

Fahrverhalten mit Elektrofahrzeugen

Von Martin Neuburger, V. Siegle, Tobias Eberhardt, Jochen Lehmkuhl *

Aktuell findet eine Penetration von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr statt. Diese neue Art der Fortbewegung wird untersucht. Im Laufe der Untersuchungen stellt sich heraus, dass eine auf E-Fahrzeugen basierende Mobilität einer veränderten Bewegungscharakteristik unterliegt, weshalb die Interaktion Mensch – Technik näher betrachtet wird. Diese Betrachtungen ergeben ein neuartiges Bild bezüglich Fahrverhalten, welches insbesondere bei Bremsmanövern erkennbar ist.

Für diese Aussage werden Fahrzeugverzögerungen, teilweise initiiert durch aktive Bremsungen, detailliert betrachtet. Zum Zwecke der Generalität wird ein statistischer Ansatz gewählt, wodurch ein Vergleich Verbrenner – Elektro durchgeführt werden kann. Im Anschluss daran wird, aufbauend auf den erlangten Ergebnissen, dezidiert auf einen typischen Bremsvorgang im Stadtverkehr eingegangen. Ein Bezug zum Gesamtkontext der Mobilität wird gegeben.

1 Einleitung

Das erklärte Ziel einer dekarbonisierten Mobilität bis zum Jahr 2035 führt zu einer schnellen Penetration von elektrischen Fahrzeugen im Straßenverkehr. Gleichwohl entspricht der Wechsel von einem Verbrenner zu einem Elektrofahrzeug nicht etwa einem klassischen Fahrzeug-Modellwechsel, sondern beinhaltet viel tiefgreifendere Veränderungen. So muss bei dieser Umstellung berücksichtigt werden, dass die neue elektrische Fortbewegung eine veränderte Bewegungscharakteristik aufweist.

Die Bewegungscharakteristik kann auf viele unterschiedliche Arten beschrieben werden. Eine der häufigsten Darstellungen ist die Form einer Drehmoment-Drehzahl-Darstellung. Diese Darstellung wird in Kfz-Datenblättern verwendet und beschreibt das maximal abrufbare Drehmoment der Antriebseinheit über der Drehzahl. Hieraus kann direkt die maximale bereitgestellte drehzahlabhängige Leistung ermittelt werden.

Während klassische Verbrennungsmotoren einen Drehzahlbereich zwischen 500 min^{-1} und 7000 min^{-1} ab-

decken, kann im Elektrofahrzeug die Antriebseinheit (elektrische Maschine) in einem Bereich zwischen 0 und circa 16000 min^{-1} betrieben werden (noch höhere Umdrehungen sind in industriellen Anwendungen gängig und können auch im Bereich der Mobilität Einzug erhalten).

Die bereits erwähnte Darstellung des Drehmoments über die Drehzahl entspricht einer quasi stationären Kennlinie. Dynamische Effekte, wie beispielsweise Drehzahländerungen pro Zeit oder Leistungsreduktionen aufgrund von Temperatur sind darin nicht enthalten.

2 Fahrzeugkonfiguration

Die quasi stationäre Darstellung erlaubt eine Auslegung von Fahrzeug-Antriebssträngen. Aufgrund des erweiterten Drehzahlbereichs von Elektromotoren sind neuartige Antriebskonfigurationen in Fahrzeugen sinnvoll. Da der überaus drehzahlfreudige Elektromotor über die erhöhte Dynamik und den erweiterten Drehzahlbereich hinaus auch noch sein maximales Drehmoment aus dem Stillstand heraus bereitstellt, sind

1-Gang-Antriebskonzepte ohne Kupplung möglich und finden auch weite Verbreitung. Gleichzeitig limitiert eine Reduktion des Antriebsstrangs auf eine 1-Gang-Konfiguration ohne Kupplung die Höchstgeschwindigkeit des Fahrzeugs. Je nach Leistungsklasse liegt diese zwischen 150 und 200 km/h. Alternativen mit 2-Gang-Getriebe sind denkbar.

Die neuartige Antriebsstrangkongfiguration macht einen klassischen Vergleich zwischen Antriebsaggregaten unterschiedlicher Kategorien unbrauchbar. Eine Darstellung der realen Fahrzeugbeschleunigungen (a) über der Geschwindigkeit (v) entsprechend [1] ist dabei zielführender, da diese Darstellung den gesamten Antriebsstrang inklusive der der Antriebseinheit nachgelagerten Getriebe mit beinhaltet.

BILD 1 zeigt eine Darstellung der maximal möglichen Beschleunigungen für zwei Fahrzeuge unterschiedlicher Kategorie bei vergleichbarer Leistungsklasse. Es wird bewusst die maximale Beschleunigung für die Darstellung gewählt, da so der Einfluss des Fahrers vernachlässigt werden kann. Erkennbar sind Limitierungen aufgrund einer Drehmomentenbegrenzung als auch der Einfluss der Gangwahl für den dargestellten Verbrenner.

