

4 Die Bewertung der Auslösung

Wie soll die Zuverlässigkeit eines Rückhaltesystems gemessen werden? In der Bewertung der Zuverlässigkeit gibt es verschiedene Maßzahlen, wie die Ausfallrate, die durchschnittliche Zeit zwischen zwei Ausfällen oder die Anzahl tolerierbarer Fehler.

Bei der Bewertung eines Rückhaltesystems versagen diese Maße, da die Zuverlässigkeit erst bei Auftreten eines Fehlers, nämlich bei einem Unfall oder dem Überfahren eines Bordsteins, unter Beweis gestellt wird.

Es ist davon auszugehen, dass im normalen Betrieb eines Fahrzeugs, einschließlich Kavaliertarts und Vollbremsungen, das System richtig reagiert. Bezüglich der Beschleunigung liegt die Grenze des normalen Betriebs ungefähr bei einem g , also etwa 10 m/s^2 . Wird dieser Wert nicht überschritten, liegt kein Ereignis vor, das eine Auslösung rechtfertigen könnte.

Eine Aussage über die Anzahl der Fehlauflösungen auf eine Milliarde Kilometer oder eine Million Betriebsstunden hängt in erster Linie davon ab, wie viele außergewöhnliche Ereignisse in diesem Zeitraum passieren. Dies wiederum hängt vom Fahrerprofil ab, welches zwischen den verschiedenen Fahrzeugtypen stark variiert (Kapitel 2.1). Hierüber können allenfalls nachträgliche Statistiken Auskunft geben.

Die Bewertung der Güte eines Rückhaltesystems nach Sekundärdaten (Kapitel 2.1), also während der Entwicklung der Fahrzeuge, kann daher nur anhand der außergewöhnlichen Ereignisse erfolgen.

In diesem Kapitel wird eine Bewertungsfunktion vorgestellt. Sie folgt dabei mehreren Grundsätzen:

- Sie ist universell anwendbar, also unabhängig von der verwendeten Auslösetechnik und anpassbar an zukünftige Entwicklungen.
- Sie ist zielgerichtet, das heißt, sie richtet sich nach potentiellen Schäden bei Fehlverhalten und nicht nach der leichten Berechenbarkeit und Optimierbarkeit.
- Sie ist einfach und durchschaubar.

Diese Grundsätze erleichtern die Anwendung der Funktion für die Parameteranpassung. Die Darstellung der Bewertungsfunktion erfolgt in drei Teilen, der mathematischen Einbettung 4.1, der quantitativen Bewertung 4.2 und der Gewichtung der Ereignisse 4.3.

4.1 Die mathematische Einbettung

Um die Bewertung für den Entwickler anschaulich zu machen, wird die Schwere der Auslösefehler auf einer Skala von 0 bis 1 abgetragen. 0 steht für das richtige, fehlerfreie Verhalten, 1 steht für den größten anzunehmenden Fehler. Dadurch ergibt sich eine Normierung, nach der verschiedene Quantifizierungen, auch von anderen Arbeiten, vergleichbar werden.

Es gibt bei der Auslösung von Rückhaltesystemen zwei grundsätzliche Arten von Fehlern:

1. Die unerwünschte Auslösung bei geringfügigen Ereignissen oder die verfrühte Auslösung bei Kollisionen.
2. Das Ausbleiben der Auslösung oder die verspätete Auslösung.

Um diese beiden Fälle zu unterscheiden, wird ein Vorzeichen in die Bewertungsfunktion aufgenommen. Negatives Vorzeichen steht für den ersten Fall, positives Vorzeichen für den zweiten. Die Funktion gibt die „Abweichung“ des Verhaltens vom Idealverhalten an und wird „Abw“ bezeichnet.

$$-1 \leq \text{Abw} \leq 1 \quad (23)$$

Bei einer mittelschweren Kollision, beispielsweise mit 25 km/h, können beide Arten von Fehlern auftreten. Ungeachtet ihrer quantitativen Festlegung bewegt sich die Funktion in den angegebenen Bereichen aus Abbildung 24.

