

Ein validiertes Testverfahren für Notbremssysteme - Ergebnisse des ASSESS-Projekts

Dr.-Ing. **Patrick Seiniger**, Dipl.-Phys. **Oliver Bartels**, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach

Dipl.-Ing. **Thomas Unselt**, Daimler AG, Stuttgart

Dipl.-Ing. **Carmen Rodarius**, Dipl.-Ing. **John Vissers**, TNO, Helmond (Niederlande)

Dipl.-Ing. **Andrés Aparicio**, Dipl.-Ing. **Sébastien Baurès**, Applus IDIADA Group, Santa Oliva (Spanien)

Zusammenfassung

Im Rahmen des im 7. Forschungsrahmenprogramm der Europäischen Kommission geförderten Projekts „ASSESS“ wurde ein modulares Bewertungssystem für Systeme der aktiven Sicherheit erstellt und anhand von serienmäßigen Notbremssystemen getestet.

Im Fahrversuch wurden Warnzeitpunkt, Bremszeitpunkt und Geschwindigkeitsreduktion serienmäßiger Fahrzeuge bestimmt. Dabei kamen zwei verschiedene Zielobjekte und vier verschiedene Ansätze zur Bewegung des Zielobjekts zum Einsatz.

Die von den verschiedenen Testinstituten bestimmten Ergebnisse und die Streuungen der einzelnen Messungen sind vergleichbar – für eines der beiden Testfahrzeuge liegen die Streuungen, insbesondere bei Kennwerten für Warn- und Bremszeitpunkt, im Bereich von 2% des jeweiligen Mittelwertes. Die Streuungen der Geschwindigkeitsreduktion liegen höher, sind aber ebenfalls vergleichbar. Geringe Unterschiede zwischen zwei Gruppen von Testinstituten lassen sich durch Eigenschaften des verwendeten Zielobjekts beziehungsweise Eigenschaften des verwendeten Testfahrzeugs (RADAR-Kalibrierung) erklären.

Zusätzlich bestimmte Warnzeitpunkte eines der beiden Fahrzeuge bei Auffahrt auf einen realen Pkw liegen gut im Bereich der mit synthetischen Zielobjekten gemessenen Zeiten.

Aus diesen Erkenntnissen wird abgeleitet, dass das Testverfahren grundsätzlich geeignet ist, reproduzierbar und wiederholbar die Bremsleistung eines mit Notbremsfunktion ausgerüsteten Fahrzeugs zu messen.

Erreichte Wiederholgenauigkeiten von ± 1 km/h für die jeweiligen Geschwindigkeiten und ± 30 cm für den seitlichen Abstand haben sich als ausreichend erwiesen.

Die in Feld- und Simulatorversuch ermittelte Fahrerreaktion, die durch einen relativ geringen Bremspedalkraftgradienten gekennzeichnet ist, hat sich als simulierte Fahrerreaktion so nicht bewährt. Wesentlicher Grund dafür ist die Regelgüte und die erforderliche Abstimmungsarbeit herkömmlicher Bremspedalaktorik. Das Konsortium ist sich aber einig darin, dass eine simulierte Fahrerreaktion erforderlich ist, um die Sicherheitswirkung eines Notbremssystems umfassend zu bewerten. Ansätze hierfür könnten die in anderen Konsortien entwickelten Fahrerreaktionen sein.

Detailliertere Ergebnisse des ASSESS-Projekts finden sich auf der Website www.assess-project.eu.

1 Einführung

Autonom agierende Systeme der aktiven Sicherheit bieten das Potential, die Unfallzahlen von Pkw sowie die Schwere der noch unvermeidbaren Unfälle deutlich zu senken. Für Unfälle im Längsverkehr sind bereits seit Mitte des letzten Jahrzehnts Bremssysteme auf dem Markt, die Daten von Umfeldsensoren nutzen, um den Fahrer zu warnen und bei Gefahrenbremsungen zu unterstützen. Stand der Technik sind mittlerweile im geringen Geschwindigkeitsbereich völlig autonom agierende und unfallvermeidende Bremssysteme - auch in unteren Fahrzeugklassen. Bei höheren Geschwindigkeiten erreichen es aktuelle Systeme, noch deutlich Geschwindigkeit abzubauen. Sofern der Fahrer rechtzeitig – auch schwach – reagiert, können warnende und im Gefahrenfall unterstützende Systeme bis hin zu hohen Geschwindigkeiten Unfälle vermeiden. Beispiele für aktuelle Systeme sind Mercedes Pre-Safe Brake [1], Lexus und Toyota Pre Crash Safety [2], Volvo City Safety [3].

Diese Systeme werden allerdings für eine Bewertung der Fahrzeugsicherheit im Sinne von Ratings – beispielsweise im Rahmen des Verbraucherschutzes durch Euro NCAP – bisher nicht herangezogen. Dafür wäre ein universelles (beispielsweise von der Sensorkonfiguration unabhängiges) Testverfahren für diese Systeme notwendig, das es bisher so standardisiert noch nicht gibt.

Derzeit beschäftigen sich vier Initiativen und Forschungsprojekte (vFSS [4], AEB [5], ADAC [6], ASSESS [7]) unter dem Dach von Euro NCAP damit, ein Testverfahren für Notbremssysteme abzustimmen, eine Umsetzung ist für Fahrzeugtests ab 2014 geplant.

Allen vorgeschlagenen Testverfahren dieser vier Initiativen ist gemein, dass sie Tests mit Gesamtfahrzeugen durchführen, die physikalisch mit einem Zielobjekt kollidieren (können). Unterschiede finden sich im Wesentlichen in der Bewertung und Durchführung der Tests, im Zielobjekt und in der Art, das Zielobjekt zu bewegen.

Dieses Paper vergleicht die Ergebnisse zweier exemplarischer Fahrzeuge, die mit verschiedenen Zielobjekten und verschiedensten Bewegungssystemen ermittelt wurden, um daraus dann Anforderungen an Testverfahren (insbesondere an die Wiederholgenauigkeit) abzuleiten.

Immer mehr in den Fokus gerät der Schutz von Fußgängern durch aktive Fahrzeugsicherheit. Fußgängerschutz ist nicht Teil der hier vorgestellten Arbeiten. Hierzu sei auf das gerade angelaufene Forschungsprojekt ASPECSS (www.aspecss-project.eu) verwiesen.

1.1 Das Forschungsprojekt ASSESS

Ziel des von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsprojektes ASSESS („Assessment of Integrated Vehicle Safety Systems for Improved Vehicle Safety“) ist es, einen Baukasten an Bewertungsmethoden für Systeme der integralen Sicherheit (eingeschränkt auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen) zu entwickeln [7]. Dieser Baukasten enthält Testszenarien für das Bremsverhalten von vorausschauenden Bremssystemen, berücksichtigt darüber hinaus aber auch die erwarteten Fahrerreaktionen nach einem Warnsignal, die Einflüsse von bremsbedingten Insassenbewegungen bei der Kollision und bündelt die Testergebnisse der einzelnen Module in eine Gesamtnutzenbewertung ein.

Inhalt des Projekts ist insbesondere ein exemplarischer Test der entwickelten Module mit einigen von den Projektpartnern zur Verfügung gestellten Fahrzeugen.

An diesem Forschungsprojekt sind 15 Partner aus 8 Ländern beteiligt, darunter drei Euro NCAP-Testinstitute (BAST, IDIADA, TNO) und drei Fahrzeughersteller (Daimler, PSA, Toyota).

Zu Beginn wurden im Arbeitspaket 1 relevante Unfallszenarien identifiziert und aus diesen in Zusammenarbeit mit Arbeitspaket 4 geeignete Testszenarien für die Wirkung aktiver Sicherheitssysteme abgeleitet. Arbeitspaket 2 definierte ein Bewertungsverfahren, das den Gesamtnutzen der getesteten Systeme vergleichbar macht. In Arbeitspaket 3 wurde ein Konzept zur Bestimmung von üblichen Fahrerreaktionen in kritischen Fahrsituationen unter Nutzung von Fahrversuch und Fahrsimulation erarbeitet und exemplarisch getestet. Arbeitspaket 4 beinhaltet die eigentlichen Tests von aktiven Sicherheitssystemen im Fahrversuch. Den Einfluss von Bremsvorgängen auf den eigentlichen Unfall, beispielsweise durch Insassenvorverlagerung, verringerte Kollisionsgeschwindigkeiten untersucht Arbeitspaket 5 anhand von Simulationen, Schlittentests und ausgewählten Full-Scale-Crashversuchen.

Projektabschluss ist Ende 2012. Die Ergebnisse von Arbeitspaket 4 – Test von aktiven Sicherheitssystemen in der Pre-Crash-Phase – liegen aber bereits vor und sind Gegenstand dieser Veröffentlichung.

1.2 Betrachtete Szenarien

Basierend auf den dem Konsortium zur Verfügung stehenden Unfalldaten (unter anderem GIDAS, STATS-19, nationale Daten aus verschiedenen Ländern) wurden vier Gruppen von Unfallszenarien identifiziert und parametrisiert:

- Auffahrunfälle im Längsverkehr
- Kreuzungsunfälle mit dem Querverkehr
- Kollisionen mit dem Gegenverkehr
- Einscherunfälle im Längs- und Gegenverkehr

Aus diesen Unfallgruppen wurde für die praktische Überprüfung der Szenarien die Gruppe der Auffahrunfälle im Längsverkehr ausgewählt – für die Unfallgruppen Kreuzungsunfälle, Unfälle im Gegenverkehr, Ausscheren in den Gegenverkehr sind bisher keine Systeme der aktiven Sicherheit am Markt vertreten, und es konnte kein deutlicher Einfluss von Einscherunfällen im Längsverkehr auf das Unfallgeschehen nachgewiesen werden. Eine detaillierte Beschreibung der Testszenarien und ihrer Herleitung findet sich in [8], [9], [10], [11].