Diese Darstellungen sind nicht neu. Was aber durchaus nicht sofort erkennbar ist, ist der Umstand, dass der elektrische Antriebsstrang „symmetrisch“ aufgebaut ist. Werden die Fahrkinematik (dynamische Gewichtsverteilung inklusive daraus resultierendem maximalen Traktionsmoment) und der Luftwiderstand vernachlässigt, dann kann man die Kennlinie des Elektroantriebs durch eine Punktspiegelung am Ursprung auch für negative Geschwindigkeiten darstellen. Vereinfacht ausgedrückt

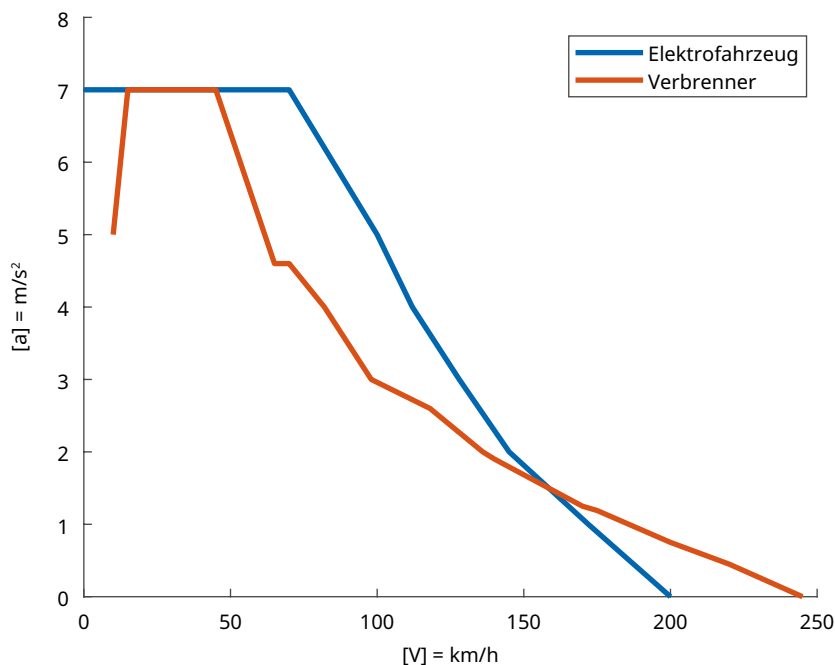


BILD 1: Geschwindigkeitsabhängige maximale Beschleunigung zweier vergleichbarer Fahrzeuge

FIGURE 1: Speed-dependent maximum acceleration of two comparable vehicles

bedeutet dies, dass das Fahrzeug elektrisch ohne Zuhilfenahme einer Bremsanlage gleich schnell beschleunigen wie auch verzögern kann. Dies ist für den Verbrenner mit seinem im Vergleich dazu geringen Motor-Schleppmoment nicht der Fall.

Eine grafische Darstellung der Verzögerung aufgrund eines Motor-Schleppmoments ist untypisch. Betrachtet man jedoch, dass im Falle des Elektrofahrzeugs theoretisch die maximale Antriebsleistung zum Verzögern Anwendung finden kann, wogegen dem der Verbrenner nach [2] mit circa 5 bis 7 kW pro Liter Hubraum gegenübersteht, so ist eine um wenigstens Faktor 10 geringere Verzögerungsleistung konventionell verfügbar.

Wie stark letztendlich die elektrische Verzögerung, umgangssprachlich auch als Rekuperation bezeichnet, tatsächlich ist, liegt in der Hand der Fahrzeugentwickler und auch des Fahrers. Je nach Gaspedalstellung und gewähltem Fahrmodus variiert diese. Eine Zusammenfassung bezüglich realisierter technischer Umsetzungen kann einer ausführlichen Untersuchung nach [3] entnommen werden.

Für den Unfallanalytiker ist weniger von Bedeutung, wie groß die maximal möglichen Rekuperationsmomente sind, sondern vielmehr wie sich das Weg-Zeit-Diagramm im Unfall tatsächlich ausgestaltet. Natürlich unterliegen diese Verläufe vielen Randbedingungen und sind auch situationsabhängig. Eine allgemeingültige Darstellung ist nicht möglich. Gleichwohl kann untersucht werden, ob sich generelle prinzipielle Unterschiede aufgrund einer neuen Antriebseinheit ergeben. Mit Hilfe eines statistischen Ansatzes können generelle Trends bestimmt werden. Dies wird im Folgenden Verlauf durchgeführt und weiter untersucht.

3 Fahrverhalten

Der Fahrer reagiert direkt und kontinuierlich auf sein Umfeld. Hierbei ist eine signifikante Einflussgröße das vom Fahrzeug angebotene Leistungspotential beziehungsweise die daraus resultierende mögliche geschwindigkeitsabhängige Beschleunigung. Eine Veränderung dieser kann Einfluss auf das jeweilige Fahrverhalten haben. Wie bereits in Bild 1 dargestellt, ist

generell von einem Unterschied zwischen Elektro und Verbrennerfahrzeug auszugehen. Die Darstellung zeigt einen realen Vergleich zweier Fahrzeuge ähnlicher Leistungsklassen.

Augenscheinlich besitzt der Elektrowagen ein höheres Beschleunigungspotential beim Anfahren. Dieses hohe Beschleunigungspotential beim Anfahren tritt häufig auf und wird intuitiv als Maß für die Größe der Antriebseinheit genommen. Das sich dadurch einstellende Fahrempfinden suggeriert dem Fahrer bei Elektrofahrzeugen eine höhere installierte Leistung als bei Verbrennern (ein ähnlicher Effekt – hohes Drehmoment bei geringer Drehzahl – hat auch zu einer verstärkten Durchdringung des Dieselmotors aufgrund einer direkten Aufladung geführt). Im weiteren Geschwindigkeitsbereich zeigt sich das Elektrofahrzeug vorteilhaft gegenüber dem Verbrenner bezüglich möglicher Beschleunigungspotentiale. Erst für höhere Geschwindigkeiten, im dargestellten Fall ab circa 160 km/h, negieren sich die Vorteile des Elektrofahrzeugs hin zum Verbrenner. Gleichwohl gilt es zu erwähnen, dass die Geschwindigkeit für einen Schnittpunkt beider Kurven von den Leistungsdaten der jeweiligen Motorisierungsvariante abhängt.

