicher Masse, die an der 100-kg Prüfpuppe montiert werden, um eine Masse von 125 oder 150 kg zu erreichen.

⁶ 70 % bzw. 100 % des zulässigen Gesamtgewichts des jeweiligen Modells.

⁷ Anders wäre dies z. B., wenn die Gewichtsunterschiede durch eine große Einzelmasse, die an einer Stelle der Prüfpuppe montiert würden, ausgeglichen würden.

setzt, für die Gefahrenbremsung eine maximale Verzögerung von $6,0 \text{ m/s}^2$ [3]. Bei Pkw ist auf trockener Betonfahrbahn sogar ein Verzögerungswert von $6,5$ bis 8 m/s^2 möglich. Beim Bus ist dieser Wert aufgrund der größeren abzubremsenden Masse jedoch geringer.

Für die Elektromobile wurde eine Aufstellung quer zur Fahrtrichtung des Busses angenommen. Diese Art der Aufstellung dürfte in Anbetracht der Fahrzeugabmessungen, der eingeschränkten Manövrierfähigkeit (relativ großer Wendekreis) und der im Fahrzeug vorhandenen Bewegungsflächen die praktisch ausschließlich gewählte Aufstellungsart für Elektromobile beim Transport in Linienbussen sein. Dies bestätigen auch Beobachtungen in der Praxis.

Unter Berücksichtigung der benannten Kennwerte für das jeweilige Fahrzeugmodell (Elektromobil) erfolgte der rechnerische Nachweis der Standsicherheit (Kippen und Rutschen).

2.3.1.4 Kippsicherheit

Die Kippsicherheit ist der Widerstand eines Bauwerks oder Gegenstands gegen Umkippen um einen Rand seiner Aufstandsfläche (Kippkante). Ob ein Gegenstand kippt oder nicht, hängt vom Kräfte- bzw. Momentenverhältnis ab, welches sich durch Gewichtskräfte und die Hebelarme⁸ der angreifenden Kräfte ergibt (vgl. Abbildung 3). Zur Vermeidung des Kippens kippfähiger Gegenstände muss, bezogen auf die Kippkante K, die Summe der haltenden Momente (Standmomente) größer sein als die Summe der durch äußere Kräfte hervorgerufenen, angreifenden Drehmomente (Kippmomente). Die Momente sind das Produkt der Kraft multipliziert mit dem jeweiligen Hebelarm.

<p>Stabile Lage F_G zeigt senkrecht auf Standfläche</p>	<p>Instabile Lage F_G zeigt auf Kippunkt</p>	<p>Gegenstand kippt, F_G zeigt auf Punkt außerhalb der Standfläche des Gegenstands</p>
<p>Legende F_G = Gewichtskraft; F_K = Kippkraft; I_G = Hebelarm Gewichtskraft; I_K = Hebelarm Kippkraft; K = Kippunkt; S = Schwerpunkt</p>		

Abbildung 3: Schematische Darstellung des Kippens eines Körpers infolge der Einwirkung äußerer Kräfte

Der Nachweis der Kippsicherheit erfolgt mithilfe eines Rechenverfahrens auf Basis des beschriebenen Prinzips. Dieses Verfahren findet auch in der Gefährdungsbeurteilung, z. B. in der Industrie beim Nachweis der Standsicherheit von Lastkränen, Anwendung.

⁸ Der Hebelarm ist der kürzeste Abstand zwischen der Wirkungslinie einer Kraft und der Kippkante (= Drehachse).

Die folgenden Diagramme (Abbildung 4 bis Abbildung 6) zeigen die Ergebnisse des rechnerischen Nachweises der Kippsicherheit für die ausgewählten Elektromobile (Aufstellung quer zur Fahrriichtung des Linienbusses) in Abhängigkeit der Zuladung bei unterschiedlicher Bremsbeschleunigung bzw. Verzögerung (Bremsen) des Linienbusses.

Hinweis: Bei der Auswertung ist zu berücksichtigen, dass es sich um eine rein rechnerische Ermittlung auf Basis physikalischer Gegebenheiten unter Annahme eines statischen Systems handelt. Die Möglichkeit, dass das Elektromobil vor dem Kippen ins Rutschen gerät, kann z. B. mit diesem Modell nicht berücksichtigt werden; die jeweiligen Fälle werden daher getrennt betrachtet. Der Fahrbetrieb eines Linienbusses führt durch die Fahrbewegungen und Lastwechsel (Bremsen, Beschleunigen, Kurvenfahrten) zu dynamischen Einflüssen. Diese können sowohl in unterschiedlicher horizontaler⁹ als auch in vertikaler Richtung¹⁰ wirken. Die dynamischen Einflüsse können sowohl verstärkend als auch verringernd auf das System „Elektromobil“ wirken oder auch zu anderen Bewegungen (z. B. Drehen) führen. Die Einflüsse dieser Dynamik können mit dem hier verwendeten Rechenmodell nicht mehr dargestellt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung können daher nur einen Trend aufzeigen, ob ein Kippen (oder Rutschen) ab einer bestimmten Verzögerungskraft wahrscheinlich sein wird. Die in den Diagrammen ermittelten Grenzwerte sind somit nicht als „scharfe Grenzwerte“ zu sehen. Sie können mit einer gewissen Streubreite nach oben oder unten abweichen. Die hier ermittelten Ergebnisse wurden allerdings durch Fahrversuche an anderer Stelle [4] grundsätzlich bestätigt und sind somit plausibel (vgl. Kap. 2.3.2 und Tabelle 6). Eine genaue Berechnung oder Ermittlung von Grenzwerten der Standsicherheit von Elektromobilen mit unterschiedlicher Zuladung beim Transport in Linienbussen kann letztendlich nur auf Basis der Durchführung von eigenständigen Fahrversuchen oder computergestützten Simulationsberechnungen erlangt werden.

Elektromobil 1

Für Elektromobil 1 (vier Räder, leichte Bauart) zeigt sich, dass ein Kippen um die Längsachse ohne Zuladung bei einer Gefahrenbremsung wahrscheinlich nicht eintritt (Abbildung 4). Sitzt eine Person auf dem Elektromobil kann bereits bei der Betriebsbremsung der Grenzwert der Standsicherheit erreicht werden, so dass ein Kippen des Fahrzeugs um die Längsachse nicht mehr ausgeschlossen werden kann.

⁹ Je nachdem aus welcher Richtung die Beschleunigungskraft auf das Elektromobil wirkt (durch Kurvenfahrt, Bremsen des Busses, Beschleunigen des Busses).

¹⁰ Z. B. „Springen“ des Elektromobils infolge unebener Fahrbahnoberfläche.