Als letztendlich testbare Szenarien der Gruppe „Auffahrunfälle im Gegenverkehr“ wurden folgende Konstellationen abgeleitet:

- Zielfahrzeug und Egofahrzeug fahren konstant (Ego 50 km/h und Ziel 10 km/h)
- Zielfahrzeug steht, Egofahrzeug fährt konstant (Ego 50 km/h; 80 km/h)
- Zielfahrzeug verzögert aus einer Folgefahrt heraus (beide 50 km/h, 14 m Abstand, Verzögerung dann 4 m/s² und 7 m/s²) – für dieses Testszenario liegen für eine statistische Auswertung nicht ausreichend Daten vor. Es wird daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die Fahrten wurden in der Regel mit 100 % Überdeckung durchgeführt, ausgewählte Fahrten auch mit 50% Überdeckung.

Szenarien, bei denen das Egofahrzeug 80 bzw. 100 km/h auf ein stehendes beziehungsweise mit 20 km/h bewegtes Zielobjekt auffährt, konnten nur eingeschränkt durchgeführt werden. Da nicht ausreichend Daten für eine statistische Auswertung vorhanden sind, werden diese Szenarien hier ebenfalls nicht weiter betrachtet.

2 Methodik

Ziel der hier beschriebenen Arbeiten ist es, ein Testverfahren für Notbremssysteme zu definieren, in verschiedenen Testinstituten zu implementieren und zu validieren.

Grundsätzlich sind zunächst Anforderungen an ein Testverfahren mit entsprechenden Validierungskriterien erforderlich. Aus diesen Anforderungen werden dann die Spezifikationen für Zielobjekt, Bewegungssystem und Prozedur abgeleitet.

Die Bewertung der Testergebnisse ist nicht Teil dieser Arbeit.

2.1 Anforderungen an ein Testverfahren

Ein Testverfahren verfolgt das höhere Ziel, die Verkehrssicherheit zu erhöhen. Es muss daher Ergebnisse liefern, die auch dem Verhalten eines Fahrzeugs in der Realität entsprechen, und die Tests müssen das Unfallgeschehen widerspiegeln. Alle für das Unfallgeschehen relevanten Aspekte sollten adressiert werden (z.B. autonome Bremsung, Warnung).

Das hier dargestellte Testverfahren soll sowohl für Verbraucherschutztests (beispielsweise Euro NCAP) als auch für fahrzeugtechnische Vorschriften (zum Beispiel UN ECE) geeignet sein. Wesentliches Ziel ist daher, die Ergebnisse objektiv, reproduzierbar und wiederholbar ermitteln zu können.

Darüber hinaus gibt es (speziell für Euro NCAP-Tests) Randbedingungen. Beispielsweise ist es erforderlich, die Testzeit und Testkosten in gewissen Grenzen zu halten. Alle bei Euro NCAP vertretenen Testinstitute sollten in der Lage sein, das Testverfahren mit vertretbarem Aufwand zu implementieren. Auch muss es möglich sein, das Fahrzeugverhalten ohne Zugriff auf fahrzeuginterne Messgrößen oder Spezifikationen des Herstellers zu testen, und nicht zuletzt sollten die Tests für potenzielle Fahrzeugkäufer leicht verständlich aufbereitet werden können.

2.2 Berücksichtigung des Fahrerverhaltens

Um auch das Fahrerverhalten bei einer Notbremsung zu berücksichtigen, wurde im Rahmen von ASSESS ein Konzept zur Bestimmung von Reaktionszeit und Fahrerwarnung erarbeitet [12]. Exemplarisch wurden Reaktionszeiten und Arten der Bremspedalbetätigung gemessen.

Neben einem Feldversuch fanden Simulatorstudien in den Fahrsimulatoren von Toyota und Daimler statt. Obwohl die Methodik vergleichbar war, wurden unterschiedliche Ergebnisse ermittelt. Dies lässt vermuten, dass es schwierig ist, robuste Reaktionszeiten und Pedalbetätigungsprofile für eine Vielzahl an Szenarien und verschiedene Fahrerablenkungen zu ermitteln.

Auf Basis der Toyota-Studie wurde ein konstanter Bremspedalkraftgradient von 300 N/s bis zu einer maximalen Bremspedalkraft von 360 N definiert und eine Fahrerreaktionszeit auf optische und akustische Warnung von 1,2 Sekunden abgeleitet. Die Übertragbarkeit auf andere Fahrzeuge kann aus den Ergebnissen nicht sichergestellt werden. Der Wert der Reaktionszeit deckt sich aber mit in der Literatur bekannten Werten [13].

2.3 Geeignete Warn- und Bremszeitpunkte

Die Mechanik des Bremsvorgangs – insbesondere im Hinblick auf Notbremssysteme – ist von Winner [14] ausführlich hergeleitet und dargelegt. Sie soll an dieser Stelle zunächst kurz zusammengefasst werden:

Eine übliche Messgröße zum Beurteilen der Gefahrensituation ist die Zeit, die unter Annahme einer gleichförmigen Bewegung von Zielfahrzeug und Egofahrzeug (beide auf derselben Trajektorie) bis zur Kollision verbleiben würde:

$$TTC = \frac{\Delta x}{\Delta v} \quad (1)$$

Eine konstante Bewegung der beiden Fahrzeuge kann für alle definierten Testszenarien (außer dem Szenario „Bremsendes Zielfahrzeug“) bis zum ersten Bremseingriff vorausgesetzt werden.

Ab dem Einsetzen einer Bremsung kann dann nicht mehr mit simplen TTC-Berechnungen gearbeitet werden, da sich durch die Bremsverzögerung nicht nur die Geschwindigkeiten ändern, sondern auch die zur Verfügung stehende Zeit kontinuierlich vergrößert. Die TTC, die zum vollständigen Abbau der Relativgeschwindigkeit zur Verfügung stehen muss, ohne dass es zu einer Kollision kommt, ist

$$TTC_{Abbau} = \frac{\Delta v_0}{2 \cdot |a|} \quad (2)$$

Reicht die noch verfügbare TTC nicht aus, gilt folgende Gleichung:

$$\Delta v_{Rest} = \sqrt{\Delta v_0^2 - 2 \cdot |a| \cdot TTC_{Verfügbar} \cdot \Delta v_0} \quad (3)$$

Ein Unfall ist aber auch dann vermieden, wenn es gelingt, den seitlichen Versatz zwischen beiden Fahrzeugen so zu vergrößern, dass keine Überlappung mehr besteht (und dafür ausreichend Platz zur Verfügung steht). Vereinfacht ist die Querbewegung beschrieben durch

$$\Delta y = \iint \ddot{y} dt^2 + y_0 \quad (4)$$

Für eine maximale Querbewegung von g bei einem Querreibwert von 1 ergibt sich die zum Ausweichen mindestens erforderliche Zeit zu

$$t = \sqrt{\frac{2(y_{erforderlich} - y_0)}{g}} \quad (5)$$

Für eine Ausgangssituation mit voller Überdeckung der beiden Fahrzeuge und einer Fahrzeugbreite von 2 m ist die minimale Ausweichzeit etwa 0,6 Sekunden. Für den Fall einer 50%-igen Überdeckung ist die minimale Ausweichzeit immer noch 0,45 Sekunden. Auf beide Werte muss noch die Ansprechzeit der Reifen von etwa 0,1 Sekunde addiert werden.

Diese Zeiten werden von gewöhnlichen Fahrern in der Regel nicht erreicht. Winner [14] gibt Werte von 1 bis 1,6 Sekunden für übliche Ausweichzeiten an.

Geeignete Warnzeitpunkte sollten so gelegt sein, dass der Fahrer bei Befolgen einer Warnung den Unfall noch vermeiden kann, dass die Warnung aber auch nicht zu früh

ausgelöst wird. Zu beachten ist, dass (bereits relativ seltene) Falschwarnungen das Vertrauen des Fahrers in ein Sicherheitssystem stark beeinträchtigen ([15], S. 7).

Eine Warnung sollte also ausgelöst werden, dass mit üblichen Reaktionszeiten und Vollverzögerung der Unfall vermieden werden kann – allerspätestens so, dass der Unfall mit üblicher Reaktionszeit von etwa 1 Sekunde und folgendem Ausweichmanöver vermieden wird.

Eine Warnung sollte aber dann nicht erfolgen, wenn der Unfall durch eine übliche Verzögerung (von beispielsweise 2 m/s^2) vermieden werden könnte – dann allerdings ohne Berücksichtigung der Reaktionszeit, weil ein geplantes Verhalten unterstellt werden würde.

2.3.1 Warnzeitpunkte

Mit diesen Grundüberlegungen lassen sich erwartete Warnzeitpunkte im Geschwindigkeits-TTC-Diagramm (Abbildung 1) eingrenzen.

Unterhalb der Geraden A wird ein Unfall durch eine Bremsverzögerung von 2 m/s^2 problemlos vermieden. In diesem Bereich sollte ein den Erwartungen entsprechendes Bremssystem daher nicht warnen, um den Fahrer nicht in seinem geplanten Verhalten zu stören.

Unterhalb der Geraden B ist ein Unfall nur noch durch Vollverzögerung (10 m/s^2) vermeidbar. Wird die Vollverzögerung als Reaktion auf eine Warnung eingeleitet, ist der Unfall vermeidbar, wenn die Warnung unterhalb der Gerade B' erfolgt - dann ist auch nach einer Reaktionszeit von ca. 1 Sekunde Vermeidung durch Vollverzögerung möglich.

Ein Unfall ist durch Ausweichen physikalisch nur rechts der Geraden C (für volle Überdeckung) beziehungsweise D (für halbe Überdeckung) vermeidbar. Sofern dieses Ausweichen nach einer Warnung geschieht, muss die Warnung rechts der Geraden C' beziehungsweise D' erfolgt sein, um noch ausreichend Reaktionszeit zuzulassen. Praktisch ist allerdings nicht zu erwarten, dass diese physikalischen Grenzen von realen Fahrern noch erreicht werden [14].