Das linke Bild bezieht sich auf ein Ereignis mit gewünschter Auslösung. Erfolgt sie zu früh, ist die Fehlerabweichung negativ. Liegt sie im richtigen Zeitintervall, ist die Abweichung 0. Findet sie zu spät statt oder bleibt sie völlig aus (∞), ist sie positiv. Das rechte Bild zeigt die Bereiche der Abweichungsfunktion für ein Ereignis, bei dem keine Auslösung erwünscht ist. Jede erfolgte

nigung, Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, Schallmessung oder Verformungsmessung.

$$\text{Ereignisse (Crashes): } \{c_1, c_2, \dots, c_n\} \quad (24)$$

2. Abweichung

Jedem Ereignis, bzw. jeder Messreihe c_i wird eine Abweichungsfunktion $Abw_i(t)$ zugeordnet. Handelt es sich um eine Ereignis mit gewünschter Auslösung, verhält sich die Funktion wie Abbildung 24 links. Bei Ereignissen, bei denen keine Auslösung erwünscht ist, gilt der Bereich des rechten Bildes.

$$\text{Abweichung: } \{Abw_1, \dots, Abw_n\} \text{ mit } -1 \leq Abw_i(t) \leq 1 \quad (25)$$

3. Gewichtung

Von jedem Ereignistyp liegt eine bestimmte Zahl an Datensätzen vor, abhängig davon, wie oft ein Test durchgeführt (oder simuliert) wurde. Diese Zahl entspricht im Allgemeinen nicht den Häufigkeiten eines Ereignisses im tatsächlichen Verkehr. Daher müssen die Ereignisse entsprechend ihrer Repräsentativität gewichtet werden. Die Gewichtungen summieren sich zu 100%.

$$\text{Gewichtungen: } \{p_1, p_2, \dots, p_n\} \text{ mit } p_i \geq 0 \text{ und } \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (26)$$

4. Auslösealgorithmus

$$\text{Algorithmus: } \text{Algo}_{\text{par}}(c) \quad (27)$$

Mathematisch ist der Auslösealgorithmus eine parametrisierte Funktion, die zu einem Ereignis, also einer Folge von Messwerten, die Auslösezeit t_A berechnet. Nichtauslösung entspricht $t_A = \infty$. Par sind die einstellbaren Parameter, die es anzupassen gilt, beispielsweise Schwellwerte. Die Funktion $\text{Algo}_{\text{par}}(c)$, die den Auslösezeitpunkt t_A berechnet, darf hierfür natürlich nur auf Werte $c(\tau)$ mit $\tau \leq t_A$ zurückgreifen.

5. Die Zielfunktion

Die Zielfunktion ergibt sich aus dem gewichteten Durchschnitt des Betrages der Abweichung:

$$Z = \sum_{i=1}^n p_i |\text{Abw}_i(\text{Algo}_{\text{Par}}(c_i))| \quad (28)$$

Die Funktion bewegt sich zwischen 0 und 1. Sie ist 0 genau dann, wenn die Auslösung bei allen Ereignissen zur richtigen Zeit stattfindet. Den Wert 1 kann sie nur dann annehmen, wenn das System in allen Fällen die falsche Entscheidung trifft, das heißt, bei allen schweren Kollisionen die Auslösung ausbleibt und außerdem bei jeder Lappalie eine Auslösung erfolgt.

Die Optimierung der Parameter eines Auslösealgorithmus bedeutet somit die Minimierung dieser Funktion. Je kleiner Z , desto besser der Algorithmus.

Die vorgestellten Festlegungen könnten vereinfacht werden, wenn die Abweichungsfunktion Abw auf den Bereich 0 bis 1 begrenzt wäre, also die verfrühte Auslösung ebenfalls positiv bewertet würde. Dadurch wäre die Betragsbildung in der Zielfunktion hinfällig.

Verschiedene Vorzeichen bei verschiedenen Fehlern erleichtern jedoch die Analyse für den Entwickler. So erkennt er bei der Ausgabe der Auslösefehler sofort, um welche grundsätzliche Fehlerart es sich handelt.

Zusätzlich ergibt sich, sozusagen als Abfallprodukt, eine mittlere Abweichung durch den gewichteten Durchschnitt der Abweichungsfunktion.

$$\emptyset \text{Abw} = \sum_{i=1}^n p_i \text{Abw}_i(\text{Algo}_{\text{Par}}(c_i)) \quad (29)$$

Sie ist eine wichtige Kenngröße, da sie angibt, ob ein Auslösealgorithmus mit einem Parametersatz Par bezüglich der Ereignisse c_i im Mittel zu früh oder zu spät bzw. zu leicht oder zu schwer auslöst. Sie ist natürlich kein Gütekriterium, da ein Algorithmus, der in der Hälfte der Ereignisse zu früh auslöst und in der anderen Hälfte zu spät, im Mittel richtig reagiert.