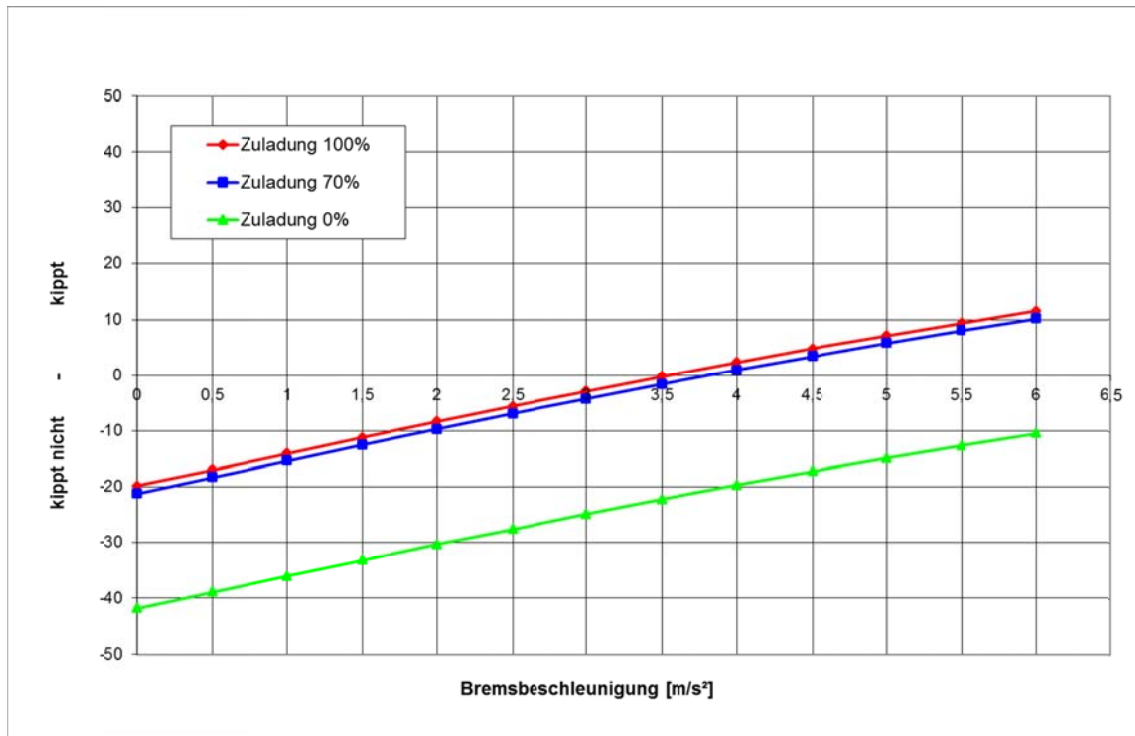


Abbildung 4: Standsicherheitsnachweis (Kippen) für das Elektromobil 1 (4-rädrig, leicht)

Elektromobil 2

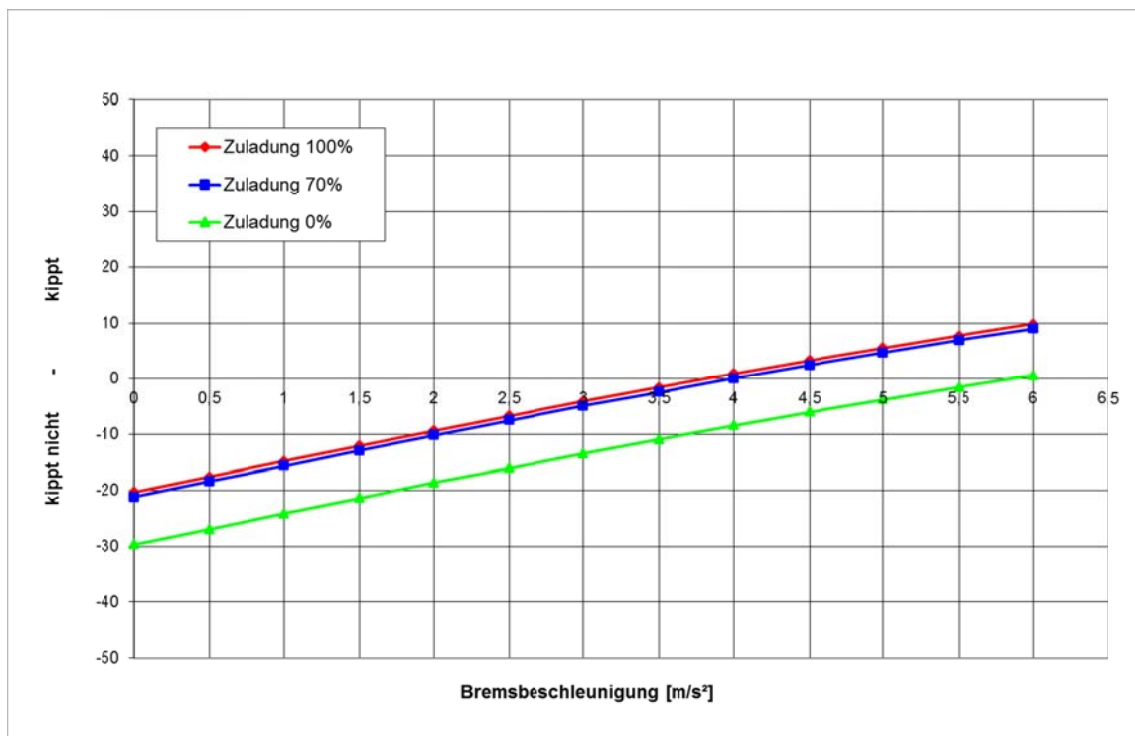


Abbildung 5: Standsicherheitsnachweis (Kippen) für Elektromobil 2 (3-rädrig)

Beim Elektromobil 2 (dreirädriges Modell) zeigt sich, dass im Fall „ohne Zuladung“ bei der Gefahrenbremsung der Grenzwert der Standsicherheit bereits erreicht werden könnte (Abbildung 5). Ein seitliches Kippen um die Längsachse kann dann nicht mehr ausgeschlossen werden. Ist das Elektromobil beladen, kommt die Standsicherheit bereits bei der starken Betriebsbremsung in einen Grenzbereich. Ein Kippen wird wahrscheinlich.