Ein geeigneter Bereich für eine Warnung (grün unterlegt in Abbildung 1) liegt daher innerhalb des durch die Geraden A und B' begrenzten Bereichs (beziehungsweise im Bereich innerhalb der Geraden A – B' – C', sofern Ausweichen betrachtet wird).

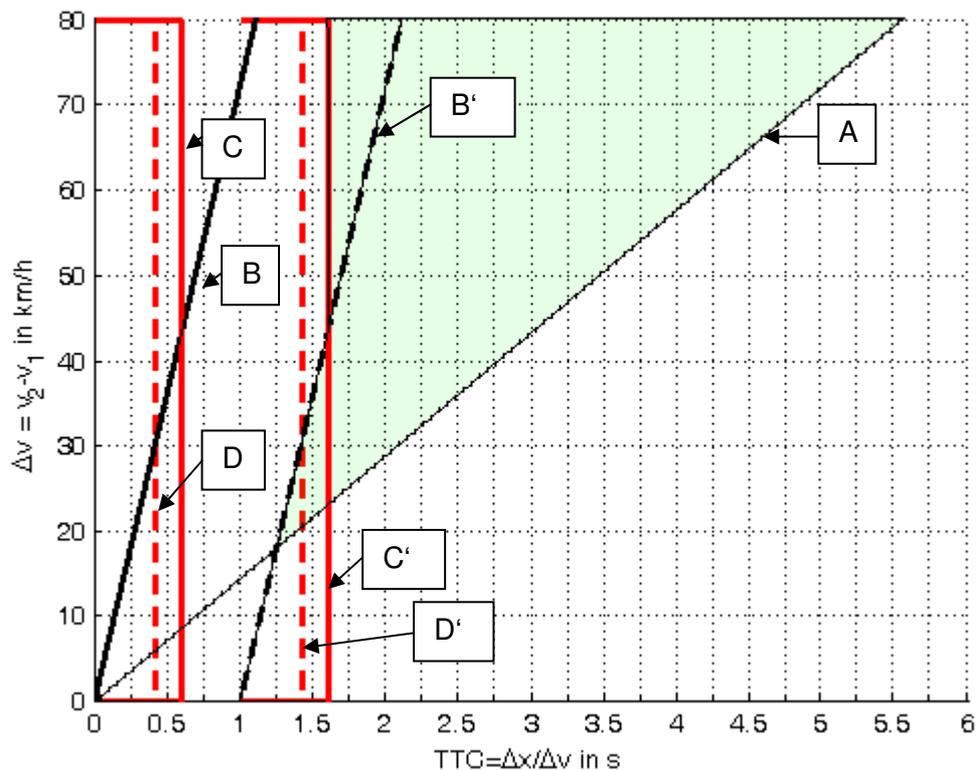


Abbildung 1: Zielbereich erwarteter Warnungen (nach [14], S. 538f. Wesentliche Geraden: A – Unfallvermeidung mit 2 m/s² Verzögerung, B, Unfallvermeidung mit 10 m/s² Verzögerung, C – Unfallvermeidung durch Ausweichen mit 100% Überdeckung, D – Unfallvermeidung durch Ausweichen mit 50% Überdeckung.

Dieser Bereich ist als konservative, eher zu große Schätzung zu betrachten – bei real ausgeführten Systemen wird dieser Warnbereich sicherlich deutlich kleiner sein. Insbesondere werden bei realen Systemen weitere Kriterien wie beispielsweise die Sicherheit der Detektion einfließen.

Zu beachten ist, dass unterhalb einer Relativgeschwindigkeit von etwa 20 km/h eine Warnung schwierig darstellbar ist – die Reaktionszeit ist dann deutlich größer als die Zeit, die übliche Fahrer für eine Bremsung benötigen. Speziell für diese Situation ausgelegte Bremssysteme verzichten daher meist auf eine Warnung [3].

Da die Zeitpunkte für letztmögliches Ausweichen bei halber und voller Überdeckung eng beieinanderliegen, ist nicht davon auszugehen, dass ein seitlicher Abstand bis etwa zur halben Fahrzeugbreite eine wesentliche Auswirkung auf die Systemreaktion hat.

2.3.2 Bremszeitpunkte

Der geeignete Zeitpunkt für eine autonome Bremsung lässt sich prinzipiell auch anhand von Abbildung 1 herleiten. Die Anforderung, den Unfall autonom zu vermeiden, wird aber möglicherweise durch rechtliche Randbedingungen (Wiener Weltabkommen, Produkthaftung) in Verbindung mit technischen Schwierigkeiten (Erkennungssicherheit) eingeschränkt werden. Beispielsweise ist bekannt, dass Systeme erst dann eine Vollverzögerung einleiten, wenn der Unfall sonst nicht vermeidbar ist – auch nicht durch Ausweichen [16].

Auf die Herleitung von Anforderungen an Bremszeitpunkte wird daher verzichtet.

2.4 Ableitung von Kennwerten

In den Fahrversuchen werden Verläufe der Geschwindigkeit und Beschleunigung von Egofahrzeug und Zielfahrzeug gemessen. Für die Bewertung einzelner Fahrzeuge und auch die statistische Betrachtung von Reproduzierbarkeit und Wiederholgenauigkeit sind allerdings diskrete Kennwerte je Versuch erforderlich:

- Das Warnverhalten des Egofahrzeugs wird repräsentiert durch den TTC-Wert zum Zeitpunkt der ersten Warnung TTC_{Warn} .
- Der Beginn einer Bremsung wird über den ersten Zeitpunkt TTC_{Brems} festgemacht, zu dem die Verzögerung des Ego-Fahrzeugs die Schwelle $0,1 \text{ m/s}^2$ überschreitet.
- Die Geschwindigkeitsreduktion v_{red} wird über die Differenz zwischen der Geschwindigkeit des Ego-Fahrzeugs zum Zeitpunkt einer TTC von 3 Sekunden und der Geschwindigkeit beim Versuchsende (Kollision mit Zielfahrzeug oder Stillstand des Egofahrzeugs) ausgedrückt.

Anhand dieser Kennwerte kann die Gesamtmenge von über 300 Versuchen statistisch analysiert werden, um eine Aussage über die Validität zu erhalten.

2.5 Validierungskriterien

2.5.1 Realitätsnähe des Testverfahrens

Ein autonomer Brems eingriff ist dann zu erwarten, wenn das Bremssystem mit vergleichsweise hoher Sicherheit eine ansonsten unvermeidbare Kollision detektiert. Schon aus Gründen der Produktsicherheit und Produkthaftung [17] wird die Schwelle hierfür sicherlich sehr hoch liegen.

Eine Warnung an den Fahrer wird sicherlich eine geringere Sicherheitsschwelle bezüglich der Detektion einer drohenden Kollision erfordern. Aber schon aus Gründen der Produktakzeptanz und aufgrund möglicher Ignoranz bei zu häufigen Warnungen hat der Fahrzeughersteller ein Interesse daran, die Zahl der Falschwarnungen möglichst klein zu halten.

Gelingt es, nachzuweisen, dass die Warnzeitpunkte bei Auffahrt auf ein reales Fahrzeug vergleichbar sind mit den Warnzeitpunkten im Fahrversuch, könnte das Testverfahren zumindest für die Fahrerwarnung als validiert angesehen werden. Als Vergleich mit der Realität sind Warnzeitpunkte bei Auffahrt auf ein reales Fahrzeug für eine zerstörungsfreie Messung zugänglich.

Über die Übertragbarkeit der Messungen von Bremszeitpunkten ist dann zunächst keine Aussage möglich – dafür wäre beispielsweise ein Vergleich von autonomen Brems eingriffen in Fahrversuch und Realität anhand von Crashversuchen mit aktiviertem System erforderlich. Diese Versuche sind aber im Rahmen von ASSESS nicht durchführbar.

Da für die Auslösung der Warnung eine – wenngleich vermutlich geringer als für eine Bremsauslösung – Sicherheit der Erkennung erforderlich ist, wird eine Übertragbarkeit der Validierung hinsichtlich Fahrerwarnung auf Bremszeitpunkte und Geschwindigkeitsreduktion unterstellt.

Daher wird das Testverfahren zunächst als bewährt angesehen, wenn die überwiegende Mehrzahl der gemessenen Warnzeitpunkte zur Unfallvermeidung ausreichend sind (sie also

im grün markierten Bereich von Abbildung 1 liegen), und wenn die Warnungen bei einem Fahrversuch auf ein reales Fahrzeug ebenfalls in diesem Bereich liegen.

2.5.2 Wiederholbarkeit

Gelingt es, zu zeigen, dass die Ergebnisse innerhalb eines Testinstituts (und mit denselben Testwerkzeugen, Bedienern etc.) nur eine geringe Streuung aufweisen und außerdem die Streuungen verschiedener Testinstitute vergleichbar sind, wird das Testverfahren im Hinblick auf die Wiederholbarkeit als validiert angesehen.

Eine klassische Messmittelanalyse ist nicht möglich, da der Erwartungswert nicht bekannt ist. Die Wiederholbarkeit wird daher zunächst als ausreichend betrachtet, wenn die Standardabweichung deutlich kleiner als 10% des Erwartungswertes ist.

Eine tiefere Analyse wird von Projektpartnern in ASSESS bis Projektende erstellt werden.

2.5.3 Reproduzierbarkeit

Im Rahmen von ASSESS wurde das definierte Testverfahren in drei verschiedenen Testinstituten mit deutlich unterschiedlichen Werkzeugen implementiert. Gelingt es, zu zeigen, dass die Ergebnisse (Warnzeitpunkte, Bremszeitpunkte, Geschwindigkeitsreduktion) zwischen den drei Testinstituten vergleichbar sind, ist die Reproduzierbarkeit gegeben und das Testverfahren ist im Hinblick auf dieses Kriterium validiert.

3 Werkzeuge

3.1 Mess- und Regelungstechnik

Die Testfahrzeuge wurden für die Fahrversuche ausgestattet mit Messtechnik zum exakten Bestimmen von Position und Geschwindigkeit. Dies waren DGPS-gestützte Inertialplattformen (BAST, IDIADA) beziehungsweise hochgenaue Positionsgeber (TNO). Sofern erforderlich, erfolgte die Synchronisierung durch Nutzung des GPS-Zeitsignals.