Für eine Unfallanalytik ist häufig nicht die Beschleunigung, sondern vielmehr die Verzögerung des Fahrzeugs von Bedeutung. Berücksichtigt man dabei, dass aus physikalischen Gesichtspunkten die Fahrzeugmasse für die Verzögerung nicht relevant ist, so kann unabhängig von der Antriebsart für alle Fahrzeuge basierend auf dem vorhandenen Bremssystem eine individuelle maximale Bremsverzögerung angegeben werden. Mit anderen Worten bedeutet dies, dass für den Fall einer Bremsung die maximale Verzögerung nicht davon abhängt, ob es sich um einen verbrennungs- oder elektrisch betriebenen Wagen handelt.

Dieser Umstand ist deshalb relevant, da es Vergleiche unterschiedlicher Fahrzeuge vereinfacht. Unter der Annahme, dass beim Verzögern die Haftreibung noch nicht überschritten wurde (dieser Übergang wird erst bei

einer Vollbremsung relevant) können alle Fahrzeuge unabhängig der eigentlichen Motorisierung miteinander verglichen werden.

4 Datenerhebung

Dieser Umstand wurde weiter vertieft und näher untersucht. Dafür wurden Fahrzeuge einer Fahrzeugflotte mit Datenloggern bestückt. Bei den Testfahrzeugen handelte sich um fünf benzinbetriebene Fahrzeuge mit einem Leistungsbereich von 59 bis 210 kW und drei Elektrofahrzeuge (Leistungsbereich 80 bis 147 kW). In anonymisierter Form wurde bei den Fahrzeugen die vom Fahrzeug ermittelte Fahrzeuggeschwindigkeit ($v(t)$ -Signal) in einem Raster von 20 ms aufgezeichnet. Es ist darüber hinaus sichergestellt worden, dass eine höhere Aktualisierungsrate der Fahrzeuggeschwindigkeit als die Abtastrate vorhanden ist.

Im weiteren Verlauf wurden die Fahrzeuge durch nicht bekannte Nutzer betrieben. Über die Fahrten ist keinerlei Information bekannt. Die Aufzeichnung wurde derart lange fortgeführt, bis jeder Fahrzeugpool eine akkumulierte Laufleistung von 3000 km überschritten hatte.

5 Datenanalyse

In einer nachgelagerten Datenanalyse bestand die Aufgabe, die Fahrprofile derart auszuwerten, dass eine technische Beschreibung möglich wird. Hierfür wurden die ermittelten Werte aufgearbeitet. Da die Fahrzeuggeschwindigkeit einem analogen Wert entspricht, der Datenlogger aber nur alle 20 ms einen Wert aufzeichnet, entspricht dies einer Diskretisierung des Geschwindigkeitssignals sowohl im Zeit- als auch im Geschwindigkeitsbereich.

Ohne die Signaltheorie weiter zu vertiefen, bedeutet dies entsprechend Nyquist-Abtasttheorem [4], dass sich eine maximale frequenzabhängige Auflösung des Geschwindigkeitssignals von 25 Hz ergibt. Alternativ kann dieser Umstand dadurch beschrieben werden, dass sehr kurze Ereignisse

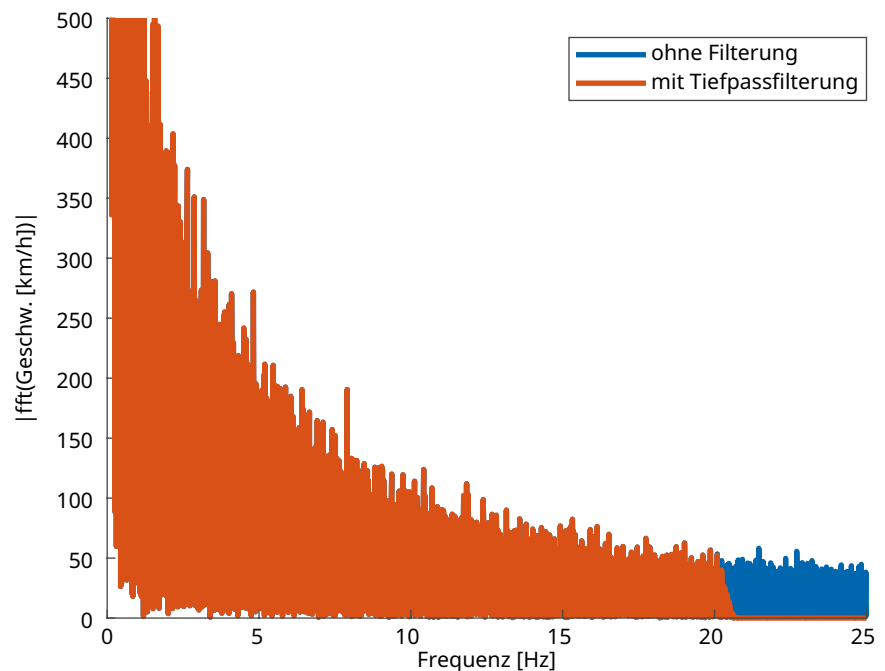


BILD 2: Darstellung der positiven Frequenzanteile (Fast Fourier Transformation fft) des Geschwindigkeitssignals für den originären und gefilterten Geschwindigkeitsverlauf

FIGURE 2: Representation of the positive frequency components (Fast Fourier Transformation fft) of the velocity signal for the original and filtered velocity profile

mit einer Dauer kleiner 0,04 s nicht aus den Aufzeichnungen extrahiert werden können. Betrachtet man dazu, dass hochfrequente Einflüsse zum Beispiel aufgrund unwegsamer Straßen etc. je nach Fahrzeugkonfiguration generell oberhalb 20 bis zu 50 Hz in der Karosserie gedämpft werden, so wird ersichtlich, dass höhere Frequenzanteile keine weiteren hier relevanten Informationen beinhalten.