Elektromobil 3

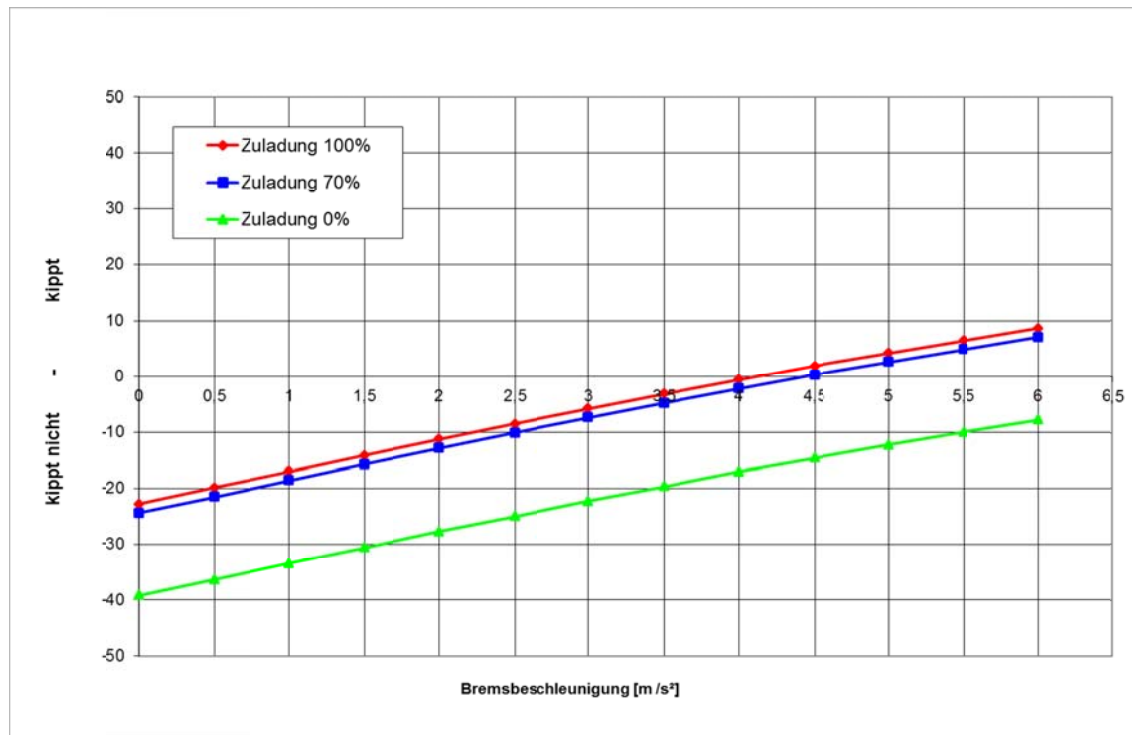


Abbildung 6: Standsicherheitsnachweis (Kippen) für das Elektromobil 3 (4-rädrig, schwer)

Bei Elektromobil 3 (vierrädrig, schwere Ausführung) kann davon ausgegangen werden, dass ein Kippen bei nicht besetztem Fahrersitz eher unwahrscheinlich sein wird (Abbildung 6). Dies liegt daran, dass die Batterie sehr schwer ist und der Schwerpunkt des Fahrzeugs dadurch relativ tief liegt. Hat eine Person auf dem Sitz platzgenommen, dann verlagert sich der Schwerpunkt des Gesamtsystems nach oben und es besteht bei hohen Verzögerungswerten während eines Bremsvorgangs des Linienbusses eine Kippgefahr um die Längsachse des Elektromobils (ab ca. 4 m/s²). Bei einer Betriebsbremsung ist ein Kippen eher unwahrscheinlich.

2.3.1.5 Rutschen

Der rechnerische Nachweis der Rutschsicherheit erfolgte in Anlehnung an ein normiertes Verfahren, welches der Bewertung der Rutschgefahr von Bodenbelägen zugrunde liegt [8]. Mittels dieses Prüfverfahrens wird ein Faktor der Rutschhemmung (R-Wert) ermittelt: Eine Ebene wird von einer Prüfperson begangen und solange fortwährend gekippt, bis die Person beginnt zu rutschen. Je höher der Winkel der Schrägstellung zum Zeitpunkt des Rutschbeginns, desto höher die Rutschhemmung und desto höher der R-Wert. Kennwerte, die sich aus diesem Verfahren ergeben, sind beispielsweise in den Arbeitsstättenregeln aufgeführt [1]. Für Bodenbeläge in Linienbussen sind allerdings keine Werte

aufgeführt. Recherchen bei Herstellern ergaben einen R-Wert von 10 (vgl. z. B. [2]). Dies entspricht einem Winkel der Schrägstellung von mehr als 10° bis 19° (vgl. [13], Tabelle 1).

Der Winkel lässt sich in einen Reibungskoeffizienten μ umrechnen, der die Reibungskraft im Verhältnis zur Anpresskraft (bestimmt durch die Gewichtskraft) kennzeichnet. Die Reibungskraft ist eine Widerstandskraft, die sich dem Verschieben eines Körpers auf einer Unterlage entgegensetzt. Sie wirkt parallel zur Reibfläche und entgegen der durch die äußere Kraft definierte Bewegungsrichtung. Die Reibungskraft ist umso größer, je größer die Normalkraft (senkrecht zur Reibfläche wirkende Kraft, bestimmt durch die Masse eines Gegenstands) und je größer der Reibungskoeffizient μ ist. Die Größe der Berührungsfläche ist ohne Einfluss auf die Reibung. Das in der DIN 51130 [8] festgelegte Verfahren ermittelt den Rutschwert durch Kippen einer Ebene. Dadurch ergibt sich eine Hangabtriebskraft. Die der Hangabtriebskraft entgegenwirkende Kraft entspricht der Reibkraft in der Horizontalen. Für den Nachweis des Rutschens eines Elektromobils beim Transport in einem Linienbus ist demnach festzustellen, wann die Kraft durch Bremsverzögerung groß genug wird, um die Reibkraft zu überwinden.

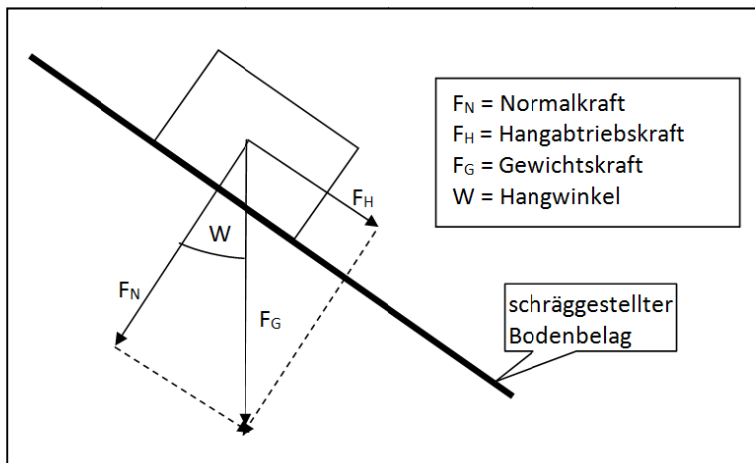


Abbildung 7: Kraftmodell für den Nachweis der Rutschsicherheit

Damit ein Gegenstand rutscht, muss die Kraft, die erforderlich ist um den Gegenstand in Bewegung zu setzen, größer sein als die Kraft, die den Gegenstand an der Position hält (Haftreibungskraft). Ist der Gegenstand erst einmal in Bewegung gesetzt (gleitet), reicht zur Aufrechterhaltung der Bewegung eine kleinere Kraft (Gleitreibungskraft) aus.

Tabelle 3: Ungefähre Grenzwerte der Beschleunigung/Verzögerung für Rutschen eines Elektromobils in Abhängigkeit der Zuladung¹¹

Elektromobil	Grenzwerte in Abhängigkeit der Zuladung		
	ohne Zuladung	70 %	100 %
1 Vierrad, leicht	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²
2 Dreirad, mittel	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²
3 Vierrad, schwer	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²	1,9 bis 3,3 m/s ²

Bei dieser rein rechnerischen Ermittlung zeigt sich kein Unterschied zwischen den verschiedenen Fahrzeugtypen. Der Gewichtsunterschied zwischen den einzelnen Lastfällen (Variation von Fahrzeugtyp und Zuladung) ist zu gering, um einen nachweisbaren Einfluss auf das Rutschen zu haben. Es ist somit festzuhalten, dass die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektromobil im Linienbus durch Bremsen des Busses ins Rutschen gerät, unabhängig vom Gesamtgewicht zu betrachten ist.