Zur Detektion des (akustischen) Warnzeitpunktes kamen analoge Schaltungen basierend auf dem Tone-Decoder-Chip NE 567 [18] beziehungsweise computergestützte Frequenzdetektoren zum Einsatz. Eine Aufnahme des Warnzeitpunktes allein über die Messung des Schallpegels im Fahrzeuginnenraum erwies sich als zu fehleranfällig.

Die Kollision zwischen Ego- und Zielfahrzeug wurde ermittelt durch Berührungssensoren beziehungsweise direkte Positionsbestimmung (TNO). Zur Messung des Zeitpunktes der reversiblen Gurtstraffung wurden Messsicherungen im Stromkreis der Gurtstraffer (BAST, TNO) beziehungsweise Beschleunigungssensoren am Gurt (IDIADA) genutzt.

Die Fahrerreaktion (1,2 Sekunden nach der Fahrerwarnung) wurde in allen Testinstituten durch Bremspedalaktoren (sowohl kommerziell als auch im Eigenbau) aufgebracht.

3.2 Zielobjekte

3.2.1 ASSESSOR

Das Zielobjekt ASSESSOR wurde im Rahmen des ASSESS-Projekts basierend auf dem in [19] beschriebenen Zielobjekt entwickelt. Es verfügt über einen innenliegenden RADAR-Reflektor aus metallischer Folie und ist in seiner RADAR-Rückstrahlcharakteristik repräsentativ für ein typisches Fahrzeug der Kompaktklasse [8].



Abbildung 2: ASSESSOR Zielobjekt (links: nur Heckteil, rechts: vollständig) – ergänzend zur hier dargestellten Version können Rückleuchten, Reflektoren etc. montiert werden.

Das Zielobjekt ist – abhängig von der Masse des eingesetzten Bewegungssystems – bis zu 80 km/h kollidierbar, ohne nennenswerten Schaden am Egofahrzeug hervorzurufen.

3.2.2 ADAC-Zielobjekt

Das ADAC-Zielobjekt ist auf gute Erkennbarkeit optimiert. Es ist kommerziell verfügbar. In Kombination mit dem ADAC Bewegungssystem ist es bis zu einer Relativgeschwindigkeit von 40 km/h ohne Schäden am Egofahrzeug kollidierbar.



Abbildung 3: Zielobjekt "ADAC-Target" mit ADAC-Bewegungssystem (dargestellt ist Version 2, Version 3 unterscheidet sich im Wesentlichen durch eine geänderte und neutrale Bedruckung, Bildquelle: ADAC)

3.2.3 Pkw (Vergleichsziel)

Als Vergleichszielobjekt kam ein VW Passat Variant Baujahr 2011 zum Einsatz. Der Versuch wurde in jedem Fall nach Ertönen des akustischen Warnsignals durch Ausweichen abgebrochen.



Abbildung 4: Heckansicht des als Vergleichsziel genutzten VW Passat 2011

3.3 Bewegung des Zielobjekts

3.3.1 Ferngesteuertes Kartsystem (BAST)

Als Bewegungssystem der BAST kommt das Kart „MARVIN“ (Motorized Autonomous Research Vehicle for Innovations) zum Einsatz. Es wurde vollständig selbst entwickelt.

Die Höchstgeschwindigkeit liegt über 80 km/h. Maximale Bremsverzögerung ist 7 m/s². Die Gesamtmasse einschließlich des ASSESSORs beträgt 250 kg. Die Geschwindigkeit des Karts wird durch einen Regler exakt gehalten; gebremst und gelenkt wird es aus Sicherheitsgründen mittels einer handelsüblichen Fernsteuerung von einem Operator aus dem Folgefahzeug heraus.

Im Versuchsbetrieb wurde es bis zu 50 km/h Relativgeschwindigkeit ohne nennenswerte Schäden am Egofahrzeug kollidiert. Eine detaillierte Beschreibung des Systems findet sich in [20] und [21].



Abbildung 5: BAST MARVIN Kart im Versuchsbetrieb

Bei den Versuchen der BAST kommt in der Regel nur das Heckteil des ASSESSORs zum Einsatz – die vollständige Nutzung ist aber prinzipiell möglich.

Die dieser Auswertung zugrunde liegenden Versuche wurden auf dem Testgelände der RWTH Aachen bei Aldenhoven, auf dem Gelände der BAST sowie auf dem Fliegerhorst Kaufbeuren gefahren.

Die Fahrgeschwindigkeit des Karts lässt sich besser als 0,5 km/h genau vorgeben. Ein seitlicher Versatz von etwa ± 30 cm konnte im Rahmen der Versuche eingehalten werden.

3.3.2 Auslegerfahrzeug (IDIADA)

Das spanische Testinstitut IDIADA nutzt die bewährte Technologie des Auslegerfahrzeugs – ein Pkw trägt das Zielobjekt an einem Kran, siehe Abbildung 6. IDIADA setzt den vollständigen ASSESSOR ein. Dieser ist an einem kleinen Wagen montiert, der zunächst durch einen Elektromagneten am Kran aufgehängt ist. Bei einer Kollision wird der Elektromagnet gelöst, der Wagen fällt eine kurze Distanz zur Fahrbahn und rollt dann auf eigenen Rollen aus.

Um die Bremssysteme der zu testenden Fahrzeuge nicht zu stören ist das Heck des Auslegerfahrzeugs im Versuchsbetrieb abgeschirmt. Sowohl in Ego- als auch in Auslegerfahrzeug wird ein vollständiger Satz Fahrroboter genutzt, um die Trajektorien beider Fahrzeuge zu regeln und damit die Versuchsparameter weitestgehend konstant zu halten.

Die Fahrgeschwindigkeit des Auslegerfahrzeugs lässt sich sehr genau vorgeben. Ein seitlicher Versatz von wenigen Zentimetern ist erreichbar. Prinzipieller Nachteil ist das Vorhandensein eines zweiten Fahrzeugs, das die Detektion des Ziels stören könnte – insbesondere bei nicht vollständig erreichter RADAR-Abschirmung und bei Einsatz von optischer Sensorik im Bremssystem des Ego-Fahrzeugs.



Abbildung 6: Bewegungssystem von IDIADA

3.3.3 VeHIL Rollenprüfstand (TNO)

Das Testsystem VeHIL (**Vehicle Hardware in the Loop**) besteht aus einem Rollenprüfstand, auf dem das Ego-Fahrzeug befestigt wird sowie einem Trägersystem (Schlitten oder Roboterfahrzeuge) das entsprechend der Testanforderungen verschiedene Testobjekte aufnehmen kann. Der Rollenprüfstand wird dabei so eingestellt, dass das Bremsverhalten des jeweiligen Egofahrzeugs auf selbigen mit dem auf einer gewöhnlichen Straße übereinstimmt. Das System ist in einer Halle mit Innenmaßen 200m x 40m aufgebaut. Die Steuerung von Zielobjekten und Rollenprüfstand wird von einem zentralen Simulationsmodul übernommen. Etwaige, durch das Egofahrzeug durchgeführte Bremsungen beeinflussen damit auch die Zielobjekte in ihrem Bewegungsverhalten.

Das Zielobjekt führt nur Relativbewegungen zum Egofahrzeug aus. Im Rahmen von ASSESS kam ein eigens neu entwickeltes verbessertes Bewegungssystem genannt PCTS (Pre-Crash Test System) für das Zielobjekt zum Einsatz, das Kollisionen zwischen Zielobjekt und Egofahrzeug bis hin zu 80 km/h zulässt. Einen Überblick über das für Pre-Crash Versuche angepasste Testkonzept gibt Abbildung 7.

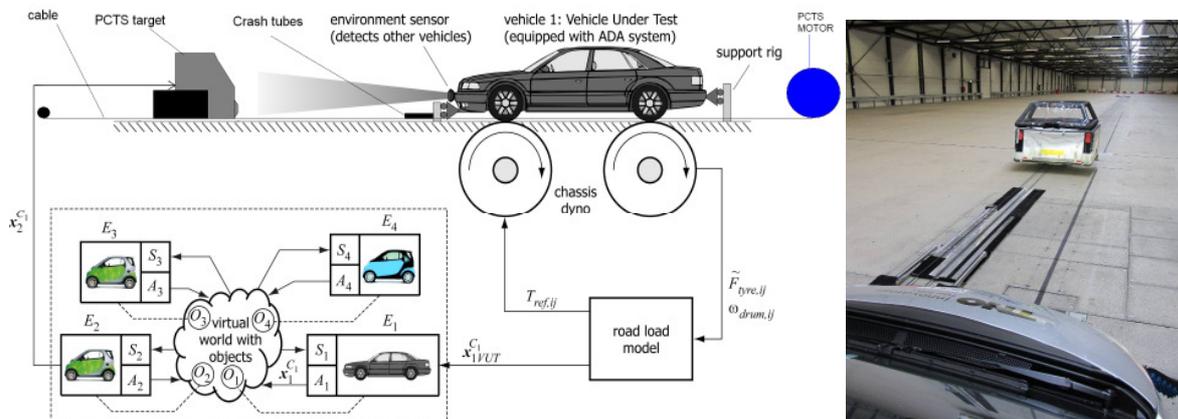


Abbildung 7: Konzept des VeHIL-Prüfstands mit PCTS sowie Versuchsaufstellung mit ASSESSOR-Heck und 50% Überdeckung

Prinzipielle Vorteile dieses Messsystems sind die hohe Wiederholgenauigkeit durch das spurgeführte Bewegungssystem, die Unempfindlichkeit gegen Wettereinflüsse sowie die Nutzung von Relativbewegungen – dadurch ist eine sichere Durchführung auch von Tests bei hohen Fahrgeschwindigkeiten beider Fahrzeuge möglich.

