

# Reboundfaktorverfahren

Von Manfred Becke \*

In diesem Beitrag wird gezeigt, wie mithilfe des Reboundfaktorverfahrens die Insassenbelastung für Insassen in einem mittleren Fahrzeug bestimmt werden kann, das zunächst einer Heckkollision und direkt anschließend einer Frontalkollision ausgesetzt ist. Die sich hieraus ergebenden Werte werden durch die Ergebnisse von Winninghoff gestützt.

## 1 Einführung

Das Prinzip einer derartigen Sandwichkollision soll zunächst anhand des folgenden Gedankenexperiments übersichtlich dargestellt werden: Das Fahrzeug 1 steht ganz vorne, dahinter in einem geringen Abstand steht das Fahrzeug 2. Ein drittes Fahrzeug nähert sich von hinten und prallt mit einer Geschwindigkeit  $v_3$  auf das stehende Fahrzeug 2 auf. Dieses wird hierdurch beschleunigt, und zwar um den Wert der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung aus dem Heckenprall  $\Delta v_{2\text{Heck}}$ . Da der Abstand zwischen dem Fahrzeug 2 und dem Fahrzeug 1 sehr gering sein soll, prallt das Fahrzeug 2 mit dieser Geschwindigkeit dann auf das Fahrzeug 1 auf. Hierdurch erfährt das Fahrzeug 2 eine Verzögerung um  $\Delta v_{2\text{Front}}$ .

## 2 Insassenbewegungen

Bei der Heckkollision, die das Fahrzeug 2 erfährt, kommt es prinzipiell zunächst zu einer Primärbewegung des Insassen gemäß **BILD 1**. In dieser bewegt sich der Insasse relativ zum Fahrzeug nach hinten und beansprucht die Rückenlehne und die Kopfstütze, die sich dabei aufgrund ihrer Elastizität nach hinten verbiegen.

Daran folgt eine Sekundärbewegung, auch Reboundbewegung genannt, bei der der Oberkörper und der Kopf durch die vorgespannte Rückenlehne relativ zum Fahrzeug nach vorn bewegt werden. Der Oberkörper mit dem Kopf schwingt bogenförmig nach vorn, so-

dass eine immer größere Relativbewegung zum Fahrzeug festzustellen ist, je weiter der betrachtete Punkt von der Hüfte entfernt ist, **BILD 2**.



**BILD 1:** Primärbewegung der Insassen  
**FIGURE 1:** Primary motion of the occupants



**BILD 2:** Sekundärbewegung der Insassen  
**FIGURE 2:** Secondary motion of occupants

In Kalthoff, Meyer, Becke [1] wurde das Ergebnis von Videoauswertungen beschrieben. Bezogen auf das  $\Delta v_{\text{Heck}}$ , das bei der Heckkollision erreicht wurde, bewegte sich der Kopf mit dem 0,7- bis 1-Fachen und die Schulter mit dem 0,5- bis 0,7-Fachen des  $\Delta v_{\text{Heck}}$ -Wertes.

Dieser Faktor wurde als Reboundfaktor  $R$  bezeichnet. Die Geschwindigkeit, mit der sich der Hals bei der Reboundbewegung relativ zum Fahrzeug nach vorn bewegt, ergibt sich nach **GLEICHUNG 1**.

Kommt es nun bei einer Sandwichkollision zu einer derartigen zeitlichen Korrelation, dass gerade diese Reboundbewegung, verursacht durch die Heckkollision, mit der nachfolgenden Frontalkollision zusammenfällt, kann es zu einer Überlagerung der Reboundbewegung mit der eigentlichen, nachfolgenden Insassenbewegung, verursacht durch die Frontalkollision, kommen.