Die ermittelten Werte zeigen, dass ein Rutschen eines Elektromobils bereits bei deutlich geringeren Verzögerungswerten auftreten kann, als sie für ein Umkippen notwendig sind (vgl. Kap. 2.3.1.4). Dies wurde auch in einer bereits veröffentlichten Untersuchung zur Bestimmung der Sicherheit von Rollstuhlnutzern beim Transport in Linienbussen festgestellt [4]. Bei Regen oder Schneefall eingetragene Feuchtigkeit auf dem Fahrzeugboden sowie Verschmutzungen (Sand usw.) können u. U. zu einer Reduktion des Reibungskoeffizienten führen und sich rutschfördernd auswirken.

Hinweis: Das hier angewendete Verfahren beruht auf der Annahme eines statischen Systems. Dynamische Einflüsse, die das Rutschen behindern oder unterstützen, können nicht berücksichtigt werden. Die Ergebnisse sind daher den gegenüber in der Realität auftretenden Verhältnissen, die von vielen Faktoren beeinflusst werden, mit gewissen Unschärfen behaftet.

2.3.1.6 Zusammenfassende Bewertung der rechnerischen Standsicherheit

Betrachtet man die rechnerischen Nachweise aller drei Modelltypen, lässt sich zusammenfassend Folgendes feststellen:

- Gefahrbremung (Verzögerung 6 m/s²):
 - o Ein Kippen eines Elektromobils ohne Zuladung ist eher unwahrscheinlich, im Einzelfall kann sich die Standsicherheit aber im Grenzbereich bewegen.
 - o Ein Kippen des Elektromobils mit aufsitzender Person ist wahrscheinlich, unabhängig von der Zuladung oder des Modells.
 - o Ein Rutschen kann bei einer Gefahrbremung theoretisch auftreten, falls es nicht vorher zum Kippen kommt.

¹¹ Die Streubreite ergibt sich aus der Spannbreite für den Rutschwert R10, welche mit einem Winkel von über 10° bis 19° angegeben wird (vgl. [13], Tabelle 1). Sie kennzeichnet aber auch das reale Verhalten (vgl. Kap. 2.3.2Tabelle 6).

- Starke Betriebsbremsung (Verzögerung $3,5 \text{ m/s}^2$):
 - o Ein Kippen eines Elektromobils ohne Zuladung kann praktisch ausgeschlossen werden. Eher wird es zum Rutschen kommen.
 - o Ein Kippen eines Elektromobils mit Zuladung (mit aufsitzender Person) ist, unabhängig vom Modell, nicht auszuschließen, da die rechnerische Standsicherheit im Grenzbereich liegt.
 - o Ein Elektromobil kann auf dem Boden eines Linienbusses theoretisch ins Rutschen kommen, wenn der Busfahrer eine starke Betriebsbremsung durchführt.

Folgende Faktoren begünstigen oder verringern die Kippwahrscheinlichkeit:

- Eigengewicht des Elektromobils:

Das Eigengewicht des Elektromobils spielt eine Rolle beim Kippen. Je größer die Masse des Fahrzeugs, desto geringer die Kippgefahr (je geringer die Masse, desto höher die Kippgefahr). Bei einem höheren Eigengewicht (= hohe Gewichtskraft F_G) vergrößert sich das Standmoment, welches dem Kippmoment entgegenwirkt.
- Zuladung:

Die Kippgefahr steigt mit zunehmender Zuladung. Das Gewicht der zulässigen Zuladung kann mehr als doppelt so groß sein wie das Leergewicht des Fahrzeugs. Der Anteil einer aufsitzenden Person an der Gesamtmasse ist daher in jedem Fall relativ hoch. Durch die Zuladung erhöhen sich die Gewichtskraft und damit das Standmoment. Eine auf einem Elektromobil sitzende Person erhöht aber auch die Lage des Schwerpunkts des Gesamtsystems (Tabelle 5). Dadurch wird das Kippmoment durch den größeren Hebelarm der von außen angreifenden Kraft erhöht. Der Einfluss der Höhenlage des Schwerpunktes wirkt sich stärker aus, als die Zunahme der Gewichtskraft.
- Die Neigung des Busses in Fahrrichtung:

Bei talwärts führender Fahrt steigt die Kippgefahr bei einer Bremsung, da sich das Standmoment aufgrund des verkürzten Hebelarms der Gewichtskraft (Abstand vom Schwerpunkt zum Kippunkt) verringert. Ebenso sinkt die Kippgefahr bei einer bergaufwärts führenden Fahrt, da sich der Hebelarm der Gewichtskraft und damit das Standmoment vergrößert (vgl. Abbildung 3). Die Auswirkungen der Neigung des Busses bei Tal- oder Bergfahrt auf das mögliche Kippen des Elektromobils lassen sich in der Abbildung 4 bis Abbildung 6 ablesen. Dafür sind die Kurven um den entsprechenden Wert der Neigung nach oben oder unten zu verschieben (Winkelwerte auf der Ordinate, Umrechnungsfaktoren Neigung in [%] in Winkelgrad s. Tabelle 4).
- Die Anzahl der Räder:

Der Einfluss der Anzahl der Räder drei oder vier Räder, auf das Kippen ist vorhanden allerdings gering. Auch im Hilfsmittelverzeichnis ist vermerkt, dass „3-rädrige Elektromobile weisen aufgrund ihrer Fahrstellgeometrie in der Regel eine geringere Standfestigkeit gegenüber gleichgroßen 4-rädrigen Elektromobilen“ aufweisen (Beschreibung der Produktart in [14]). Der Schwerpunkt liegt aufgrund der Schwerpunktlage der Batterie und des Aufsitzers

immer nahe an der Hinterachse des Elektromobils (Abbildung 8), die immer über zwei Räder verfügt.

Tabelle 4: Umrechnungsfaktoren von Prozent in Grad [23]

Grad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prozent	1,8	3,4	5,2	7,0	8,8	10,5	12,3	14,1	15,8	17,6

Tabelle 5: Höhenlage des Schwerpunktes des Gesamtsystems in Abhängigkeit vom Fahrzeugtyp und der Zuladung

Elektromobil	Zuladung [in %]		
	0	70	100
1 (Vierrad, leicht)	40 cm	60 cm	63 cm
2 (Dreirad, mittel)	25 cm	58	62 cm
3 (Vierrad, schwer)	31 cm	56 cm	61 cm

Im Gegensatz dazu haben diese Faktoren praktisch keinen Einfluss auf das Rutschen. Die Gefahr des Rutschens wird maßgeblich vom Reibungskoeffizienten zwischen den Rädern und dem Boden des Linienbusses bestimmt. Es ist Folgendes zu berücksichtigen: Wird die Haftreibung einmal überwunden, sinkt der erforderliche Kraftbedarf für die weitere Bewegung eines Gegenstandes.