Prinzipieller Nachteil ist die Nichtverfügbarkeit von GPS-Messungen. Für die in ASSESS getesteten Fahrzeuge spielten diese Einflüsse hinsichtlich der ausgewerteten Daten keine Rolle.

3.3.4 Anhänger als Target-Träger (ADAC)

Das Bewegungssystem des ADAC besteht aus einer als Fahrzeuganhänger ausgeführten Schiene, auf der ein Schlitten läuft, der das eigentliche Zielobjekt trägt (Abbildung 8). Vor der eigentlichen Kollision ist der Schlitten am hinteren Ende des Anhängers über Magnete befestigt. Ein kollidierendes Ego-Fahrzeug beschleunigt den Schlitten aus seiner Ruheposition nach vorne und löst dabei die Magnetkupplung. Der Schlitten bewegt sich frei entlang der Schiene und trifft am vorderen Ende (Richtung Zugfahrzeug) auf einen Anpralldämpfer.

Für die dynamischen ASSESS-Versuche kam ein mit der in Abschnitt 3.1 beschriebenen Messtechnik ausgerüstetes Zugfahrzeug zum Einsatz. Statische Versuche wurden stets ohne Zugfahrzeug (mit frei stehendem Anhänger) durchgeführt.



Abbildung 8: ADAC Bewegungssystem für ADAC-Zielobjekt (Bildquelle: ADAC)

Die Fahrgeschwindigkeit des Zugfahrzeugs lässt sich durch geübte Fahrer im Bereich um 1 km/h genau vorgeben. Ein seitlicher Versatz von etwa ± 30 cm ist erreichbar.

3.4 Versuchsfahrzeuge

Für die exemplarischen Tests kamen verschiedene Ego-Fahrzeuge zum Einsatz. Die beiden Fahrzeuge, die in allen beteiligten Testinstituten getestet wurden, nutzen nur Radarsensoren in verschiedenen Konfigurationen. Eine detaillierte Beschreibung der Systemeigenschaften findet sich in Tabelle 1.

Tabelle 1: Eigenschaften der getesteten Versuchsfahrzeuge

	Fahrzeug A	Fahrzeug B
System	Radarbasiertes System. Autonome Bremsung, wenn die Kollision unvermeidbar wird, Bremsassistent mit Anpassung der Schwellen in Abhängigkeit von einem erkannten Zielobjekt	
Warnung	Optische und akustische Warnung bei etwa TTC=2,6 s	Optische und akustische Warnung bei TTC zwischen 2 und 3 s
Autonome Aktionen	Sofern nach einer Warnung keine Reaktion des Fahrers erfolgt, zweistufige autonome Bremsung bei TTC = 1,6 s (Teilbremsung), TTC = 0,6 s (Vollbremsung)	Sofern nach einer Warnung keine Reaktion des Fahrers erfolgt, einstufige autonome Bremsung. Verzögerungen und Schwellwerte unveröffentlicht.
Reversible Gurtstraffer	Ja: straffen der Gurte bei drohender Kollision	
Sensorik	Nahbereichsradar (0,2m bis 30m), Mittelbereichsradar (bis 60 m), Fernbereichsradar (bis 200 m), Kamera (bis 500 m)	Fernbereichsradar (Reichweite > 150 m)

Einen Überblick über die getesteten Kombinationen aus Ego-Fahrzeug, Bewegungssystem und Zielobjekt gibt Tabelle 2.

Tabelle 2: Getestete Konfigurationen

Nr.	Zielobjekt	Bewegungssystem	Fahrzeug	Bremseingriff
1	ASSESSOR	Kart MARVIN (nicht für unbewegtes Ziel)	A	Ja / Nein
2	ASSESSOR	Kart MARVIN (nicht für unbewegtes Ziel)	B	Ja / Nein
3	ASSESSOR	VeHIL	A	Ja / Nein
4	ASSESSOR	VeHIL	B	Ja / Nein
5	ASSESSOR	Auslegerfahrzeug	A	Ja / Nein
6	ASSESSOR	Auslegerfahrzeug	B	Ja / Nein
7	ADAC	Anhänger	A	Nein
8	VW Passat 2011	-	A	Nein

4 Ergebnisse

4.1 Gesamtergebnisse

Eine Beispielmessung und die Ableitung des Kennwerts v_{Red} anhand dieser Messung ist in Abbildung 9 dargestellt.

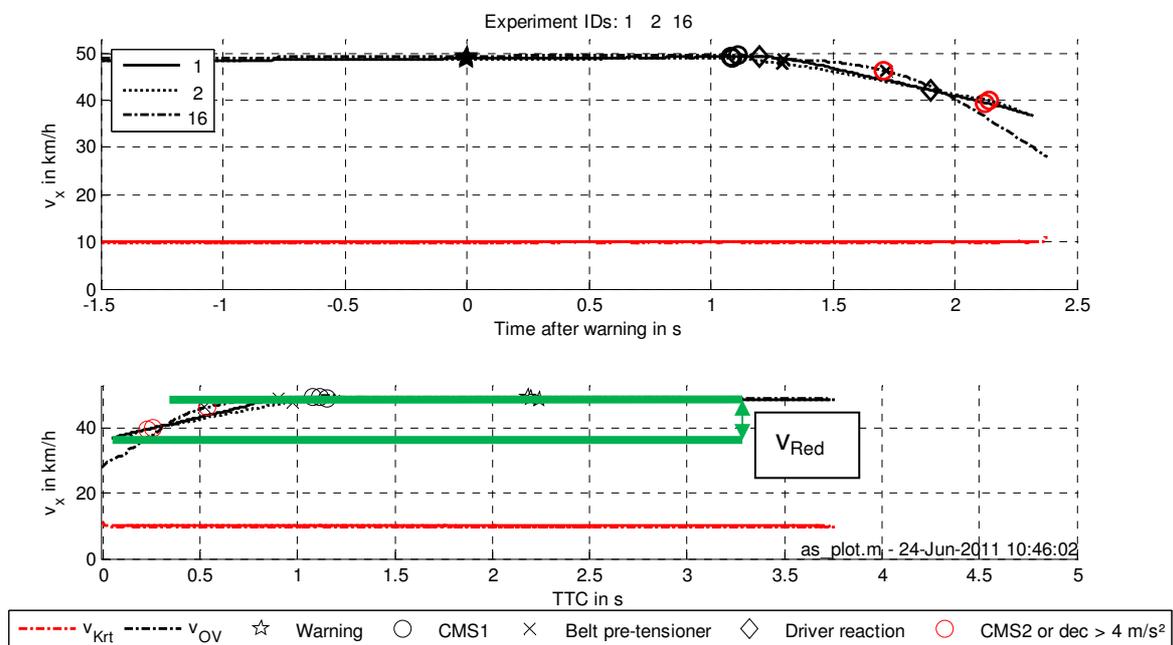


Abbildung 9: Messschrieb dreier Beispielmessungen: Fahrzeug A mit 50 km/h auf BAS MARVIN mit 10 km/h, ohne Fahrerreaktion, Reaktion nach 1,2 s, Reaktion nach 1,7 s. Dargestellt sind Kennwerte für Warnung, Bremsung, Gurtstraffer.

Einen Überblick über die Messergebnisse für ausgewählte Szenarien zeigt Tabelle 3 (eine vollständige Auswertung wird in [21] veröffentlicht werden).

Tabelle 3: Mittelwerte der Kenngrößen für ausgewählte Szenarien (getrennt nach Fahrzeug)

Szenario	Anzahl der Messungen			Geschwindigkeitsreduktion [km/h]		Warnung TTC [s]		Gurtstraffer TTC [s]	Autonome Bremsung TTC [s]	
	Gesamt	A	B	A	B	A	B	A	A	B
50-10-keine Reaktion	66	42	24	16,36	10,48	2,17	2,79	0,93	1,14	0,80
50-10-Reaktion nach 1,2s	40	21	19	38,77	19,13	2,11	2,82	0,65	1,05	0,66
50-0-keine Reaktion	42,00	17,00	25,00	12,81	6,37	2,08	-0,12	0,79	1,08	0,60
50-0-Reaktion nach 1,2s	21,00	13,00	8,00	28,66	7,92	2,03	0,13	0,59	0,87	0,60
80-0-keine Reaktion	1,00	1,00	0,00	-0,18	0,00	1,05	0,00	0,00	0,00	0,00
80-0-Reaktion nach 1,2s	2,00	2,00	0,00	27,47	0,00	1,92	0,00	0,72	0,81	0,00
Gesamt	172	96	76							

4.2 Übertragbarkeit auf die Realität

Die Überlegungen nach [14] aus Abschnitt 2.5.1 definieren einen Bereich, in dem eine Warnung noch zur Vermeidung des Unfalls führen kann (entweder durch Ausweichen oder durch eine Bremsung durch den Fahrer). Die Messergebnisse sind als Plot von Differenzgeschwindigkeit als Funktion der TTC zusammen mit diesem Bereich in Abbildung 10 dargestellt.