International hat es sich etabliert, die Insassenbelastung durch die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  des Fahrzeugs zu beschreiben. Dabei ist es dem Techniker sehr wohl bewusst, dass dieses nur eine ungenaue Beschreibung der Insassenbelastung sein kann, da es sich bei dem  $\Delta v$  nicht um Werte im Bereich der Halswirbelsäule handelt, sondern um die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsände-

rung der Fahrgastzelle. Insbesondere kann die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung nur dann als Belastungskenngröße verwendet werden, wenn Kollisionen mit in etwa gleicher Kollisionsdauer betrachtet werden. Für Auffahrkollisionen ohne Abgleiten ist dieses der Fall.

Für eine alleinige Frontalkollision wird die Insassenbelastung also durch  $\Delta v_{\text{Front}}$  ausgedrückt. Betrachtet man die Insassenbewegung bei einer Frontalkollision, so hat auch der Hals am Anfang der Kollision die Kollisionsgeschwin-

digkeit des Fahrzeugs inne und am Ende der Kollision genau die Geschwindigkeit des Fahrzeugs, das heißt, auf den Halsbereich wirkte ebenfalls das gleiche  $\Delta v$  ein, wie auf das Fahrzeug.

Um die maximale Gesamtbelastung aus einer überlagerten Frontalkollision während der Reboundbewegung beim Insassen, verursacht durch eine unmittelbar zuvor aufgetretene Heckkollision, zu erhalten, sind die Anteile linear zu addieren, **GLEICHUNG 2**. Dabei ist zu betonen, dass eine derartige Addition naturgemäß nur den Fall kennzeich-

$$\Delta v_{\text{Hals}} = R \cdot \Delta v_{\text{Heck}} \quad \text{Gl. (1)}$$

$$\Delta v_{\text{Hals gesamt}} = \Delta v_{\text{Front}} + R \cdot \Delta v_{\text{Heck}} \quad \text{Gl. (2)}$$

# Echte Klassiker.



[schnell]



[scharf]



**VERKEHRSDIENST** informiert zwölf Mal im Jahr über die **aktuelle Rechtslage im Straßenverkehr**. Experten kommentieren die wichtigsten Änderungen und Entwicklungen z.B. im Fahrerlaubnisrecht, im Fahrzeugzulassungsrecht und in der StVO. Ergänzend: einschlägige, neueste Rechtsprechung.

**Mit Online-Premiumbereich für Abonnenten:**

- Suchfunktion für über 500 Urteile und Aufsätze zur aktuellen Rechtspraxis im Straßenverkehr.
- Komfortabler Download sämtlicher Beiträge und Entscheidungen (Urteile zusätzlich in Originalfassung).

**JETZT ABO MIT PRÄMIE BESTELLEN ODER 3 AUSGABEN ZUM TESTEN ORDERN!**

**WWW.VERKEHRSDIENST.DE**

Springer Fachmedien GmbH | Verlag Heinrich Vogel | Vertriebsservice | Aschauer Str. 30 | D-81549 München | Fax: 089 / 20 30 43-21 00

E-Mail: [vertriebsservice@springer.com](mailto:vertriebsservice@springer.com) | Service-Telefon: 089 / 20 30 43-11 00

net, bei dem gerade diese beiden Belastungen zeitgleich auftreten.

Die lineare Addition der Anteile aus kollisionsbedingter Geschwindigkeitsänderung bei der Frontalkollision und der Geschwindigkeit des Halses relativ zum Fahrzeug während der Reboundbewegung wird, gemäß Gleichung 2, Reboundfaktorverfahren genannt.

### 3 Sandwichfaktor nach Winninghoff

Winninghoff [2] hat sich in seiner Dissertation intensiv mit dem Thema Sandwichkollisionen beschäftigt. Er führte umfangreiche Berechnungen für massgleiche Fahrzeuge ( $m_1 = m_2 = m_3$ ) mit Hilfe eines Simulationsprogramms mit einem Madymo-Modell durch. Als Maß für die Belastung der Halswirbelsäule wurde die Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Oberkörper betrachtet. Er berechnete bei der reinen Frontalkollision diese Geschwindigkeitsdifferenz für diverse kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen der Fahrgastzelle zwischen etwa  $\Delta v = 5 \text{ km/h}$  und knapp über  $\Delta v = 20 \text{ km/h}$ .