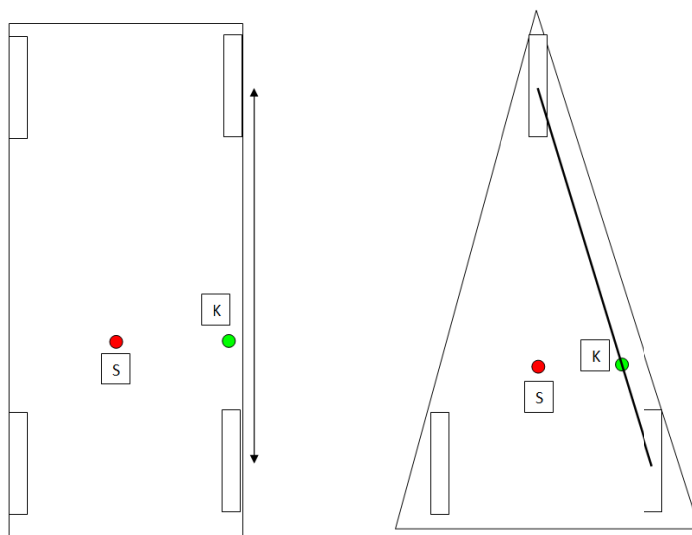


Abbildung 8: Vergleich der Lage des Schwerpunktes in horizontaler Ebene bei einem vierrädrigen und einem dreirädrigen Elektromobil (S = Schwerpunkt; K = Kippunkt)

2.3.2 Messungen und Fahrversuche im Realverkehr mit Rollstühlen

Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) hat zusammen mit der Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen e. V. (STUVA) Untersuchungen über die Notwendigkeit von Rückhalteeinrichtungen für Rollstuhlnutzer in Linienbussen und Behindertentransportwagen durchgeführt [4]. Im

Rahmen dieser Untersuchungen wurden auch die Grenzwerte der Bremsverzögerungen ermittelt, bei denen ein Rollstuhl jeweils beginnt zu Rutschen oder zu Kippen (Tabelle 6).

Tabelle 6: Verhalten von Rollstühlen bei der Simulation von Bremsvorgängen mittels Rollwagen (Bremsen angezogen, seitliche Aufstellung, nasser Bodenbelag¹²) [15]

Handrollstuhl		E-Rollstuhl	
Kippen	Rutschen	Kippen	Rutschen
4,3 m/s ²	1,8 bis 3,4 m/s ²	4,3 m/s ²	1,8 bis 3,4 m/s ²

Die in der Tabelle dargestellten Werte waren das Ergebnis von sieben Fahrversuchen mit gebremsten Hand- und Elektro-Rollstühlen, die mit einem 75 kg Dummy besetzt waren. Die Versuche wurden mit einem Rollwagen durchgeführt, auf dem die Rollstühle quer zur Fahrtrichtung befestigt waren. Der Rollwagen wurde aus einer Geschwindigkeit von 40 km/h mit unterschiedlichen Verzögerungswerten abgebremst. Im Ergebnis ergaben sich die erforderlichen Verzögerungswerte gemäß Tabelle 6, bei denen die Rollstühle begannen zu rutschen oder umkippten.¹³

Die in der damaligen Untersuchung ermittelten Werte bezüglich der Standsicherheit bestätigen die in dieser Untersuchung ermittelten Berechnungsergebnisse. Für das Kippen der Elektromobile wurden als minimale Verzögerungswerte (je nach Modell) zwischen 3,7 und 4,3 m/s² ermittelt (bei einer Zuladung von 70 % der zulässigen Zuladung). Die teils geringeren Werte sind nachvollziehbar, da der Schwerpunkt des Gesamtsystems bei Zuladung bei den Elektromobilen höher liegt. Weiterhin ergibt sich, dass die Verzögerungswerte für das Rutschen geringer sind, als für das Kippen. Dies ergab auch der rechnerische Nachweis (vgl. Kap. 2.3.1.5).

Im Rahmen der genannten Untersuchung wurden auch Testfahrten im Realverkehr durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass beim Normalbetrieb im Linienverkehr Situationen entstehen können, in denen die in Tabelle 6 genannten Grenzwerte erreicht werden.¹⁴ Dies kann zum Kippen oder Rutschen führen. Bei ordnungsgemäßer Aufstellung eines Rollstuhls – Aufstellung entgegen der Fahrtrichtung des Busses und mit der Rückenlehne angelehnt an die Prallplatte – kann ein Kippen oder Rutschen infolge starker Verzögerungswerte aber vermieden werden. Wurde der Rollstuhl ungesichert aufgestellt (z. B. längs mit Abstand zur Prallplatte oder quer zur Fahrtrichtung), kam es bei verschärftem Bremsen zu einem Wegrutschen oder sogar Umkippen des Rollstuhls ([4], S. 66).

¹² Für die Versuche mit Aufstellung quer zur Fahrtrichtung wurde nur der ungünstigere Fall „Bodenbelag nass“ untersucht.

¹³ Bei den Versuchen erfolgte eine Klasseneinteilung für das Rutschen: 0 bis 10 cm; >10 und > 60 cm sowie 60 cm (maximal möglicher Wert aufgrund des Versuchsaufbaus). Der Grenzwert für das Rutschen wurde anschließend mit 2,4 m/s² festgelegt. Dabei rutschte der Rollstuhl mehr als 10 cm.

¹⁴ Nach Feststellung in der vorliegenden Untersuchung hängt die Häufigkeit des Eintretens derartiger Situationen stark von der Fahrweise des Fahrpersonals ab.

2.4 Weitere Gefährdungspotenziale

Neben der Kipp- und Rutschgefahr lassen sich bauartbedingt noch weitere Faktoren feststellen, die den sicheren Transport von Elektromobilen einschränken können. Maßgeblich dafür sind vor allem die mögliche Gesamtlänge der Fahrzeuge sowie ihre eingeschränkte Manövrierfähigkeit (relativ großer Wendekreis¹⁵, insbesondere im Vergleich zu Rollstühlen) auf engem Raum. Viele Rollstühle verfügen über Losräder oder lenkbare Hinterräder, die bis zu einem Winkel von 90° eingeschlagen werden können und sind damit in der Lage, auf engem Raum zu manövrieren. Dies ermöglicht es z. B., trotz kleiner Bewegungsfläche die vorgesehenen Aufstellflächen im Linienbus zu erreichen. Der Unterschied wird auch deutlich, wenn man die in den Normen angegebenen erforderlichen Bewegungsflächen für Rollstühle betrachtet. Diese betragen 1,50 m x 1,50 m (Abbildung 9). Elektromobile haben Wendekreise von minimal ca. 160 cm. Dies gilt nur für die kleinsten Modelle (vgl. Tabelle 1). Die meisten Modelle liegen über diesem Wert (bis zu ca. 330 cm). Daraus wird ersichtlich, dass auf einer Bewegungsfläche mit den genannten Abmessungen für eine Richtungsänderung umfangreiche Rangiermanöver erforderlich werden. Dies gilt beispielsweise auch für den Fall, wenn in einem Linienbus die Aufstellfläche erreicht werden soll.