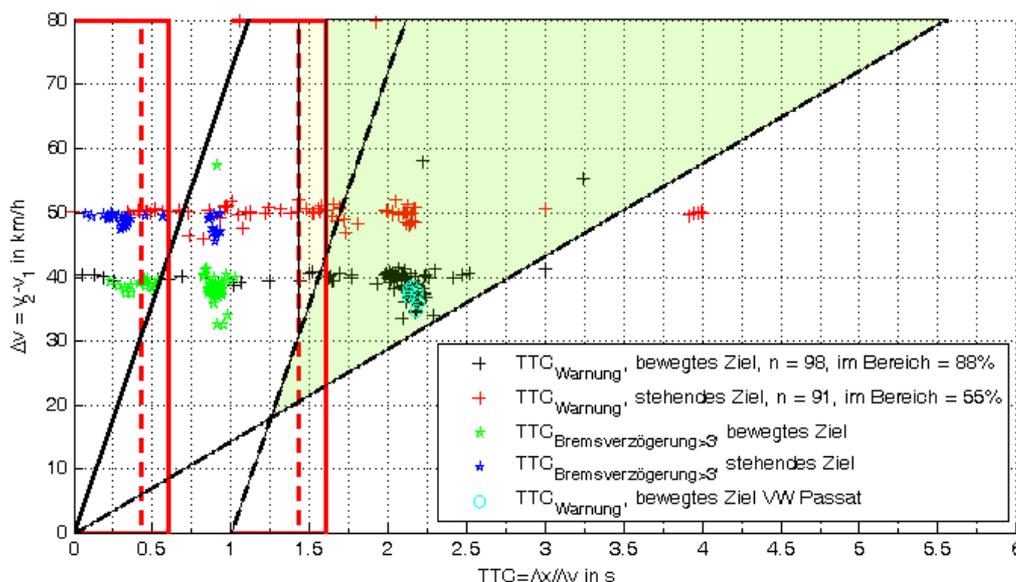


Abbildung 10: Bereich erwarteter Warnungen mit Messergebnissen von Warnzeitpunkt (Fahrzeuge A, B, beide Zielobjekte + Realfahrzeug, alle Szenarien mit konstant bewegtem beziehungsweise stehendem Ziel). Zusätzlich angegeben Zeitpunkte, bei denen bei einer rein autonomen Bremsung die Verzögerung 3 m/s² erreicht.

Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil der Warnungen (beide Fahrzeuge, beide Zielobjekte) im erwarteten Bereich liegt. Für den Fall des bewegten Zielobjektes sind das sogar 88% der Warnungen. Beim unbewegten Zielobjekt ist die Quote deutlich schlechter. Dies deckt sich aber mit der Erfahrung, dass die Identifizierung eines unbewegten Ziels eine deutlich größere Herausforderung ist, insbesondere bei Nutzung nur von RADAR-Sensoren¹.

¹ Siehe z.B. [22]: Nutzung des Dopplereffekts erlaubt eine einfache Bestimmung der Relativgeschwindigkeit und damit eine sichere Identifikation bewegter Ziele.

Die Warnungen bei Verwendung eines Realfahrzeugs liegen sehr gut inmitten der Warnungen auf die Zielobjekte.

Es zeigt sich weiterhin, dass eine Bremsung mit mindestens 3 m/s^2 frühestens bei einer TTC von etwa 1 s erfolgt. Durch Ausweichen ist der Unfall zu diesem Zeitpunkt in der Praxis nicht mehr vermeidbar [14] - mit einer Bremsung wäre in diesem Fall eine Verzögerung von etwa 5 m/s^2 erforderlich. Ohne Fahrerreaktion kommt es in diesen Fällen definitiv zu einer Kollision.

Die Messergebnisse, die mit dem entwickelten Testverfahren erreicht werden, decken sich also gut mit Realfahrzeug und mit Erwartungswerten. Das Testverfahren wird damit hinsichtlich der Übertragbarkeit als validiert angesehen – mit der Einschränkung: zunächst nur für Szenarien mit konstant bewegtem Zielobjekt.

4.3 Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit

Einen Überblick über die Ergebnisse der verschiedenen Testinstitute und Fahrzeuge geben Abbildung 11 und Abbildung 13.

Die Ergebnisse mit bewegtem Zielobjekt (Szenario: Egofahrzeug 50 km/h , Zielobjekt 10 km/h , keine Fahrerreaktion, kein Offset, Abbildung 11) zeigen durchweg eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse für Warn- und Bremszeitpunkt für alle Testinstitute und Fahrzeug A. Die Streuungen sowohl innerhalb der Testinstitute (=Wiederholbarkeit) und zwischen verschiedenen Testinstituten (=Reproduzierbarkeit) sind klein, und dies gilt weiterhin auch für den Geschwindigkeitsabbau. Die Streuung bei Versuchen mit einem realen Fahrzeug ist vergleichbar klein.

Die Geschwindigkeitsreduktion ist mit dem Bewegungssystem VeHIL und dem kompletten ADAC-System (Zielobjekt und Bewegungssystem) leicht höher als mit den Bewegungssystemen Kart „MARVIN“ und Auslegerfahrzeug (IDIADA) – hier wurde bei ansonsten gleichen Zeitpunkten die Vollverzögerung früher gestartet, siehe Abbildung 12.

Deutlich erkennbar ist, dass die erste Verzögerungsstufe ohne nennenswerte Unterschiede bei allen Testkonfigurationen vergleichbar erreicht wird. Die zweite Stufe, bei der letztendlich die Vollverzögerung erreicht wird, startet bei ADAC und VeHIL deutlich früher und reproduzierbarer als bei Nutzung des Karts und des Auslegerfahrzeugs.

Denkbar dafür sind zwei Erklärungen:

- Die ‚besseren‘ Ergebnisse wurden zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt erzielt – und darin floss bereits die Erfahrung mit ein, dass die Kalibrierung des RADAR-Sensors von Fahrzeug A nach jedem Versuch erfolgen sollte.
- Weiterhin ist bekannt, dass das Zielobjekt ASSESSOR bei Seitenwind leicht zu flattern beginnt. Dieses Flattern tritt naturgemäß in einer Halle nicht auf, könnte aber zu einer unsicheren Erkennung des Zielobjekts geführt haben – und damit zu verspätetem Starten der Verzögerungsstufe 2. Aus Vergleichen ist bekannt, dass das ADAC-Zielobjekt das Problem mit dem Flattern nicht hat.

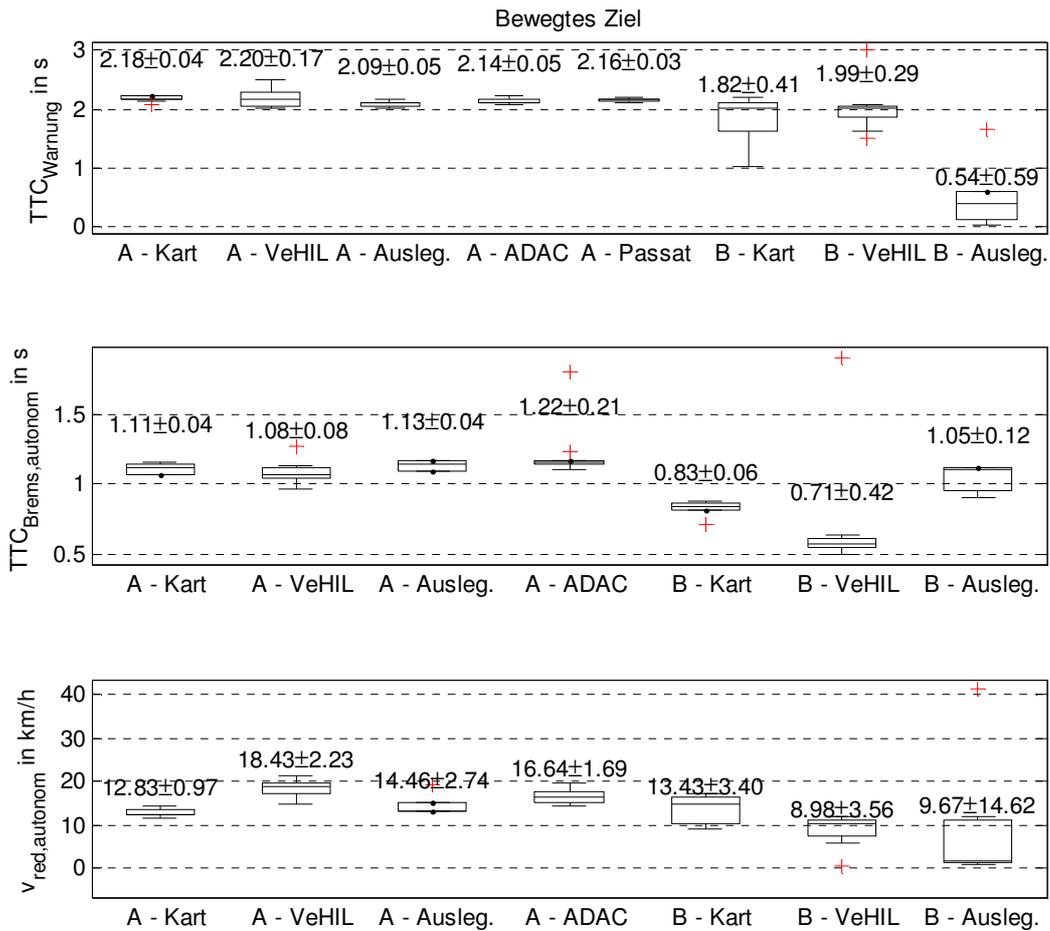


Abbildung 11: Ergebnisse für bewegtes Ziel mit Mittelwert und Standardabweichung (keine simulierte Fahrerreaktion)

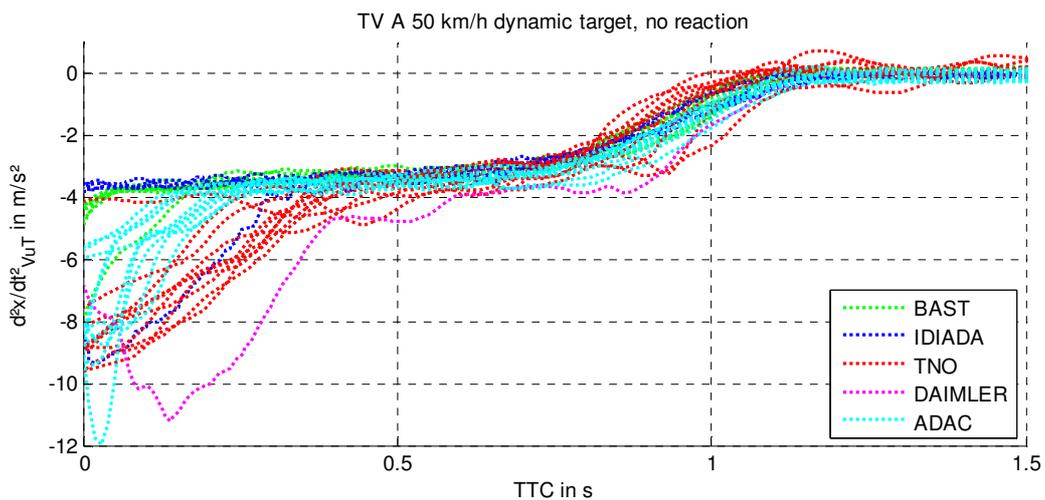


Abbildung 12: Verzögerung als Funktion der TTC für Fahrzeug A, getrennt nach Testinstituten (zum Vergleich ist eine Messung mit dem selbstfahrenden Zielobjekt von Daimler [19] dargestellt)

Die Wiederholbarkeit bei Messungen mit Fahrzeug B ist offensichtlich deutlich schlechter. Da dies aber ebenfalls reproduzierbar bei allen Testinstituten aufgetreten ist, ist hier nicht von

einem Einfluss des Bewegungssystems auszugehen. Wahrscheinlicher ist, dass das ASSESSOR Zielobjekt für Fahrzeug B schwierig erkennbar ist.