Zusätzlich berechnete er die Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Oberkörper für die Relativgeschwindigkeit von 15 und 30 km/h zwischen dem auffahrenden Fahrzeug

und dem betrachteten Fahrzeug mit Fahrzeugabständen zu dem davor befindlichen Fahrzeug von 10 bis 80 cm in verschiedenen Schritten. Hierdurch ergaben sich wiederum Zusammenhänge zwischen der dabei erreichten kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung bei Frontalkollisionen und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Oberkörper. Das Ergebnis stellte er in einem Diagramm dar, das die gefundenen Zusammenhänge zeigt, **BILD 3**.

Die jeweiligen Punkte für die Frontalkollision wurden durch eine Ausgleichsgerade und die Punkte für die Sandwichkollision durch Hüllgeraden sowie durch eine Gerade des Mittelwerts dargestellt. Es ergaben sich quasi lineare Zusammenhänge zwischen der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung der Fahrgastzelle bei der Frontalkollision und der Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Oberkörper. Für die reine Frontalkollision ergab sich ein Faktor von 1,11.

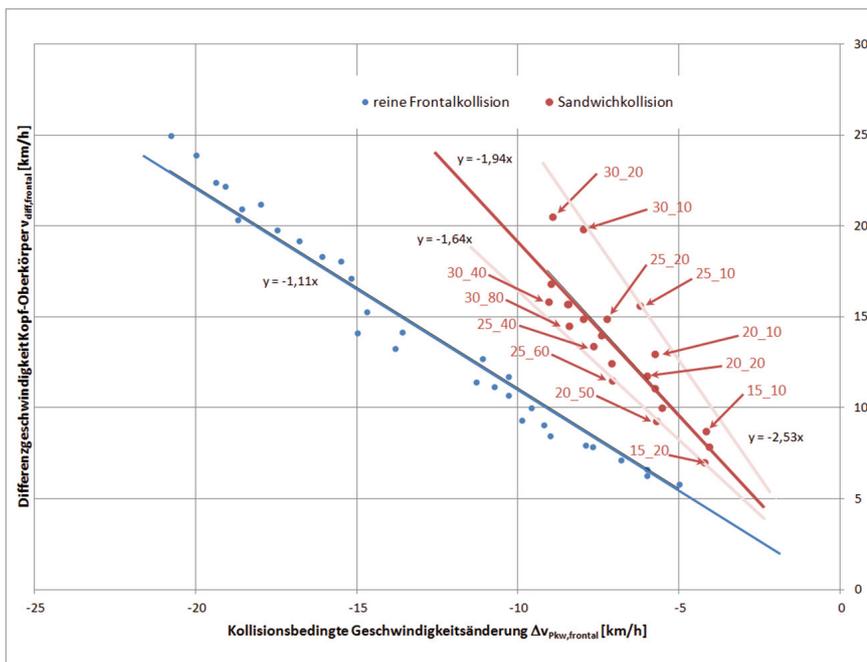
Dieses bedeutet, dass die Differenzgeschwindigkeit zwischen Kopf und Oberkörper um den Faktor 1,11 größer ist, als die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Pkw. Bei der Sandwichkollision ergab sich eine Hüllgerade mit einem Faktor von 1,64

als Minimum und eine weitere Hüllgerade mit dem Faktor 2,53 als Maximum, mit dem man den  $\Delta v$ -Wert aus der Frontalkollision multiplizieren muss, um die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Oberkörper zu erhalten. Der Mittelwert ergab einen Wert von 1,94.