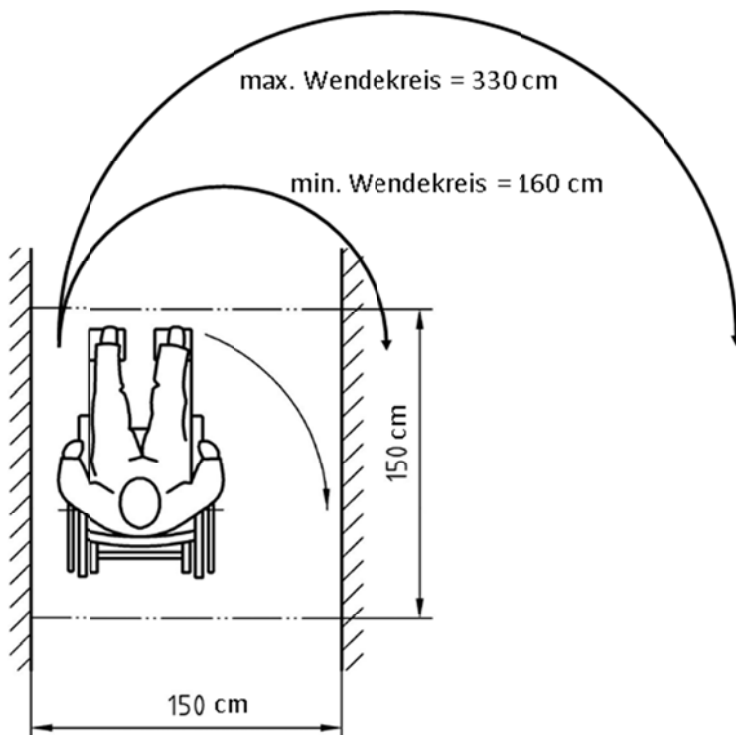


Abbildung 9: Notwendige Bewegungsfläche für Richtungsänderung eines Rollstuhlnutzers und minimale und maximale Wendekreise von Elektromobilen (vgl. [10] und Tabelle 1)

Folgende weitere betriebliche Einschränkungen und daraus resultierende Gefährdungspotenziale können sich aufgrund dieser eingeschränkten Rangierfähigkeit ergeben:

¹⁵ Wendekreis: der Kreis, den der am weitesten vorstehende Teil eines Fahrzeugs bei größtem Lenkeinschlag beschreibt [Quelle: www.wissen.de]. Der Spurbereich hingegen beschreibt die Kreisbahn des bei der Kreisfahrt außen laufenden Vorderrades. Bei Elektromobilen kann der Wendekreis i. d. R. gleich dem Spurbereich angenommen werden.

- Aufgrund der eingeschränkten Manövrierfähigkeit in engen Räumen oder auf kleinen Bewegungsflächen besteht bei den Elektromobilen ab einem gewissen Wendekreis nicht mehr die Möglichkeit, nach der vorwärts gerichteten Einfahrt in engen Bereichen, z. B. innerhalb des Linienbusses, zu wenden ([22], S. 14). Daher kommt anschließend nur eine rückwärts gerichtete Ausfahrt infrage. Dieses Fahrmanöver erschwert die sichere Benutzung der beim Ausstieg möglicherweise erforderlichen Klapprampe und es besteht die Gefahr eines seitlichen Abrutschens von der Rampe.
- Aufgrund des großen Wendekreises und da ein Wendemanöver des Fahrzeugs innerhalb des Busses nicht möglich ist, lassen sich die auch für die Aufstellung von Hilfsmitteln vorgesehenen Mehrzweckflächen nicht oder nur mit erheblichem Rangieraufwand erreichen (je nach Lage der Mehrzweckbereiche).
 - o Bei Lage der Mehrzweckfläche auf der Türseite (nur möglich, wenn der Bus keine Innenschwenktüren hat) ist diese aufgrund der erforderlichen engen Bogenfahrt praktisch nicht zu erreichen. Dies gilt insbesondere, wenn für die Einfahrt die Klapprampe erforderlich wird und ein schräges Anfahren (soweit dies durch die lichte Türöffnung ermöglicht ist) ausgeschlossen ist.
 - o Bei älteren Bussen mit kleineren Mehrzweckflächen (Abmessungen gemäß EU-Busrichtlinie) und Lage auf der Seite gegenüber der Tür ist eine Längsaufstellung des Elektromobils nicht möglich. Das Fahrzeug wird quer zur Fahrtrichtung des Busses im Tür- und Gangbereich stehen bleiben müssen.
 - o Bei Bussen mit einer größeren Mehrzweckfläche und Lage gegenüber der Tür kann die Erreichbarkeit durch das Elektromobil je nach Innenraumgestaltung (z. B. Anordnung von notwendigen Haltestangen) nicht möglich oder stark eingeschränkt sein.

Da es derzeit keinen zugelassenen Standard für die Sicherung von Personen auf Elektromobilen beim Transport in Fahrzeugen gibt (Fahrzeugrückhaltesystem), empfehlen die Hersteller beim Transport in Fahrzeugen das Elektromobil zu verlassen (vgl. z. B. [22], S. 15; [20], S. 16). Auch für Rollstühle gibt es keine Fahrzeugrückhaltesysteme in Linienbussen. Diese sind im Linienverkehr allerdings nicht erforderlich, wie in einer Untersuchung mit Messungen und Realfahrten festgestellt wurde [4]. Die erforderliche Standsicherheit und Sicherheit für die Insassen der Rollstühle wird durch eine rückwärtige Aufstellung an einer in den Linienbussen vorgeschriebenen Prallplatte oder Prallfläche ausreichend sichergestellt. Elektromobile können diesen Aufstellplatz aufgrund ihrer eingeschränkten Rangierfähigkeit nicht oder nur mit erheblichem Rangieraufwand erreichen (abhängig von der Innengestaltung des Busses und dem Besetzungsgrad).

Elektromobile können – je nach Bauart – eine Länge von bis zu ca. 1,60 m aufweisen (vgl. Tabelle 1). Dies sind 0,35 m mehr, als die Länge des Bezugsrollstuhls gemäß EU-Busrichtlinie (inkl. Rollstuhlnutzer), welcher auch für die Festlegung der Abmessungen der Aufstellflächen herangezogen wurde

([12], Abbildung 21).¹⁶ Da die Mehrzweckflächen in der Regel nicht oder nur mit erheblichem Rangieraufwand zu erreichen sind, werden Elektromobile in der Praxis in der Regel im Tür- und Gangbereich quer zur Fahrtrichtung abgestellt. Dadurch können sich folgende Probleme ergeben:

- Die Nutzbarkeit der manuellen Klapprampe¹⁷ des Linienbusses kann eingeschränkt werden (wobei die Rampe unter Umständen sogar für den Ein- oder Ausstieg des Elektromobils benötigt wird);
- Der Fahrgastfluss in Längsrichtung des Fahrzeugs (Durchgang) und auch beim Ein- und Ausstieg kann stark behindert werden. Dies kann sich besonders im Fall einer notwendigen Evakuierung des Busses auswirken.
- Da die Türbereiche u. U. nicht zügig freigegeben werden können, kann es vor allem bei nach innen schwenkenden Türen zu besonderen Gefährdungen von Fahrgästen kommen, die den Türbereich aufgrund der „Engstelle“ noch nicht verlassen konnten oder beim Durchgang um das Elektromobil herumgehen müssen.