Für die Variante mit stehendem Zielobjekt (Abbildung 13) steht nicht annähernd die gleiche Datenbasis zur Verfügung. Die Ergebnisse bestätigen aber die Tendenz, dass die Warnzeitpunkte von Fahrzeug A über alle Testinstitute vergleichbar sind, die Streuung der Ergebnisse von Fahrzeug B vergleichbar groß in allen Testinstituten, und die Ergebnisse von VeHIL und ADAC sowohl für Bremszeitpunkte als auch für die Geschwindigkeitsreduktion von Fahrzeug A vergleichbar sind.

Sowohl für Kart als auch Auslegerfahrzeug stehen jeweils nur sehr wenige autonome Bremsungen auf ein stehendes Zielobjekt zur Auswertung bereit. Diese Bremsungen zeigen eine deutlich schlechtere Performance der Kennwerte Bremsbeginn und Geschwindigkeitsreduktion.

Vor dem Hintergrund, dass ein stehendes Zielobjekt deutlich schwieriger erkennbar ist, ist das Erklärungsmodell hier ebenfalls eine schlechtere Detektierbarkeit des Zielobjekts ASSESSOR beispielsweise durch Windeinfluss – kein Problem für VeHIL-Versuche.

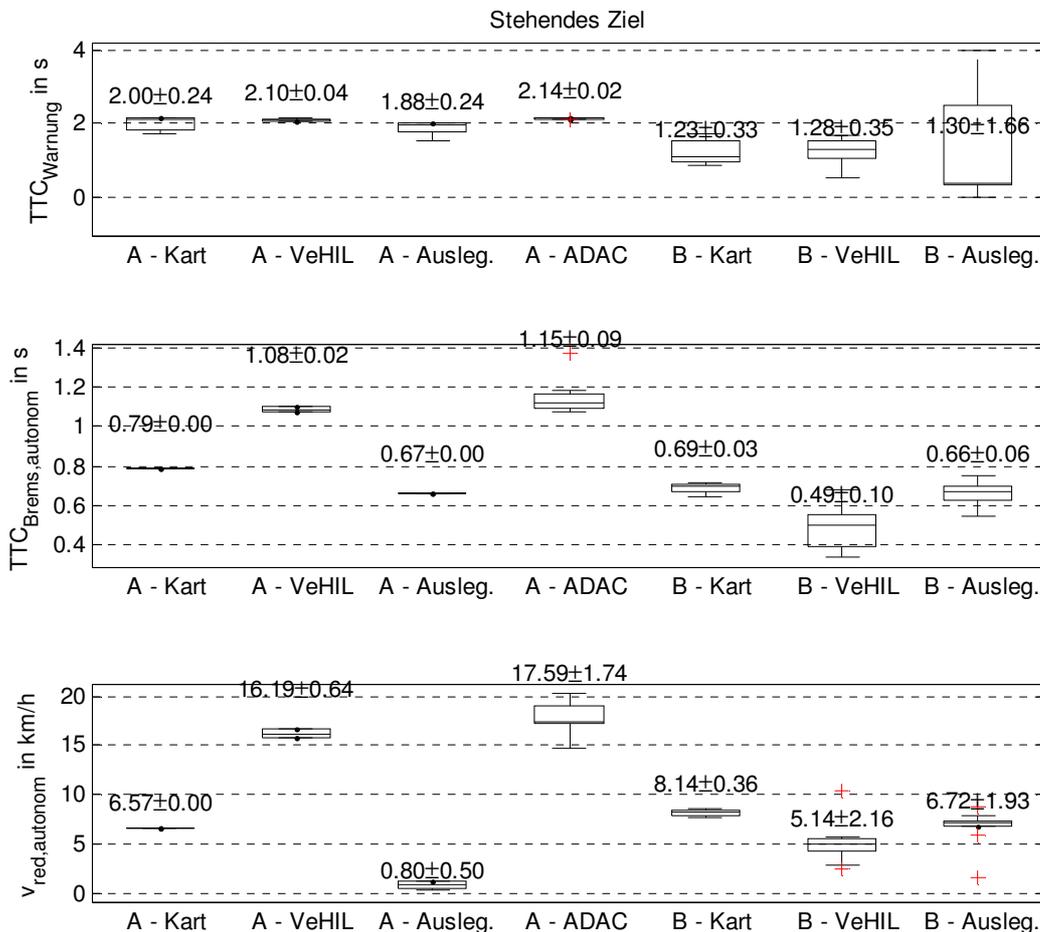


Abbildung 13: Ergebnisse für stehendes Ziel mit Mittelwert und Standardabweichung (keine simulierte Fahrerreaktion)

4.4 Einfluss der Fahrerreaktion auf die Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit

Eine wiederhol- und reproduzierbare Simulation der Fahrerreaktion hat sich als problematisch erwiesen. Wesentlicher Hinderungsgrund hierbei sind Elastizitäten im Kraftfluss Bremspedal – Bremsaktor – Lagerung (Sitz), die von den jeweiligen Kraftreglern

bei der relativ langsamen Steigerung der Bremskraft dennoch nicht schnell und gut genug ausgeglichen werden können. Zeitverzögerungen bei der Aufbringung der Kraft schlagen sich sehr deutlich in der Geschwindigkeitsreaktion nieder. Der Effekt kann im Versuch auch nicht herausgerechnet werden, da Aktivierungsschwellen des Bremsassistenten nicht bekannt sind (Fahrzeug wird als Black Box behandelt).

Zwar gelang es den einzelnen Testinstituten im Wesentlichen, ein wiederholbares Kraftprofil am Bremspedal zu erzeugen, dies aber nur mit hohem Abstimmungsaufwand, und nicht identisch in allen Testinstituten.

Abbildung 14 zeigt die Bremskraft für all jene Versuche, für die diese Daten zur Verfügung stehen, zeitlich normalisiert für den ersten Punkt, bei dem 20 N Pedalkraft überschritten sind (und damit wertbezogen). Abbildung 15 zeigt die Bremspedalkraft, bezogen auf den Zeitpunkt der akustischen Warnung (zeitbezogen). Eine schwarze Linie gibt die jeweiligen Zielwerte an. Hier sind auch Vergleichsfahrten mit dem selbstfahrenden Zielobjekt [19] von Daimler dargestellt.

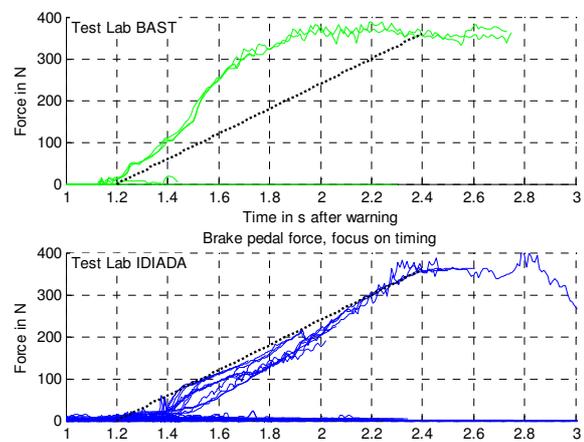
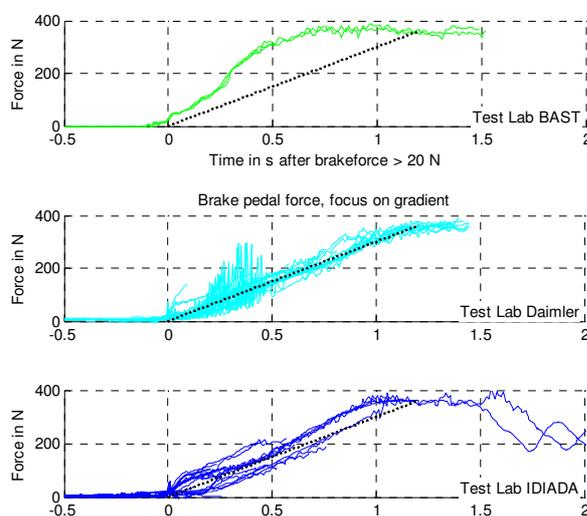


Abbildung 15: Bremskraft, zeitbezogen

Abbildung 14: Bremskraft, wertbezogen

Unter Berücksichtigung dieser Schwierigkeiten erscheint es unter den gegebenen Randbedingungen (Rüstaufwand) nicht einfach erreichbar, eine reproduzierbare Fahrerreaktion wie in Abschnitt 2.2 beschrieben zu implementieren.

Dennoch ist sich das Konsortium einig, dass eine simulierte Fahrerreaktion wichtig ist, um die Sicherheitswirkung der Bremssysteme (z.B. Zusammenspiel von Warnung und Bremsassistent) realistisch einzuschätzen.