Folglich wird eine aus Signaltheorie notwendige Filterung der Daten mit Hilfe eines Tiefpasses erster Ordnung bei einer Grenzfrequenz von 20 Hz durchgeführt. Exemplarisch wird eine Überlagerung des originären (blau) und des gefilterten $v(t)$ -Signals (orange) spektral in **BILD 2** dargestellt. Da die Fahrzeuge vorwärts bewegt werden kann von einem positiven (mittleren) Gleichanteil des $v(t)$ -Signals ausgegangen werden, was durch einen Anstieg der Amplitude für geringere Frequenzen erkennbar ist. Die Abbildung wurde für eine bessere Darstellung auf einen maximalen Y-Wert von 500 limitiert.

Aufgrund der großen Datenmenge (circa 20 Mio. Punkte) muss für weitere Auswertungen auf bereits bestehende sehr zeiteffiziente Algorithmen zurückgegriffen werden. Hierbei bietet sich ein Vorgehen an, welches für die Lebensdauerbestimmung von elektronischen Komponenten Verwendung findet. Der hier verwendete Algorithmus besitzt den Namen „Rainflow“ [5]. Im übertragenen Sinne zählt er die Anzahl der Bremsvorgänge bei gleichzeitiger mittlerer Geschwindigkeit.

Dies wird im Folgenden verdeutlicht: Wird ein Fahrzeug von 100 auf 20 km/h verzögert und anschließend mit dem Algorithmus ausgewertet, so ergibt dieser folgende drei Werte:

- Anzahl: 0,5
- Höhe: 80 km/h
- Mittelwert: 60 km/h

Zur Erläuterung werden die Größen näher beschrieben: Die Anzahl von 0,5 spiegelt wider, dass der Endpunkt nicht dem Startpunkt entspricht. Der Algorithmus versucht immer einen kompletten Durchlauf auszuwerten und gibt hierfür eine 1 aus.

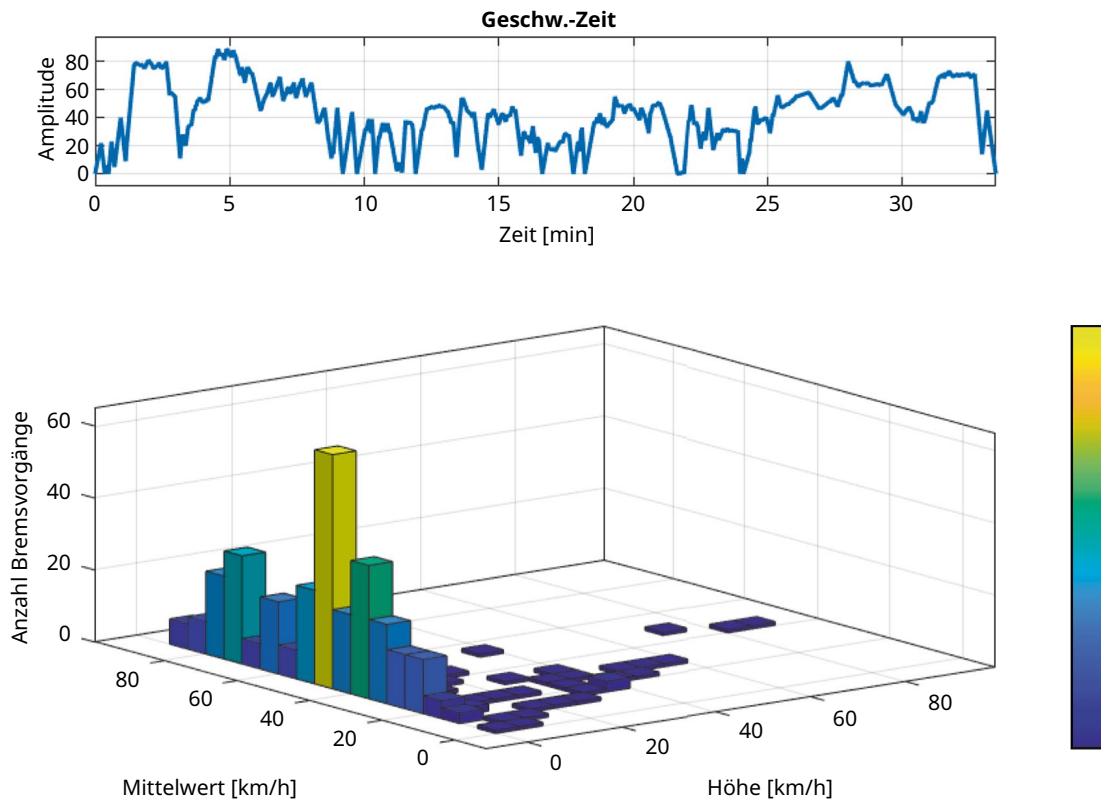


BILD 3: Darstellung eines beliebigen Geschwindigkeit-Zeitprofils inklusive Auswertung nach Rainflow

FIGURE 3: Representation of an arbitrary velocity-time profile including evaluation according to Rainflow

Exemplarisch bedeutet dies, dass im dargestellten Fall ein erneutes Beschleunigen von 20 auf 100 km/h mit anschließender Rainflow-Auswertung für die Anzahl eine 1 ausgibt.

Die Ausgabegröße „Höhe“ entspricht der gesamten Geschwindigkeitsänderung eines Bremsvorgangs. Im hier dargestellten Fall beträgt die Änderung aufgrund der Verzögerung von 100 auf 20 km/h = 80 km/h.