Bei seinen Berechnungen von Sandwichkollisionen konnte Winninghoff nur für Abstände der Fahrzeuge von maximal 80 cm Überlagerungen der Insassenbewegung aus Heck- und Frontkollision aufzeigen. Das Ergebnis seiner Berechnung war, dass die Belastung bei einer Sandwichkollision das 1,48-Fache bis 2,28-Fache (Sandwichfaktor) von dem Wert einnehmen konnte, die bei einer reinen Frontalkollision auftritt. Als Mittelwert wird von ihm ein Sandwichfaktor von 1,88 angegeben.

### 4 Berechnung des Sandwichfaktors nach dem Reboundfaktorverfahren

Ermittelt man nun nach dem hier vorgestellten Reboundfaktorverfahren ebenfalls die Sandwichfaktoren für den von Winninghoff gewählten Sonderfall, dass alle Fahrzeugmassen gleich groß sind, so können folgende Beispielberechnungen durchgeführt werden: Für Fahrzeugmassen von  $m = 1500 \text{ kg}$  und



**BILD 3:** Zusammenhänge zwischen kollisionsbedingter Geschwindigkeitsänderung bei Frontalkollisionen und der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Kopf und Oberkörper [2]

**FIGURE 3:** Relationships between the collision-related change in velocity in frontal collisions and the difference in velocity between the head and the upper body [2]

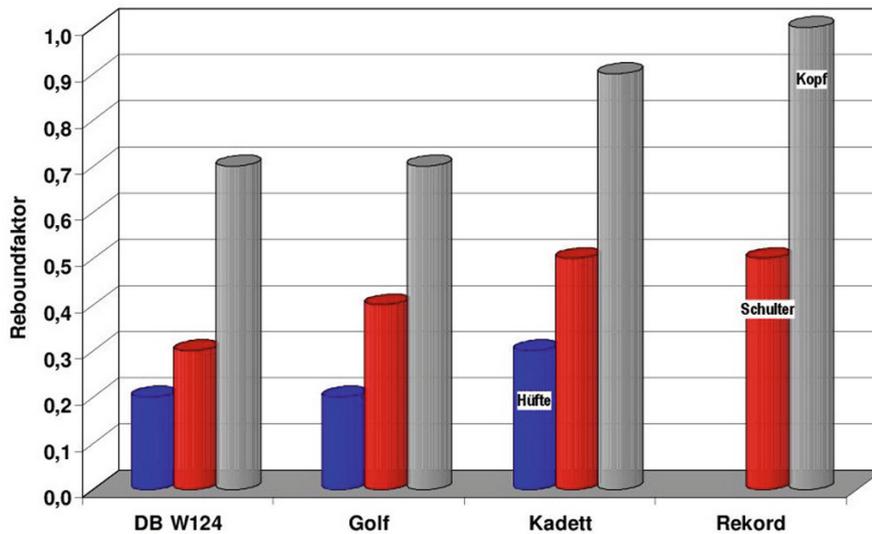


BILD 4: Reboundfaktor für den Halsbereich [1]

FIGURE 4: Rebound factor for the neck area [1]

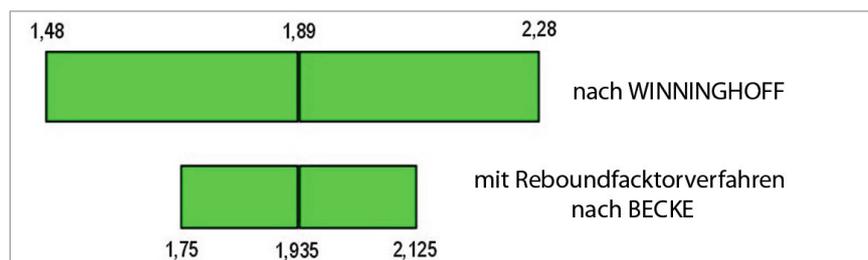


BILD 5: Die Mittelwerte der Untersuchungen nach [1] und [2] sind nahezu identisch

FIGURE 5: The mean values of the tests according to [1] and [2] are almost identical

einer Gesamtdeformationsenergie von 13.200 Nm bei einem k-Faktor von 0,33 kann für die zeitlich erste Heckauffahrkollision des Fahrzeugs 3 auf das Fahrzeug 2 eine Relativgeschwindigkeit von  $v_{rel} = 22,6 \text{ km/h}$  berechnet werden. Das Fahrzeug 2 erfährt dadurch eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von  $\Delta v_{Heck} = 15,0 \text{ km/h}$ .