3 Zusammenfassung und Fazit

Die vorliegende Untersuchung hatte zum Ziel, eine Aussage über mögliche Gefährdungspotenziale von Elektromobilen bei der Beförderung in Linienbussen zu treffen. Besonderes Augenmerk lag dabei auf der Überprüfung der Standsicherheit bei einer starken Betriebsbremsung oder einer Gefahrenbremsung. Durch ein Kippen oder Rutschen eines Elektromobils können Dritte und auch die Nutzer des Hilfsmittels selbst gefährdet werden. Die Untersuchung stützte sich auf rechnerische Verfahren für den Nachweis der Kipp- und Rutschsicherheit auf Basis physikalischer Gegebenheiten und mithilfe nachvollziehbarer Kenngrößen für die Bestimmung von Eingangsgrößen für die Berechnung. Die Berechnung erfolgte für Elektromobile unterschiedlicher Ausstattung und Größe, um die Spannweite der am Markt befindlichen Typenvielfalt bei den häufig verkauften Fahrzeugen abdecken zu können. Zudem wurde der Einfluss einer Zuladung (aufsitzende Person) mit einer gewissen Streubreite berücksichtigt. Die hier angewandten Berechnungsverfahren können nur statische Lastfälle ohne einen Einfluss dynamischer Wirkungen, wie sie im Fahrbetrieb auftreten können, berücksichtigen. Daher lassen sich nur tendenzielle Aussagen treffen. Um die Ergebnisse einordnen zu können und den Einfluss aus dem realen Fahrbetrieb zu berücksichtigen, wurden weiterhin die Ergebnisse einer Studie über die Sicherung von Rollstuhlnutzern in Linienbussen berücksichtigt.

Der rechnerische Nachweis der Standsicherheit für quer zur Fahrtrichtung des Busses aufgestellte Elektromobile hat gezeigt, dass bei Fahrmanövern, bei denen starke Beschleunigungs-/ Verzögerungskräfte auf das Elektromobil wirken, eine Gefahr des Rutschens und/oder Kippens besteht. Derartige Fahrmanöver – starke Betriebsbremsung und Gefahrenbremsung – sind im täglichen Linienbus-

¹⁶ Neuere Fahrzeuggenerationen verfügen in der Regel aufgrund der zunehmenden Inanspruchnahme von Mehrzweckflächen durch Transport von Hilfsmitteln, Fahrrädern usw. über größere Mehrzweckbereiche. Die Erreichbarkeit kann aber aufgrund der Installation von notwendigen Haltestangen im Innenraum für größere Fahrzeuge eingeschränkt sein.

¹⁷ In der Regel an der Tür, die am nächsten zur Mehrzweckfläche liegt (üblicherweise die zweite Tür).

betrieb nicht auszuschließen. Die Grenzwerte für das Kippen eines Elektromobils mit einer aufsitzenden Person können bereits bei einer starken Betriebsbremsung auftreten. Die Grenzwerte variieren allerdings – mit unterschiedlichem Einfluss – in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren, z. B. dem Gewicht und den Abmessungen (Breite) des Elektromobils, der Zuladung (Gewicht der aufsitzenden Person) oder der Anzahl der Räder. Die Berechnung erfolgte beispielhaft an drei unterschiedlichen Modellen mit variierender Zuladung. Die Ergebnisse sind daher nicht als „scharfe Grenzwerte“ zu betrachten, sondern mit einer gewissen Streubreite (nach oben und nach unten) zu berücksichtigen.

Zur Plausibilitätsprüfung und zur Berücksichtigung von Faktoren aus dem realen Fahrbetrieb wurden die Ergebnisse einer bereits veröffentlichten Studie berücksichtigt, in der die Sicherheit von Rollstuhlnutzern bei der Beförderung in Linienbussen untersucht worden war. Für die Untersuchung waren umfassende Mess- und Fahrversuche mit Rollstuhlnutzern – auch im Realverkehr – durchgeführt worden. Es zeigte sich, dass beim Normalbetrieb im Fahrverkehr mit Bussen durch die Verzögerung die Grenzwerte für Kippen oder Rutschen erreicht werden können. Die praktischen Fahrversuche und Messreihen der seinerzeit durchgeführten Untersuchung bestätigen somit die tendenzielle Aussage der rechnerisch ermittelten Werte der aktuellen Untersuchung. Ein Kippen oder Rutschen kann bei ordnungsgemäßer Aufstellung eines Rollstuhls – Aufstellung entgegen der Fahrtrichtung des Busses und mit der Rückenlehne angelehnt an die Prallplatte – vermieden werden, da der Rollstuhl durch die Prallplatte abgefangen bzw. gehalten wird. Bei einer ungesicherten Aufstellung (z. B. längs mit Abstand zur Prallplatte oder quer zur Fahrtrichtung), kann es zu einem Wegrutschen oder sogar Umkippen kommen.

Analog zu den Ergebnissen bei Rollstühlen ist auch eine Gefahr des Kippens oder Rutschens bei Elektromobilen nicht auszuschließen, sondern bei Fahrmanövern mit starken Beschleunigungskräften, die auf das Elektromobil wirken wahrscheinlich. Abweichungen bezüglich der Grenzwerte können sich durch die unterschiedliche Fahrzeuggeometrie (Lage des Schwerpunktes usw.) ergeben. Je höher der Schwerpunkt (beeinflusst auch durch die Sitzposition) liegt oder je geringer die Spurbreite, desto größer ist die Kippgefahr (bei gleichbleibenden übrigen Randbedingungen).

Aufgrund ihrer stark eingeschränkten Manövrierfähigkeit auf engem Raum bedingt durch die Fahrzeuglänge (bis zu etwa 1,60 m) sowie den im Vergleich zu Rollstühlen relativ großen Wendekreis, der einen Richtungswechsel auf Bewegungsflächen wie sie für Rollstuhlnutzer vorgesehen sind in der Regel nur mit erheblichem Rangieraufwand gestattet, ist in der Praxis zu beobachten, dass Elektromobile üblicherweise quer zur Fahrtrichtung im Einstiegsbereich der hinteren oder mittleren Tür des Busses abgestellt werden. Die vom Gesetzgeber für einen sicheren Transport von Rollstühlen vorgesehenen Rückhaltesysteme (Prallplatte oder Prallfläche) können überwiegend aufgrund der geringen Rangierfähigkeit nicht erreicht und bestimmungsgemäß genutzt werden (rückwärtiges Anlehen). Zudem wurde bisher noch nicht überprüft, ob die vorhandenen Sicherungssysteme, die ein Kippen und Rutschen bei starker Verzögerung des Busses verhindern, für Elektromobile und deren Nutzer dieselbe Sicherheit bieten, wie für Nutzer eines Rollstuhls.

Viele Linienbusse älterer Bauart verfügen über eine Aufstellfläche für einen Rollstuhl, die sich gemäß den Vorgaben der EU-Busrichtlinie in ihren Abmessungen am Bemessungsrollstuhl orientiert. Dieser unterschreitet mit einer Länge von 1,25 m (inkl. Insasse) die Längenabmessungen größerer Elektromobile (ca. bis 1,60 m) deutlich. Somit wäre, selbst wenn der Aufstellbereich theoretisch erreicht werden könnte, aufgrund der Fahrzeuglänge eine Nutzung nicht möglich. Erst neuere Fahrzeuggenerationen verfügen über größere Aufstellbereiche (Mehrzweckflächen). Die allerdings aus Gründen der Sicherheit aller Fahrgäste erforderlichen und oftmals im Bereich der Mehrzweckflächen installierten Haltestangen können die Bewegungsflächen einschränken, so dass wiederum Schwierigkeiten beim Erreichen der Aufstellplätze infolge der stark eingeschränkten Rangierfähigkeit bestehen können.