Der Ausgabewert „Mittelwert“ verkörpert die mittlere Geschwindigkeit des Bremsvorgangs. Der Mittelwert zwischen 100 und 20 km/h beträgt 60 km/h. Möchte man die Startgeschwindigkeit des Bremsvorgangs ermitteln, so kann diese aus der Addition des Mittelwerts und der halben Höhe errechnet werden.

Der Algorithmus unterscheidet nicht zwischen Beschleunigung und Verzögerung. Folglich müssen in einem weiteren Ausleseschritt die ermittelten Ergebnisse auf reine Verzögerungen reduziert werden. Für eine greifbare Handhabung werden die Verzögerun-

gen in Gruppen zusammengefasst. Als Gruppe werden hier immer Geschwindigkeitsbereiche von $\Delta v = 5$ km/h sowohl für den Mittelwert als auch für die Höhe gewählt.

Eine grafische Darstellung erfolgt in drei Dimensionen, wobei die Grundebene durch eine X-Achse (Höhe) und Y-Achse (Mittelwert) gebildet wird. Die Z-Achse spiegelt die Anzahl der vorkommenden Bremsvorgänge der jeweiligen Gruppe wider.

BILD 3 zeigt ein willkürlich herausgegriffenes zeitabhängiges Geschwindigkeitsprofil (oben) inklusive Verzögerungs-Auswertung nach Rainflow (unten). Eine Häufung der Verzögerungen mit geringer Höhe (links) ist erkennbar (zum Beispiel befindet sich der maximale Wert an Verzögerungen, hier durch den gelben Balken mit der Höhe von 65 dargestellt).

Dieser Balken entspricht Bremsvorgängen, typischerweise aufgetreten während einer Stadtfahrt bei einer Geschwindigkeit von circa 50 km/h (Mittelwert) und einer gesamten Ge-

schwindigkeitsreduzierung von bis zu 5 km/h pro Bremsvorgang (Höhe).

Der Algorithmus hat keine Möglichkeit, eine sich im Verkehrsfluss ergebende Geschwindigkeitsänderung von einer Bremsung zu unterscheiden. Folglich ist die Häufung am linken Ende der Darstellung eher dem klassischen Verkehrsfluss geschuldet als einer aktiven Verzögerung. Dieser Umstand ist für die hier vorliegende weitere Betrachtung nicht relevant, da einer Geschwindigkeitsreduzierung von bis zu $\Delta v = 10$ km/h nicht das Potential für die Entstehung höchster Unfallschäden attestiert wird. Für eine weitere Auswertung werden diese Verzögerungen herausgefiltert.

Die Rainflow-Algorithmetik gibt keine Auskunft bezüglich tatsächlichen Verzögerungswerten, weshalb dieser Aspekt im Folgenden separat betrachtet werden muss. Hierfür werden alle noch relevanten Bremsvorgänge in kleinste Stücke mit einer jeweiligen Dauer von 20 ms unterteilt. Für jede kleinste Einheit wird die hier vorliegende

Verzögerung ermittelt. Die kleinsten Stücke gleicher Verzögerung werden zu einer verzögerungsabhängigen Gesamtdauer akkumuliert und wieder in Klassen mit einer Breite von $0,25 \text{ m/s}^2$ geclustert. Damit erhält man die gesamte Verzögerungsdauer, über die die Verzögerung der jeweiligen Klasse im Fahrprofil vorherrscht. Diese Größe wird mit zunehmender Anzahl an Fahrstrecken kontinuierlich wachsen.

Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Messungen zu ermöglichen, wird der Wert mit der zurückgelegten Wegstrecke normiert. Jetzt ist es möglich, unterschiedliche Fahrstrecken miteinander zu vergleichen. Je größer der erhaltene Werte ist, um so häufiger kommt er in einem realen Fahrprofil vor. Da aber während einer Fahrt nicht kontinuierlich verzögert wird, sind die erlangten absoluten Werte sehr gering und schwer greifbar.

6 Auswertung des statistischen Vergleichs

In dieser Ausarbeitung wird eine Veränderung der Bremscharakteristik von Elektrofahrzeugen in Bezug zu klassischen auf Verbrennung basierten Fahrzeug betrachtet. Um diesen Vergleich durchführen zu können, müssen die normierten gesamten Verzögerungsdauern beider Fahrzeugtypen zueinander in Bezug gesetzt werden. In der hier vorliegenden Ausarbeitung soll der Verbrenner als Basis beziehungsweise Bezugsgröße dienen. Die daraus resultierende Berechnung läuft derart ab, dass für jede Verzögerungsgruppe die gesamte ermittelte Verzögerungsdauer der Elektrofahrzeuge durch den äquivalent erzielten Wert der Verbrenner dividiert wird. Der dadurch erhaltene Quotient ist eine dimensionslose Größe. Ihre Deutung wird anhand einiger Beispiele näher erläutert.

Ein exemplarischer Wert von 100 % bei einer Verzögerung von 2 m/s^2 weist darauf hin, dass bei einer Betrachtung aller Fahrprofile die gesamte tatsächlich aufgetretene Verzögerungsdauer der Gruppe -2 m/s^2 für beide Fahrzeugkategorien gleich lang ist. Mit anderen Worten kann der Umstand