Auf Teilmengen aller Ereignisse angewendet, erlaubt diese Kenngröße auch Aussagen wie: „Bei schrägen Kollisionen zwischen 38⁰ und 43⁰ löst der Algorithmus zu spät aus“.

Mit Hilfe dieser Funktionen können nun die Ziele der Parameteranpassung (Optimierung) in Zahlen gefasst werden.

4.2 Die quantitative Bewertung

Die quantitative Bewertung ist das Herzstück der Funktion. Sie soll die Optimierungsziele möglichst genau beschreiben. Die Ziele lassen sich im Wesentlichen auf vier Punkte reduzieren:

1. Liegt keine Kollision vor, darf nicht ausgelöst werden. Beispiele sind Bordstein- und Schlaglochüberfahrten oder Hammerschläge auf das Auslösegerät.
2. Bei leichten Kollisionen darf ebenfalls keine Auslösung erfolgen. Dazu zählen Frontalkollisionen bis etwa 15 km/h und schräge Kollisionen bis etwa 30 km/h. Die genaue Festlegung hängt vom Einzelfall ab.
3. Bei starken Kollisionen muss eine Auslösung erfolgen. Diese muss so früh erfolgen, dass der Insasse erst in die Entfaltungszone des Luftsacks eintaucht, wenn dieser vollständig entfaltet ist.
4. Bei mittelschweren Kollisionen kann eine Auslösung auch zu früh erfolgen, was dazu führt, dass der Luftsack bereits zusammenfällt, bevor der Insasse aufprallt.

Jegliches Abweichen von diesen Zielen ist ein Fehler und muss quantifiziert werden. Als Eckpunkte dienen die Extremwerte, also die größten anzunehmenden Fehler des Systems. Diese können folgendermaßen festgelegt werden:

- Eine Auslösung bei einer Bordsteinüberfahrt gehört zu den größten anzunehmenden Fehlern und ist mit -1 zu bewerten.

- Eine nichterfolgte Auslösung bei 50 km/h zählt zu den Maxima der zweiten Fehlerart und ist daher mit 1 zu bewerten.
- Das richtige Verhalten wird stets mit 0 bewertet.

Alle anderen Fehler sind anhand ihrer Schwere linear an die Extremwerte anzupassen. Linearität bedeutet dabei, dass zwei Bewertungen von 0,5, also mittelschweres Fehlverhalten, bei zwei Ereignissen tatsächlich auch gleichzusetzen ist mit dem korrekten Verhalten in einem und dem totalen Versagen im anderen Fall.

4.2.1 Wie wird es bisher gelöst?

Bei bisherigen Arbeiten erfolgte die Anpassung meist anhand von Originaldaten, also etwa 100-200 Datensätzen von 10-20 verschiedenen Kollisionstypen. Bei dieser geringen Anzahl kann so gut optimiert werden, dass Auslösungen bei Nichtauslöseereignissen und der umgekehrte Fehlerfall unter diesen Datensätzen nicht auftreten. Das ist bei einer Zahl von 100000 Ereignissen (künstlich generiert) nicht mehr möglich.

Zwei Beispiele für bisherige Bewertungen zeigt Abbildung 25. Das linke zeigt

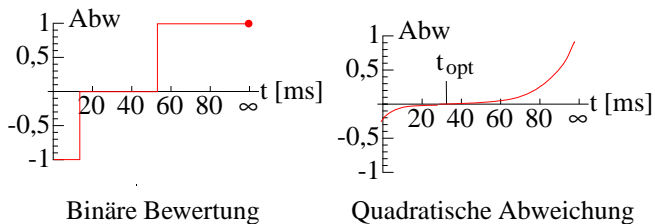


Abbildung 25: Andere Bewertungen

eine einfache binäre Bewertung, also richtig = 0, |falsch| = 1. Das rechte zeigt die Bewertung entsprechend der relativen quadratischen Abweichung vom

idealen Zündzeitpunkt, wie sie in [20] verwendet wird:

$$\lambda = \frac{t - t_{opt}}{t_{opt}} \quad \text{Abw} = \begin{cases} \beta_1 \lambda^2 & \text{für } \lambda \leq 0 \\ \beta_2 \lambda^2 & \text{sonst} \end{cases} \quad (30)$$