Als weitere Folgen dieser eingeschränkten Rangierfähigkeit

- besteht eine erhöhte Kipp- oder Rutschgefahr bei Fahrmanövern mit großen Verzögerungs- oder Beschleunigungskräften aufgrund der Aufstellung quer zur Fahrtrichtung des Linienbusses,
- muss der Bus nach der vorwärts gerichteten Einfahrt rückwärts fahrend verlassen werden, was aufgrund der fehlenden Sicht für den Aufsitzer zu Gefahren beim Befahren der Klapprampe führen kann (z. B. Abrutschen von der Rampe bei Schräganfahrt),
- kann die Nutzbarkeit der Klapprampe durch das abgestellte Elektromobil eingeschränkt sein,
- wird der Fahrgastfluss und Fahrgastwechsel im Türbereich stark behindert, sowohl beim Durchgang von Fahrgästen in Längsrichtung des Busses als auch beim Ein- und Aussteigen (was sich besonders bei Evakuierungen auswirken kann),
- wird die Nutzbarkeit (An- und Abfahrt) der Mehrzweckbereiche für andere Nutzer, z. B. Rollstuhl- oder Rollatornutzer oder Kinderwagen behindert.

Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass unter den derzeitigen Rahmenbedingungen bei der Mitnahme von Elektromobilen in Linienbussen eine betriebliche Gefährdung sowohl für Dritte (Fahrgäste) als auch für die Nutzer der Elektromobile selbst nicht ausgeschlossen werden kann. Diese zeigt sich vor allem in einer Kipp- und Rutschgefahr bei Fahrmanövern mit höheren Verzögerungs- und Beschleunigungskräften. Zudem können sich Behinderungen anderer Fahrgäste ergeben, die den ordnungsgemäßen Betrieb teils massiv stören können, z. B. beim Fahrgastwechsel, bei Fahrgastbewegungen im Innenraum, bei der Nutzung der manuellen Klapprampe oder bei der An- und Abfahrt der Mehrzweckbereiche durch andere Nutzer.

4 Quellen

- [1] ASR A1.5/1,2, vom Februar 2013: Technische Regeln für Arbeitsstätten - Fußböden. Fundstelle: GMBI 2013, S. 931.
- [2] Altro GmbH (2014): Bodenbeläge für Busse. Linienbusse, Reisebusse und Einsatzfahrzeuge. Hamburg. Online verfügbar unter <http://www.altro.de/Transport-Bodenbelage/Bodenbelage-fur-Busse.aspx>, zuletzt geprüft am 09.04.2014.
- [3] Averbeck, Richard (2004): Sicherheit im Omnibusverkehr. Nutzfahrzeuge - Mobile Zukunft. VDA-Presseworkshop. Frankfurt am Main, 08.07.2004.
- [4] BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen (1992): Die Sicherung von Rollstuhlfahrern in Linienbussen und Behindertentransportwagen. Bremerhaven (Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 88).
- [5] Bogestra AG (2011): Gut unterwegs - Tipps für Fahrten mit dem Elektromobil. Stand Mai 2011. Bochum.
- [6] Bundesminister für Verkehr (01.09.1970): Verordnung über die Allgemeinen Beförderungsbedingungen für den Straßenbahn- und Obusverkehr sowie den Linienverkehr mit Kraftfahrzeugen vom 27. Februar 1970 (BGBl. I S. 230), die zuletzt durch Artikel 4 der Verordnung vom 8. November 2007 (BGBl. I S. 2569) geändert worden ist. BefBedV.
- [7] Bundesminister für Verkehr (04.02.2011): Fahrzeug-Zulassungsverordnung vom 3. Februar 2011 (BGBl. I S. 139), die zuletzt durch Artikel 1 u. 2 der Verordnung vom 8. Oktober 2013 (BGBl. I S. 3772) geändert worden ist. FZV.
- [8] Norm DIN 51130:2014-02: Prüfung von Bodenbelägen - Bestimmung der rutschhemmenden Eigenschaft - Arbeitsräume und Arbeitsbereiche mit Rutschgefahr - Begehungsverfahren - Schiefe Ebene.
- [9] Norm DIN EN 12184 (EN 12184:2009): Elektrorollstühle und -mobile und zugehörige Ladegeräte - Anforderungen und Prüfverfahren.
- [10] Norm DIN 18040-1:2010-10, Oktober 2010: Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 1: Öffentlich zugängliche Gebäude.
- [11] Essener Verkehrs-AG (2013): Fahrten mit dem Elektromobil. Essen. Online verfügbar unter <http://www.evag.de/service/barrierefreiheit/fahrten-mit-dem-elektromobil.html>, zuletzt geprüft am 16.12.2013.
- [12] Europäisches Parlament; Europarat: Richtlinie 2001/85/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. November 2001 über besondere Vorschriften für Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit mehr als acht Sitzplätzen außer dem Fahrersitz und zur Änderung der Richtlinien 70/156/EWG und 97/27/EG. Fundstelle: ABl. L 42 vom 13.2.2002, S. 1.
- [13] Hauptverband der gewerblichen Berufsgenossenschaften: Fußböden in Arbeitsräumen und Arbeitsbereichen mit Rutschgefahr. Aktualisierte Fassung Oktober 2003 (BGR, 181).
- [14] Institut der deutschen Wirtschaft Köln e. V. (2014): GKV-Hilfsmittelverzeichnis. Rehadat. Stand: Bundesanzeiger vom 30.4.2014. Köln.
- [15] Kasten, Peter (1992): Fahrgastfreundliche und behindertengerechte Linienbusse. Beschleunigungsmessungen an Rollstühlen und Linienbussen. In: Die Sicherung von Rollstuhlfahrern in Linienbussen und Behindertentransportwagen. BASt - Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven (Schriftenreihe Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 88), S. 31–66.
- [16] Kölner Verkehrs-Betriebe AG (2012): Mitnahmeregelung. Betriebliche Anweisung 051/12. Köln.
- [17] Magdeburger Verkehrsbetriebe GmbH & Co. KG: Beförderungsbedingungen der Verkehrsunternehmen des marego. Magdeburg. Online verfügbar unter

<http://www.mvbnet.de/fahrkarten/sonstiges/befoerderungsbedingungen/>, zuletzt geprüft am 16.05.2014.

- [18] N. V. Vermeiren N. V. (2006): Shoprider. Gebrauchsanweisung. 3. Auflage.
- [19] N. V. Vermeiren N. V. (2008): Venus 4 Sport. Gebrauchsanweisung. Kalmthout (Belgien).
- [20] N. V. Vermeiren N. V. (2012): Ceres 3 - Ceres 4. Gebrauchsanweisung.
- [21] VDV - Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e. V. (2014): Mitnahme von Mobilitätshilfen in Bussen. Ausgabe 1/2014. Köln (VDV-Mitteilung, 728).
- [22] TRENDMOBIL GmbH (2004): Nevada. Betriebshandbuch. Paderborn.
- [23] HBW Baubedarf - Werkzeuge (2014): Umrechnung Dachneigung Grad / Prozent. Mühlau. Online verfügbar unter <http://www.hbw-handel.de/informationen/umrechnung-dachneigung-grad-prozent.html>, zuletzt geprüft am 22.05.2014.