Mit dieser Geschwindigkeit prallt das Fahrzeug 2 nunmehr auf das vordere Fahrzeug 1, wodurch es eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von  $\Delta v_{Front} = 10 \text{ km/h}$  erfährt. Zusammen-

fassend wird in diesem Beispiel die mittlere Fahrzeugzunächst von hinten auf eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von  $\Delta v_{Heck} = 15 \text{ km/h}$  beschleunigt und anschließend durch die Frontalkollision um  $\Delta v_{Front} = 10 \text{ km/h}$  verzögert.

Nach Kalthoff, Meyer, Becke [1] ist für den Halsbereich (zwischen Kopf und Schulter) ein Reboundfaktor von etwa  $R = 0,5$  bis  $0,75$  anzugeben, BILD 4, sodass mit einem  $\Delta v_{Heck} = 15 \text{ km/h}$  eine Reboundgeschwindigkeit des Halses  $\Delta v_{Hals}$  von etwa  $7,5$  bis  $11,25 \text{ km/h}$  resultiert.

Zusammen mit der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung der nachfolgenden Frontalkollision,  $\Delta v_{Front} = 10 \text{ km/h}$ , folgt nach dem vorgestellten Reboundfaktorverfahren bei dem Beispiel mit gleichen Massen ( $m = 1500 \text{ kg}$ ) für  $\Delta v_{Hals}$  gesamt ein Wertebereich zwischen  $17,5 \text{ km/h}$  und  $21,25 \text{ km/h}$ . Der Sandwichfaktor nach Winninghoff war als Quotient aus der Belastung bei der Sandwichkollision und der Belastung bei der Frontalkollision definiert. Setzt man zur Insassenbelastung jetzt die soeben berechneten  $\Delta v$ -Werte ein, so ergibt sich ein Sandwichfaktor von  $17,5 / 10 = 1,75$  bis  $21,25 / 10 = 2,125$  mit einem Mittelwert von  $1,935$ . Dieses Ergebnis liegt innerhalb des Wertebereiches, der bei Winninghoff beschrieben ist, wobei der Mittelwert nahezu identisch ist, BILD 5.

Die Beispielrechnung zeigt, dass mit der Arbeit von Winninghoff das Reboundfaktorverfahren gestützt wird. Dieses ist insoweit von Bedeutung, als dass die Ergebnisse von Winninghoff nur für den Spezialfall  $m_1 = m_2 = m_3$  in der täglichen Praxis nutzbar wären, der Sonderfall jedoch so gut wie nie auftritt. Somit bleibt für die tägliche Praxis nach bisherigem Kenntnisstand lediglich die Möglichkeit, das Reboundfaktorverfahren anzuwenden, das für alle möglichen Massen benutzt werden kann.

#### Literaturhinweise

- [1] Kalthoff, W.; Meyer, S; Becke, M., Die Insassenbewegung bei leichten Pkw-Heckanstoßen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik Heft 7 / 8 (2001).
- [2] Winninghoff, M., Zur biomechanischen Belastung von Insassen im mittleren Fahrzeug bei Dreierauffahrkollisionen, Inaugural-Dissertation Universität Greifswald (2015).

#### Rebound factor process

This report describes how the rebound factor process can be used to determine the loads on occupants in a mid-size vehicle that is exposed to a rear-end collision and then immediately afterwards to a frontal collision. The values determined are supported by the results obtained by Winninghoff.

#### \* Autor

Dipl.-Ing. Dr. Manfred Becke ist ö. b. u. v. Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle und Kfz-Technik im eigenen Ingenieurbüro Schimmel-pfennig und Becke in Münster. ::