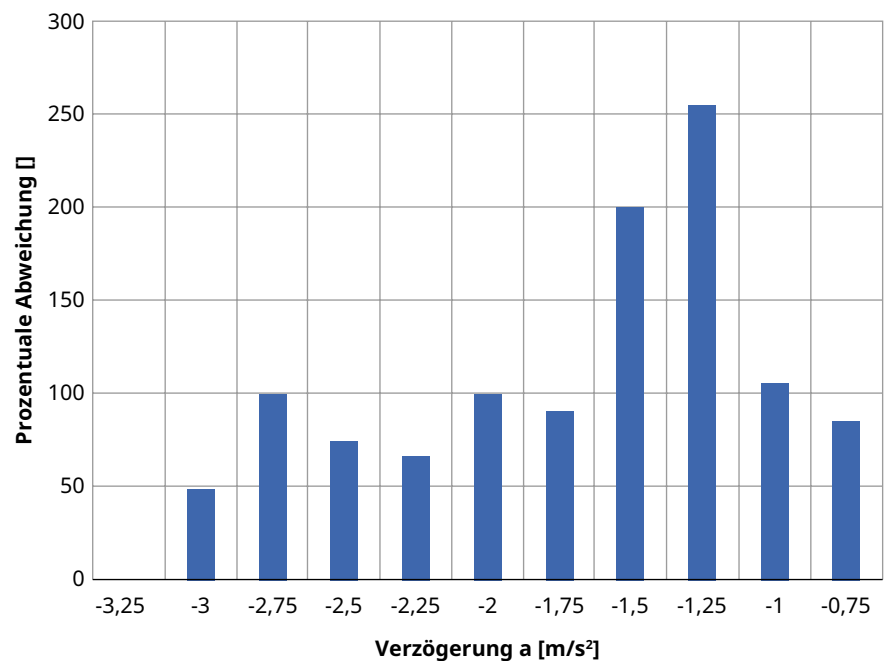


BILD 4: Darstellung der Abweichung von Verzögerungswerten bei Elektrofahrzeugen im Vergleich zu Verbrennerfahrzeugen

FIGURE 4: Illustration of the deviation of deceleration values for electric vehicles compared to combustion vehicles

derart beschrieben werden, dass im Mittel die Verbrenner mit einer Verzögerung von 2 m/s^2 gleich lange bremsen wie die Elektrofahrzeuge.

Übersteigt dieser Wert die 100 %, so wird im elektrisch betriebenen Fall länger mit dieser Verzögerung verzögert (zum Beispiel kommt für einen Verzögerungswert von 200 % die Verzögerung bei Elektrofahrzeugen doppelt so lange vor als in vergleichbaren Verbrennern). Umgekehrt gilt dieses Vorgehen auch für Werte kleiner 100 %. Bei einem Wert von 50 % tritt der Verzögerungswert nur mit der halben Dauer beim Elektrofahrzeug im Vergleich zum Verbrenner auf.

Das **BILD 4** zeigt die ermittelten Abweichungen in Form eines Balkendiagramms auf. Hier sind sowohl Werte größer als auch kleiner 100 % erkennbar. Dieser Umstand ist nicht verwunderlich, da es sich um eine Auswertung realer Fahrprofile handelt. Hierfür könnten viele Gründe wie zum Beispiel die gesamte verwendete Laufleistung etc. eine Erklärung sein. Gleichwohl ist eine Überhöhung der Verzögerungswerte in

einem Verzögerungssektor zwischen $-1,0$ bis $-1,75 \text{ m/s}^2$ um über Faktor zwei zu erkennen.

Diese Überhöhung spiegelt wider, dass sich Elektrofahrzeuge in diesem Bereich der Verzögerung (zwischen $-1,0$ und $-1,75 \text{ m/s}^2$) mehr als doppelt so lange aufhalten. Die vorhandene Abweichung ist derart groß, dass eine statistische Ungenauigkeit nicht anzunehmen ist. Folglich kann man dieses Ergebnis vereinfacht derart resümieren, dass Elektrofahrzeuge in Summe doppelt so lange mit einer Verzögerung von $-1,0$ bis $-1,75 \text{ m/s}^2$ verzögern als ihre vergleichbaren Verbrenner.

7 Individueller Bremsvorgang

Dieser Umstand soll noch näher betrachtet werden. Hierfür wurden neue Messfahrten initiiert. Um die Fahrer in ihrem Fahrverhalten nicht zu beeinflussen, wurde der Grund für die Aufzeichnungen nicht benannt. Für die Fahrten wurden spezielle Zubringerdienste gewählt. Sie hatten eine identische Strecke zu absolvieren und vollbrachten dies zu ähnlichen Zeiten.