Die Faktoren β_1 und β_2 erlauben eine unterschiedliche Bewertung zwischen verfrühter und verspäteter Auslösung. Diese Bewertung zeigt gute Ergebnisse, solange sich alle Auslösezeiten nahe am Optimum aufhalten. Sie hat jedoch mehrere Nachteile. So fehlen zum einen Kriterien, anhand derer sich β_1 und β_2 bemessen lassen. Zum anderen ist die Linearität fraglich. Eine verspätete Auslösung um 50 % (zeitlich) wiegt immer ebenso schwer wie 25 verspätete Auslösungen um 10 %. Dies kann zwar in Einzelfällen dem quantifizierten Auslösefehler entsprechen, lässt sich aber nicht generell daraus ableiten.

Die Quantifizierung sollte daher nach festgelegten Eckpunkten erfolgen.

4.2.2 Quantifizierung von Nichtauslöserereignissen

Zu Beginn von Abschnitt 4.2 wurden vier Ziele für das richtige Auslöseverhalten genannt. Die ersten beiden beziehen sich auf das gewünschte Ausbleiben der Auslösung. Die Quantifizierung dieser Ziele kann nicht unmittelbar aus den physikalischen Vorgängen abgeleitet werden. Es muss das Schadensausmaß abgeschätzt werden. Ziel ist vorrangig natürlich die körperliche Unversehrtheit der Insassen. Daneben gibt es auch finanzielle Einflüsse wie Reparaturkosten oder mögliche Schadenersatzforderungen bei einer unerwünschten Auslösung. Das zu bewerten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Für diese Aufgabe müssen sich Experten verschiedener Fachgebiete zusammensetzen und schlüssige Maßstäbe erarbeiten, die der geforderten Linearität entsprechen.

Ein Beispiel für ein Ereignis mit unerwünschter Auslösung ist ein Wildunfall, etwa die Kollision mit einem 30 kg schweren Reh. Eine Auslösung ist hier zwar gänzlich unnötig, stellt aber nicht den größten anzunehmenden Fehler dar. Abbildung 26 zeigt die Bewertungsfunktion bei einer angenommenen Einstufung von $-0,7$.

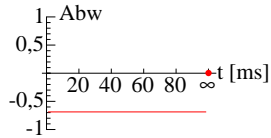


Abbildung 26: Bewertung eines Wildunfalls

4.2.3 Quantifizierung von Auslöseereignissen

Für das dritte Ziel, die rechtzeitige Auslösung bei starken Kollisionen, kann das physikalische Modell aus Kapitel 3 verwendet werden. Eine Möglichkeit der Quantifizierung ergibt sich, wenn man die binäre Entscheidung richtig oder falsch, die mit der binären Bewertung (Abbildung 25) gegeben ist, durch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung verfeinert. Die Frage lautet dabei: Mit welcher Wahrscheinlichkeit befindet sich ein Insasse nach einer Zeit t_E in der Entfaltungszone (Abbildung 27)? Die Modellierung dafür erfolgt mit

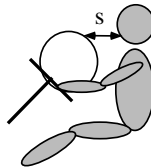


Abbildung 27: Abstand des Insassen vom entfaltetem Luftsack

der Wahrscheinlichkeitsdichte der Insassenposition, also dem Abstand zum Berührungspunkt, $f_{\text{Abstand}}(s)$ und der Funktion für die Vorverlagerung $s(t)$. Aus diesen Gleichungen lässt sich die Dichte über der Zeit t ($f_{\text{Zeit}}(t)$) und durch Integration die gesuchte Verteilung $F_{\text{Zeit}}(t)$ ermitteln.