Ein alternativer Ansatz zur Nutzung einer simulierten Fahrerreaktion, der diese aber auf die Bremscharakteristik des jeweiligen Egofahrzeugs abstimmt, wird beispielsweise in [4], S. 26 beschrieben. Dort wird zunächst der erforderliche Pedalweg beziehungsweise die erforderliche Pedalkraft zum Erreichen von 4 m/s^2 Verzögerung ohne Bremsunterstützung bestimmt. Dieser Schwellwert wird dann im eigentlichen Fahrversuch als Sprungfunktion durch einen Bremspedalaktor aufgebracht.

5 Folgerungen

5.1 Validierung des Testverfahrens

Die Messergebnisse zeigen, dass das vorgestellte Testverfahren geeignet ist, das Bremsverhalten eines vorausschauenden Bremssystems – bei Bremsung auf ein konstant bewegtes Hindernis – zu messen. Die Messung des Systemverhaltens bei stehendem Hindernis stellte sich zunächst als schwieriger heraus, in der Tendenz zeigen sich aber die ähnliche Ergebnisse wie für das bewegte Zielobjekt.

Wesentlicher Einflussfaktor auf die Sicherheit der Messergebnisse scheint das Zielobjekt selbst zu sein. Das ADAC-Zielobjekt ist hier offenbar besser geeignet als das ASSESSOR-Zielobjekt, wurde es doch umfassend auf möglichst gute Erkennbarkeit für verschiedenste Sensortechnologien optimiert (das ASSESSOR-Zielobjekt wurde auf möglichst gute Übereinstimmung mit einem typischen Mittelklassefahrzeug ausgelegt).

Wie das Zielobjekt bewegt wird, hat dagegen einen vernachlässigbaren Einfluss.

Die aus Probandenstudien abgeleitete künstliche Fahrerreaktion ist im Testalltag schwierig umsetzbar. Geeigneter könnten Fahrerreaktionen wie beispielsweise in [4] dargestellt sein.

5.2 Ableitung von Genauigkeitsanforderungen an ein Testverfahren

Für die betrachteten Szenarien mit konstant bewegtem Zielobjekt sind zu kontrollierende Variablen lediglich

- Geschwindigkeit des Zielobjekts
- Geschwindigkeit des Egofahrzeugs (vor Aktionen des Bremssystems / simulierter Fahrerreaktion)
- Seitlicher Abstand und Winkel zwischen Ego-Fahrzeug und Zielobjekt
- Pedalkraft / Pedalweg der simulierten Fahrerreaktion

Geschwindigkeiten von Zielobjekt und Egofahrzeug konnten im Versuchsbetrieb mit allen Bewegungssystemen problemlos mit ± 1 km/h konstant gehalten werden.

Abweichungen der Geschwindigkeiten von Egofahrzeug und Bewegungssystem und die Relativgeschwindigkeit werden durch TTC-Rechnung in gewissen Grenzen kompensiert. Es zeigt sich, dass insbesondere die gemessenen TTC-Werte zwischen den einzelnen Testinstituten gut vergleichbar sind. Offensichtlich sind die erreichten Wiederholgenauigkeiten (Standardabweichung etwa 2 % des Mittelwertes) hier ausreichend.

Streuungen des gemessenen Geschwindigkeitsabbaus liegen relativ etwa eine Größenordnung darüber, absolut im Bereich zwischen 1 und 3 km/h Standardabweichung, je nach Testinstitut. Diese vergleichsweise hohen Streuungen zeigen, dass es sicherlich nicht gerechtfertigt ist, aus den Messwerten eines einzelnen Versuchs auf die Systemleistung zu schließen – Wiederholungen sollten durchgeführt werden.

Die maximalen seitlichen Abstände im Versuchsbetrieb lagen entweder im Bereich weniger cm (TNO VeHIL, IDIADA Auslegerfahrzeug) oder im Bereich ± 30 cm (BAST Kart, ADAC Bewegungssystem). Dennoch lässt sich kein wesentlicher Unterschied der Ergebnisse zwischen diesen beiden Gruppen von Testinstituten feststellen. Der Einfluss der seitlichen Abstände (sofern sie im Bereich ± 30 cm liegen) sind daher im Versuchsbetrieb vernachlässigbar. Es ist hier keine höhere Wiederholgenauigkeit erforderlich.

Dies ergibt sich auch aus den theoretischen Überlegungen (Abschnitt 2.3): dort wurde gezeigt, dass sich die benötigten Ausweichzeiten zwischen 50% Überdeckung (seitlicher Abstand etwa 1 m) und 100 % Überdeckung (kein seitlicher Abstand) nur unwesentlich unterscheiden. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass Notbremssysteme in diesen beiden Situationen unterschiedlich reagieren.

Prinzipiell sollten die Geschwindigkeiten vor Versuchsbeginn einige Sekunden konstant gehalten werden. In den ASSESS-Versuchen wurde eine Zeitdauer von mindestens 4 s eingehalten – je größer dieser Wert ist, desto besser.

Zusammenfassend haben sich folgende Wiederholgenauigkeiten bewährt:

Geschwindigkeit	± 1 km/h
Seitlicher Abstand	± 30 cm
Versuchsbeginn	>> 4s TTC

6 Danksagung

Diese Veröffentlichung basiert auf der Arbeit der Partner des ASSESS Konsortiums. ASSESS wird von der Europäischen Kommission, Directorate-General für Mobilität und Verkehr kofinanziert. Die Autoren möchten Ihren Dank für die Förderung ausdrücken.

Der Inhalt dieser Veröffentlichung spiegelt nicht die offizielle Meinung der europäischen Union wieder. Die Verantwortung für die Informationen und Ansichten, die in dieser Veröffentlichung zum Ausdruck kommen, liegt ganz alleine bei den Autoren.

7 Literatur

- [1] Lothar Henle, Uwe Regensburger, Bernd Danner, Elisabeth Hentschel, Carsten Hämmerling: *Fahrerassistenzsysteme*. ATZ Sonderheft "Die neue E-Klasse von Mercedes-Benz", 01/2009.
- [2] http://www.toyota-global.com/innovation/safety_technology_quality/safety_technology/pre-crash_safety/, Abruf am 4.5.2012
- [3] Martin Distner, Mattias Bengtsson, Thomas Broberg, Lotta Jakobsson: *City Safety - A System Addressing Rear-End Collisions At Low Speeds*. 21st ESV Conference, Stuttgart 2009.
- [4] Breuer, Jörg: *Vorausschauende Längsschutzsysteme: Praxisrelevanz und Bewertungsverfahren*. 14. VDA Technischer Kongress, Stuttgart 2012
- [5] <http://www.thatcham.org/adas/index.jsp?page=1229>, Abruf am 4. Mai 2012
- [6] <http://www.adac.de/infotestrat/tests/assistenzsysteme/notbremsassistent/default.aspx>, Abruf am 4. Mai 2012
- [7] www.assess-project.eu, Abruf am 4. Mai 2012
- [8] Oliver Bartels, Tobias Langner, Adrés Aparicio, Carmen Rodarius, Paul Lemmen: *ASSESS D4.1 - Action Plan Pre-Crash Evaluation*. Bergisch Gladbach, 2010.

- [9] Mike McCarthy, Helen Fagerlind, Ines Heinig, Tobias Langner, Stefanie Heinrich, Lisa Sulzberger, Swen Schaub: *ASSESS D1.1 - Preliminary Test Scenarios*. Crowthorne, 2009.
- [10] Marcus Wisch, Helen Fagerlind, Mike McCarthy, Mathieu Roynard, Wesley Hulshof, Jean-Francois Boissou, Swen Schaub, Ines Heinig, Matias Viström: *ASSESS D1.2 - Specifications for Scenario Definitions*. Bergisch Gladbach, 2010.
- [11] Marcus Wisch, Helen Fagerlind, Mike McCarthy, Mathieu Roynard, Wesley Hulshof, Jean-Francois Boissou, Swen Schaub, Ines Heinig, Matias Viström: *Analysis of accident data for test scenario definition in the ASSESS project*. ESAR Conference, Hannover 2010.
- [12] Maminirina Ranovona, Jun Tsuchida, Estelle Chin, Thomas Unsel, Oscar Munoz, Andrés Aparicio: *ASSESS D3.2 - Report on the experimental study results of the evaluation of behavioral aspects*. Brüssel, 2011.
- [13] Jens Hoffmann: *Das Darmstädter Verfahren (EVITA) zum Testen und Bewerten von Frontalkollisionsgegenmaßnahmen*. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Band 693. Düsseldorf: VDI Verlag, 2008.
- [14] Winner, Hermann: *Frontalkollisionsschutzsysteme*. In: Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 522ff. 2. Auflage. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2012.
- [15] Mages, Mark: *Top-Down-Funktionsentwicklung eines Einbiege- und Kreuzenassistenten*. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 12, Band 694. Düsseldorf: VDI Verlag, 2009.
- [16] Jörg Breuer, Andreas Faulhaber, Peter Frank, Stefan Gleissner: *Real World Safety Benefits of Brake Assistance Systems*. 20st. ESV Conference, Lyon 2007.
- [17] Christhard Gelau, Tom Gasser, Andre Seeck: *Fahrerassistenz und Verkehrssicherheit*. In: Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 24ff. 2. Auflage. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2012.
- [18] Philips Semiconductors: NE 567 / SE 567 Datenblatt
- [19] Schöner HP, Hurich W, Haaf D: *Selbstfahrendes Soft Crash Target zur Erprobung von Fahrerassistenzsystemen*. Konferenz AAET 2011, Braunschweig.
- [20] Patrick Seiniger, Oliver Bartels, Marcus Wisch, Tobias Langner: *Development of a Target Propulsion System for ASSESS*. 22nd ESV Conference, Washington 2011.
- [21] Carmen Rodarius, Patrick Seiniger, Sébastien Baurès, Kees Waagmeester, Andrés Aparicio, John Vissers, Maminirina Ranovona: *ASSESS D4.3 - Pre Crfash Evaluation Final Status*. Noch unveröffentlicht.
- [22] Winner, Hermann: *Radarsensorik*. In: Winner, Hakuli, Wolf (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, S. 123ff. 2. Auflage. Verlag Vieweg + Teubner, Wiesbaden 2012.