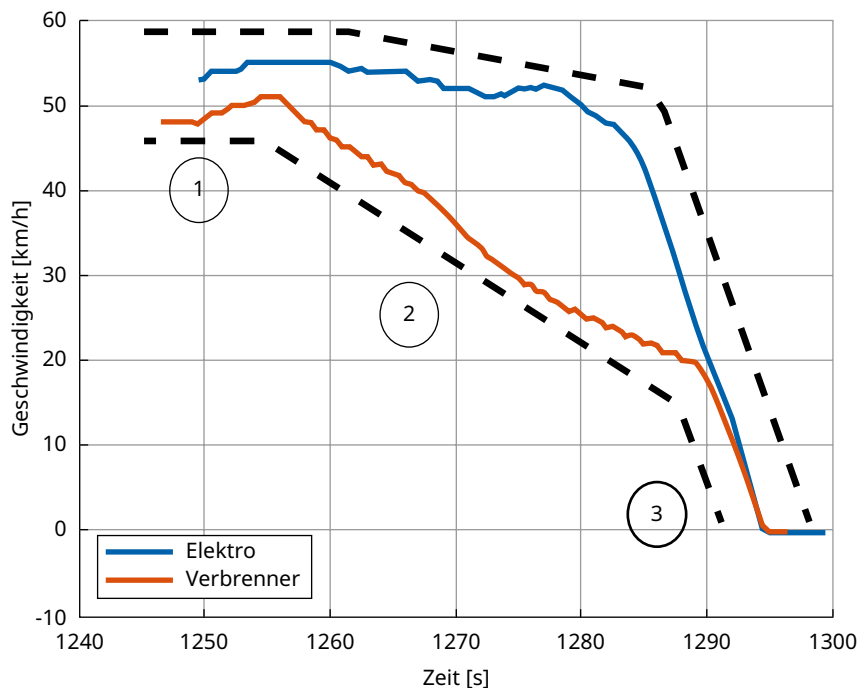


BILD 5: Vergleich zweier Bremsvorgänge

FIGURE 5: Comparison of two braking processes

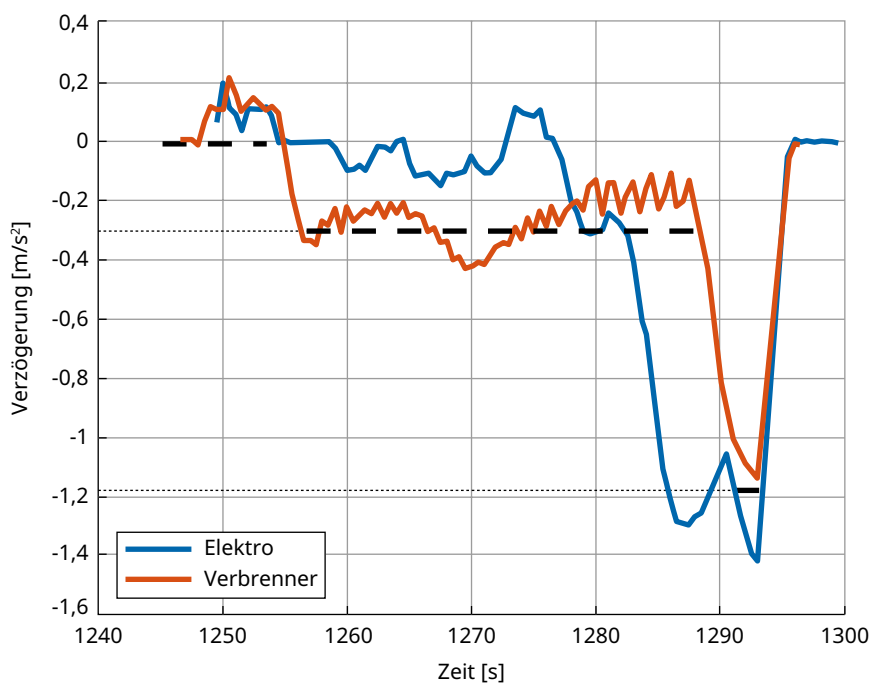


BILD 6: Darstellung der Verzögerungswerte während des Bremsvorgangs

FIGURE 6: Illustration of the deceleration values during the braking process

Die Geschwindigkeits-Zeitprofile werden anhand visueller Betrachtungen ausgewertet.

Hierbei sind subjektiv Unterschiede im Bremsverhalten der Fahrer zu

erkennen, wobei die Ausprägung der Unterschiede variiert.

Zur Verdeutlichung sollen die aufgetretenen Varianzen grafisch an einem typischen innerstädtischen Brems-

manöver verdeutlicht werden. Dafür wird anhand des zeitabhängigen Geschwindigkeitsprofils und der Kenntnis der Strecke der Streckenverlauf nachvollzogen. Im hier vorliegenden Fall wird eine Ampelschaltung auf der Wegstrecke für die weiteren Ausarbeitungen ausgewählt. Für eine rote Ampelstellung muss das Fahrzeug aus der regulären Fahrt heraus bis zum Stillstand abgebremst werden. Diese Verzögerung wird für beide Fahrzeugkategorien herausgegriffen und in **BILD 5** dargestellt. Die Bremsvorgänge sind in beiden Fällen ähnlich. Sie werden in drei unterschiedliche Phasen eingeteilt. Ergänzende gestrichelte Linien unterstützen die Visualisierung der einzelnen Bereiche.

- Phase 1 (Geradeausfahrt): Der Fahrer befindet sich im Straßenverkehr und nähert sich der Ampelschaltung
- Phase 2 (Leichte Verzögerung): Der Fahrer beginnt bereits, den Wagen zu verzögern. Im Elektrofahrzeug ist eine geringere Verzögerung zu erkennen.
- Phase 3 (Bremsung): Die letzte Wegstrecke wird klassisch in Form einer konstanten Verzögerung vollzogen. Diese Phase setzt beim Elektrofahrzeug früher ein und dauert über eine längere Zeit an. Die absoluten Verzögerungswerte sind für beide Kategorien vergleichbar

Nach der Phase 3 stehen beide Fahrzeuge an der Ampel. **BILD 6** zeigt die dabei aufgetretenen Verzögerungswerte. Es gilt zu erwähnen, dass die für die Darstellung notwendige Ableitung der Daten eine Unruhe in den Verzögerungswerten verursacht. Ferner sind aus Gründen der Übersichtlichkeit gestrichelte Orientierungslinien ausschließlich für den Fall Verbrenner eingezeichnet.

Eine Deutung der Bremsvorgänge führt zu folgenden Erkenntnissen. Während in Phase 1 die Fahrer noch keinen Unterschied während der Geradeausfahrt aufweisen findet eine erste Verzögerung in Phase 2 statt. Dieser eingeläutete Bremsvorgang beginnt mit einer moderaten Verzögerung, welche sich im Elektrofahrzeug weniger intensiv ausgestaltet.

In Phase 3 wird in beiden Fahrzeugkategorien die Verzögerung auf ein ähnliches Niveau erhöht. Da eine noch höhere Fahrzeuggeschwindigkeit des Elektrofahrzeugs vorherrscht, muss diese Phase früher starten. Aufgrund dessen bedarf es einer längeren Phase 3 bis das Elektrofahrzeug zum Stillstand kommt.