Die Gleichungen dafür lauten:

$$f_{\text{Zeit}}(t) = f_{\text{Abstand}}(s(t)) \cdot \dot{s}(t) \quad (31)$$

$$F_{\text{Zeit}}(t) = \int_{-\infty}^t f_{\text{Zeit}}(\tau) d\tau, \quad (32)$$

Als Beispiel diene eine 50-km/h-Frontalkollision. Die Insassenposition sei normalverteilt, mit einem Mittelwert $\mu = 12\text{ cm}$ und einer Standardabweichung $\sigma = 5\text{ cm}$. Für die Vorverlagerung wird die Funktion aus Abbildung 20 (Mitte) verwendet. Für die Berechnung wird sie angenähert durch $s(t) = a\left(\frac{t}{1\text{ s}}\right)^b$ mit $a = 13115,7\text{ m}$ und $b = 3,8$. Diese Werte ergeben sich durch Einsetzen der Punkte $s(45\text{ ms}) = 10\text{ cm}$ und $s(54\text{ ms}) = 20\text{ cm}$ (Abbildung 21). Es ist zu beachten, dass der Auslösezeitpunkt t_A und der Entfaltungszeitpunkt t_E unterschiedlich sind. Sie unterscheiden sich genau um die jeweilige Entfaltungsdauer des Luftsacks.

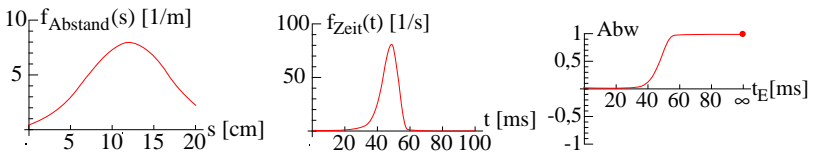


Abbildung 28: Dichten und Abweichungsfunktion

Abbildung 28 zeigt die Dichten und die berechnete Abweichungsfunktion. Eine Transformation des Entfaltungszeitpunktes t_E zum Auslösezeitpunkt t_A entspricht der Verschiebung der Abweichungsfunktion nach links. Bei einer angenommenen Entfaltungsdauer von 30 ms würde die Abweichungsfunktion bereits nach etwa 10 ms stark ansteigen. Der richtige Auslösezeitpunkt liegt dann innerhalb der ersten 10 ms.

Durch die Wahl verschiedener Verteilungsfunktionen und Modellierungen der Vorverlagerung kann die Funktion sehr genau angepasst werden.

Das Ziel, eine zu frühe Auslösung zu verhindern, wurde in diesem Beispiel nicht berücksichtigt. Das Zusammenfallen des Luftsacks und die dadurch abnehmende Schutzwirkung müssen in ähnlicher Weise modelliert werden wie das Entfallen.

Anmerkung: Die „Bestrafung“ zu früher Auslösung muss sich ausschließlich nach dem Zusammenfallen des Luftsacks richten. Sie darf nicht dazu missbraucht werden, Nichtauslöseereignisse zu ersetzen, um die Parameteranpassung zu verbessern. Dies widerspricht den Zielen und versagt, wenn Systeme bewertet werden, die schon vor Beginn der Kollision auslösen können.

4.3 Die Gewichtung der Ereignisse

Auch die Gewichtung der Ereignisse muss von einem Fachgremium durchgeführt werden. Der Symmetrie der Fehlerfälle wegen sind zwei Klassen von Ereignissen zu unterscheiden, die mit gewünschter Auslösung und die mit unerwünschter. Beide Klassen werden mit jeweils 50% in die Bewertung eingehen.

Die in dieser Arbeit verwendete Gewichtung der Tests soll die Häufigkeiten der Ereignisse fahrzeugunabhängig widerspiegeln. Abbildung 29 zeigt die Gewichtung der Auslöseereignisse. Die Kollisionstypen sind im Anhang A.1 dargestellt.

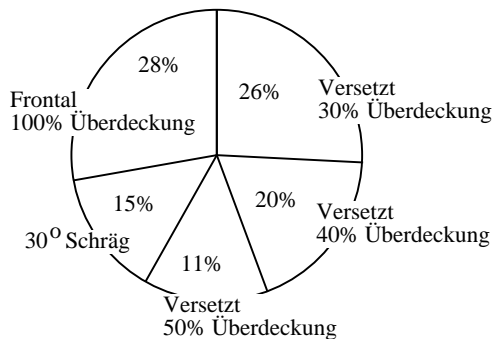


Abbildung 29: Repräsentativität der Tests [21]

Da Anzahl und Art der durchgeführten Tests von verschiedenen Fahrzeugen recht unterschiedlich sind, wird die Gewichtung in dieser Arbeit nach folgenden Grundsätzen durchgeführt:

- Auslöser und Nichtauslöser sind jeweils mit insgesamt 50% gewichtet.
- Werden künstlich generierte Daten verwendet, also anhand des physikalischen Modells interpolierte oder skalierte Daten, so werden die Originaldaten doppelt so stark gewichtet.
- Alle Nichtauslöser, also beispielsweise Schlagloch- und Randsteinüber-

fahrten, Parkrempler und Wildunfälle sind gleichgewichtet.