Diese „verlängerte Phase 3“ besitzt Verzögerungswerte im Bereich von 1 bis $1,75 \text{ m/s}^2$ und liegt damit in dem Bereich, welcher für die Elektrofahrzeuge häufiger auftritt. Folglich kann dies die Ursache für die erhöhte gesamten Verzögerungsdauern bei Elektrofahrzeugen im eruierten Bereich darstellen. Aus technischer Sicht sind die Verzögerungswerte weitab von den physikalisch gegebenen Grenzen. Diese veränderten Verzögerungen sind folglich einem dezidierten Fahrerverhalten zuzuschreiben. Was ursächlich das veränderte Fahrerverhalten initiiert bleibt unbekannt.

Eine Betrachtung der Verzögerungen erlaubt folgende Rückschlüsse: Die maximale Verzögerung der untersuchten Bremsvorgänge variiert nicht signifikant zwischen den einzelnen Fahrzeugkategorien. Gleichwohl aber dauert die Phase der maximalen Verzögerung aufgrund eines späteren Anbremsens im Elektrofahrzeug länger an.

Eine Übertragung der technischen Erkenntnisse auf die Verkehrsteilnehmer kann wie folgt beschrieben werden: Für einen dem Elektrofahrzeug folgenden Verkehrsteilnehmer zeigen

sich die Umstände als eine „starke“ beziehungsweise im Vergleich „stärkere“ Bremsung. Diese fordert ein schnelleres Reagieren, als dies beim klassischen Folgen von Verbrennerfahrzeugen nötig ist. Alternativ kann bei unveränderter Reaktionsgeschwindigkeit dem Umstand mit einem erhöhten Sicherheitsabstand begegnet werden. Damit erhöht sich das Risiko auf ein vorausfahrendes Elektrofahrzeug aufzufahren. Detaillierte Auswertungen der Versicherungen liegen dazu aktuell nicht vor, da diese neuerlichen Betrachtungen bislang nicht separat erfasst wurden.

8 Zusammenfassung

Eine statistische Betrachtung von Geschwindigkeits-Zeitprofilen wird für Verbrenner- und Elektrofahrzeuge durchgeführt. Hierbei ergeben sich Unterschiede bezüglich Verzögerungen, welche den zwei Fahrzeugkategorien zugeordnet werden können. Bei Elektrofahrzeugen ist eine akkumulierte Verzögerungsdauer in einem Bereich zwischen $-1,0$ bis $-1,75 \text{ m/s}^2$ doppelt so hoch als bei vergleichbaren Verbrennern. Eine technische Ursache hierfür scheint ausgeschlossen zu sein und muss daher vom Fahrer durch sein Fahrverhalten verursacht worden sein.

Weitere nicht statistisch abgesicherte Untersuchungen wurden durchgeführt. Für Bremsvorgänge wurden in beiden Fahrzeugkategorien vergleichbare maximale Verzögerungen ermit-

telt. Gleichwohl war aufgrund einer „verzögerten“ Bremsung für Elektrofahrzeuge ein länger andauernder hoher Verzögerungswert erkennbar. Diese Veränderungen könnten umgangssprachlich als „aggressiveres Fahren mit verzögertem Anbremsen“ bezeichnet werden und erfordern ein erhöhtes Reaktionsvermögen nachfolgender Verkehrsteilnehmer. Damit steigt die Gefahr eines Auffahrunfalls.

Eine Erklärung für das veränderte Fahrerverhalten kann nicht gegeben werden.

Literaturhinweise

- [1] H. Wallentowitz, Vorlesungsunterlagen zu Längsdynamik von Kraftfahrzeugen, Institut für Kraftfahrwesen Aachen (ika), RWTH Aachen.
- [2] Kraftfahrttechnisches Taschenbuch, Motorbremssysteme, ISBN 978-3-658-36386-4, S. 1246, 30. Auflage, Januar 2022.
- [3] S. Rieger, Untersuchungen zur Rekuperationsverzögerung von Elektroautos, VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 11 (2022), S. 386-391.
- [4] C. E. Shannon, Communication in the Presence of Noise, Proc. IRE. Vol. 37, No. 1, 1949.
- [5] ASTM E1049-85(2017), „Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis.“ West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

*Autoren

Prof. Dr.-Ing. Martin Neuburger ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Kraftfahrzeugelektrik/-elektronik und hält eine Professur an der Hochschule Esslingen – Fakultät Mobilität und Technik. Er leitet das Labor Elektrotechnik sowie ein Steinbeis Transferzentrum – Wissenszentrum Elektronik. Besonderer Dank gilt Dr. rer. nat. Dipl.-Phys. Viktor Siegle, ö. b. u. v. Sachverständiger im Bereich Geschwindigkeitsmessungen für die fruchtbaren Diskussionen sowie Dipl.-Ing. (FH) Tobias Eberhardt, ö. b. u. v. Sachverständiger für Kfz-Schäden und -Bewertung als auch M.Eng. Jochen Lehmkuhl, ö. b. u. v. Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle. ::

Driving behaviour with electric vehicles

Electric vehicles are currently penetrating road traffic. This new way of travelling is being investigated. In the course of the investigations it turns out that mobility based on e-vehicles is subject to changed movement characteristics, which is why the interaction between humans and technology is examined more closely. These observations provide a new picture of driving behaviour, which is particularly noticeable during braking manoeuvres.

For this statement, vehicle decelerations, partly initiated by active braking manoeuvres, are considered in detail. For the purpose of generality, a statistical approach is chosen, whereby a comparison between combustion engines and electric vehicles can be carried out. Subsequently, based on the results obtained, a typical braking process in urban traffic is discussed in detail. A reference to the overall context of mobility is given.