- Unter den Auslösern werden die Fahrzeug-Fahrzeug-Unfälle und Kollisionen mit der deformierbaren Barriere zu einem Drittel gewichtet. Die anderen zwei Drittel wurden, soweit vorhanden, entsprechend Abbildung 29 aufgeteilt.
- Kollisionsarten, zu denen keine Daten vorhanden waren, werden durch die entsprechend ähnlichsten Kollisionen ersetzt.

Eine Änderung an den genannten Zahlenwerten dieses Kapitels sollte auf die nun folgende Verfahrensweise keinen Einfluss haben. Die Bewertungen, also alle quantitativen Angaben, beziehen sich auf die hier genannten Abweichungsfunktionen und Gewichtungen.

4.3.1 Objektivität

In [20] werden verschiedene Sicherheitsphilosophien der Hersteller angesprochen, die in die Bewertung eingehen. Bei der Quantifizierung und der Gewichtung der Einzelereignisse hat der Fahrzeughersteller die Möglichkeit, die Bewertung der eigenen Sicherheitsphilosophie anzupassen. Beispielsweise unterscheiden sich die Quantifizierungen eines Kleinwagens, der überwiegend von Frauen, also kleineren und leichteren Personen gefahren wird, von einem Oberklassefahrzeug, dessen Zielgruppe Männer zwischen 50 und 60 Jahren sind. Dies führt dazu, dass Kleinwagen systembedingt schlechter bewertet werden, da die Anpassung an einen kleineren Durchschnittsfahrer schwieriger ist. In der Gewichtung der Ereignisse geht ebenfalls das Fahrerprofil ein, das aus Tertiärdaten (Kapitel 2.1) des Vorgängermodells hervorgeht. Diese Effekte verhindern die objektive Vergleichbarkeit verschiedener Fahrzeuge.

Für objektive Vergleiche einer übergeordneten Instanz muss daher eine Normbewertung festgelegt werden. Vergleichbar ist dies mit dem Normverbrauch von Fahrzeugen nach dem sogenannten Drittmix (Stadtverkehr, Landstraße, Autobahn). Die jeweiligen Drittel spiegeln höchstens zufällig die Benutzungsgewohnheiten eines Fahrzeugs wieder, ergeben jedoch gute Vergleichswerte für eine Beurteilung.

Mit Hilfe einer Normierung sind herstellerübergreifende, objektive Vergleichstests möglich.

4.3.2 Welche Werte nimmt die Bewertungsfunktion an

Aus der Festlegung der Funktion ergeben sich Zahlenwerte für die Bewertung des Gesamtsystems.

Verhielte sich das System in allen Fällen richtig, so ergibt sich für Zielfunktion $Z = 0$.

Verwendet man einen Auslösealgorithmus, dessen Schwellen so hoch eingestellt sind, dass sie nie überschritten werden, so wird die Zielfunktion trotzdem unter 0,5 oder 50% liegen. Mit der Anschauung stimmt dies überein, denn schließlich verhält sich das System wenigstens in der Hälfte der Fälle völlig richtig. In der anderen Hälfte, nämlich den Ereignissen, in denen eine Auslösung erwünscht ist, verhält es sich falsch, bisweilen jedoch nur bedingt falsch, da in manchen Fällen auch eine Nichtauslösung nicht als größter anzunehmender Fehler eingestuft wird und daher mit weniger als 1 bewertet wird.

Das Gegenteil, also ein Auslösealgorithmus, der so sensibel eingestellt ist, dass er bei geringsten Ereignissen den Luftsack zündet, kann auch eine Bewertung über 0,5 erreichen. Dies liegt daran, dass er in der Hälfte der Fälle sicher falsch reagiert, und zum Teil auch in der anderen Hälfte fehlerhaft reagiert, da er den Luftsack zu früh auslöst.

Der Arbeitsbereich sinnvoll angepasster Auslösealgorithmen liegt etwa zwischen 0 und 0,1, wie Ergebnisse zeigen werden.

Mit Hilfe der vorgestellten Bewertungsfunktion können nun alle Auslösealgorithmen mit universellen Optimierungsverfahren an eine Ereignismenge angepasst werden, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird.