

# Sicherheit von Motorradhelmen

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Fahrzeugtechnik Heft F 3

**bast**



# **Sicherheit von Motorradhelmen**

**Vergleichende Analyse  
der Kopfbeschleunigung  
bei Pkw- und Motorradunfällen**

von

Harald Zellmer

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Fahrzeugtechnik Heft F 3**

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht Ergebnisse aus ihrer Arbeit, vor allem Forschungsvorhaben, in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A – Allgemeines
- B – Brücken- und Ingenieurbau
- F – Fahrzeugtechnik
- M – Mensch und Sicherheit
- S – Straßenbau
- V – Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Am Alten Hafen 113–115, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 4 60 93–95, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

## **Impressum**

**Bericht zum Forschungsprojekt 91506:**  
Sicherheit von Helmen – vergleichende  
Kennlinienanalyse der Kopfbeschleunigung  
bei Pkw- und Motorradunfällen

**Herausgeber:**  
Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon (0 22 04) 4 30  
Telefax (0 22 04) 4 38 32

**Redaktion:**  
Referat Öffentlichkeitsarbeit

**Druck und Verlag:**  
Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon (04 71) 4 60 93–95  
Telefax (04 71) 4 27 65

ISSN 0943-9307  
ISBN 3-89429-393-4

Bergisch Gladbach, Dezember 1993

## Kurzfassung · Abstract · Résumé

### Sicherheit von Motorradhelmen

Vergleichende Analyse der Kopfbeschleunigung bei Pkw- und Motorradunfällen.

Der Nutzen des Schutzhelmes für motorisierte Zweiradfahrer ist unumstritten. Die Grenzwerte für eine zulässige Kopfbeschleunigung bei der Prüfung des Dämpfungsverhaltens gemäß ECE-R 22/1/ sind jedoch weiterhin in der Diskussion.

In der vorliegenden Untersuchung wird deshalb die Kopfbelastung eines Dummys beim Pkw-Crash-Versuch mit den Belastungen des behelmten Prüfkopfes bei Fallversuchen gemäß ECE-R 22 verglichen.

Bei den durchgeführten Fallversuchen besteht ein enger Zusammenhang zwischen HIC und maximaler Beschleunigung, der durch eine analytische Funktion beschrieben werden kann. Es kann gezeigt werden, daß die bei ECE-R 22 zulässige Kopfbeschleunigung von 300 g einem HIC von etwa 3400 entspricht.

Zur Bewertung von Schutzhelmen mit verbesserten Stoßabsorptionseigenschaften erscheint es sinnvoll, wie anhand von Modellrechnungen gezeigt wird, den HIC als Schutzkriterium einzuführen. Bei einer Anprallgeschwindigkeit von 7 m/s kann ein HIC von 1500 als realistische Forderung angesehen werden, sofern bei der ECE-Regelung der sogenannte Zweitschlag entfällt.

Bei den Pkw-Versuchen ist kein Zusammenhang zwischen HIC und maximaler Beschleunigung vorhanden. Hier ist der HIC als Verletzungskriterium etabliert, und das ist für den komplexen Verlauf des Signals der Kopfbeschleunigung sinnvoll. Eine Bewertung nach anderen Kopfschutzkriterien würde die Rangfolge der einzelnen Versuche ändern.

Bei Helmversuchen auf den Stirnanprallpunkt B werden starke Rotationen des rückprallenden Systems Prüfkopf/Helm beobachtet. In Verbindung damit treten hohe Rotationsbeschleunigungen auf. Diese liegen, wie bei einem Teil der Helmversuche gemessen, zwischen 2,4 und 4,8 krad/s<sup>2</sup>.

### The Safety of Motorcycle Helmets

Comparative analysis of head acceleration in car and motorcycle accidents.

The benefits of crash helmets for riders of motorized two-wheelers are undisputed. The permissible

head acceleration limit values in testing the damping behaviour according to the ECE Regulation 22/1/ are, however, still under discussion.

In this investigation, the load on the head of a dummy in a car crash test has been compared with the loads on a helmeted test head in drop tests according to the ECE Regulation 22.

The drop tests revealed a close relationship between HIC and the maximum acceleration which can be described by an analytical function. It can be demonstrated that the permissible head acceleration of 300 g of the ECE Regulation 22 corresponds to a HIC of about 3400.

Model calculations revealed that it might be useful to introduce HIC as a protection criterion in the evaluation of crash helmets with improved shock absorption properties.

Provided the so-called secondary impact is not applied in the ECE Regulation, a HIC of 1500 can be regarded as a realistic requirement at an impact velocity of 7 m/s.

In crash tests on cars a relationship between HIC and maximum acceleration does not exist. Here the HIC is the established injury criterion, suitably describing the complex pattern of the head acceleration signal. An evaluation based on other head protection criteria would change the ranking of individual tests.

In helmet tests concentrating on impacting the forehead (impact point B), great rotations of the rebounding system of test head and helmet have been observed. High rotational accelerations also occur in this connection. As measured in some of the helmet tests, they were found to range from 2.4 to 4.8 krad/s<sup>2</sup>.

### La sécurité de casques pour motocyclistes

Analyse comparative de l'accélération de la tête observée dans les accidents de motocycles ou de voiture.

L'utilité du casque pour les conducteurs de deux-roues motorisés est incontestée. Cependant, les valeurs limite que les tests du comportement d'amortissement réalisés selon le Règlement ECE-R 2/1 permettent pour l'accélération de la tête font toujours l'objet de discussion.

La présente étude établit donc une comparaison

entre la charge à laquelle est exposée la tête d'un mannequin d'essai dans un essai de collision avec une voiture particulière et la charge à supporter par une tête d'essai munie d'un casque dans un essai de chute effectué conformément au Règlement ECE-R 22.

Les essais de chute réalisés dégagent une relation étroite entre le HIC (Head Injury Criterion = critère de lésion de la tête) et l'accélération maximale. Cette relation peut être décrite par une fonction analytique. On peut montrer qu'une accélération de la tête de 300 g, admise par le Règlement ECE-R 22, correspond à un HIC d'environ 3400.

Des calculs de modèle ont démontré qu'il paraît opportun de faire recours au HIC en tant que critère de protection pour l'évaluation des casques avec des propriétés d'absorption de choc améliorées. Si le soi-disant choc secondaire n'est pas appliqué par le Règlement ECE, un HIC de 1500 peut être considéré comme exigence réaliste pour une vitesse de choc de 7 m/s.

Les essais avec des voitures particulières ne révèlent pas une relation entre le HIC et l'accélération maximale. Dans ce cas, le HIC s'est établi en tant que critère de lésion ce qui s'est avéré judicieux - pour la structure complexe du signal de l'accélération de la tête. Une évaluation selon d'autres critères de protection de la tête mènerait à un changement dans l'ordre des essais individuels.

Dans des essais de casque qui portent sur l'impact au front (point d'impact B), de fortes rotations du système rebondissant de tête d'essai et casque ont été observées, accompagnées d'importantes accélérations de rotation. Des mesures réalisées dans une partie des essais ont donné qu'elles se situent entre 2,4 et 4,8 krad/s<sup>2</sup>.

## Inhalt

1	Einleitung . . . . .	7
2	Kopfbelastungen bei PKW-Crash-Versuchen . . . . .	7
3	Kopfbelastungen bei Fallversuchen gemäß ECE-R 22 . . . . .	9
3.1	Standard-Auswertung der Kopfbelastungen. . . . .	9
3.2	Zusammenhang zwischen HIC und $a(\max)$ . . . . .	11
3.3	Anstieg der Beschleunigung . . . . .	12
3.4	Weitere Auswertungen der Helmfallversuche . . . . .	12
3.5	Rotatorische Beschleunigung des Prüfkopfes. . . . .	12
4	Vergleich der Kopfbeschleunigungen bei PKW-Crash-Testen und Fallversuchen gemäß ECE-R 22 . . . .	14
5	Grenzen der Helmentwicklung . . . . .	14
5.1	Verbesserungsmöglichkeiten der Schutzhelme durch Reduktion der Rückprallgeschwindigkeit . . . . .	15
5.2	Verbesserungsmöglichkeiten durch optimiertes Beschleunigung/Zeit-Verhalten . . . . .	15
6	Schlußbetrachtungen . . . . .	18
	Literatur . . . . .	19
	Anhang . . . . .	21



## 1 Einleitung

Der Nutzen des Schutzhelms für motorisierte Zweiradfahrer ist unumstritten. Die Grenzwerte für eine zulässige Kopfbeschleunigung bei der Prüfung des Dämpfungsverhaltens gemäß ECE-R 22 [1] sind jedoch weiterhin in der Diskussion. Zur Prüfung der Stoßdämpfung gemäß dieser Regelung wird der Schutzhelm einem speziellen Prüfkopf aufgesetzt, der mit einem 3-achsialen Beschleunigungsaufnehmer versehen ist. Diese Einheit fällt mit einer Geschwindigkeit von 7 m/s auf einen flachen, bzw. mit 6 m/s auf einen halbkugelförmigen Amboß. Die ECE-R 22 fordert, daß die resultierende Beschleunigung einen Spitzenwert von weniger als 300 g hat und den Wert von 150g für nicht länger als 5 ms übersteigt.

Die in ECE-R 22 definierten Grenzwerte sind hoch verglichen mit zulässigen Werten anderer Regelungen: bei ECE-R 12 oder bei ECE-R 21 darf die Kopfbeschleunigung nicht mehr als 80 g über einen größeren Zeitraum als 3 ms betragen [2]; beim PKW Frontalaufprall gemäß FMVSS 208 [3] ist gefordert, daß der HIC (Head Injury Criterion) den Wert von 1000 nicht übersteigt. Der HIC ist definiert als [2]:

$$\text{HIC} = \max \left( \left\{ \int_{t_1}^{t_2} a \, dt / (t_2 - t_1) \right\}^{2.5} * (t_2 - t_1) \right) \quad (1)$$

Anm.: Gemäß FMVSS 208 [3] darf das Zeitintervall  $t_2 - t_1$  höchstens 36 ms betragen. Ergibt sich der höchste Wert der Berechnungsfunktion über ein längeres Zeitintervall, so ist die Funktion für ein festes Intervall von 36 ms zu maximieren (HIC36).

Der HIC ist nicht ohne weiteres mit den vorher genannten Kriterien vergleichbar, weil bei seiner Berechnung der gesamte Beschleunigungs/Zeit-Verlauf numerisch analysiert wird.

Interessant ist es daher zu untersuchen, wie sich die Kopfbelastungen im jeweils anderen Bewertungssystem darstellen. Dafür werden die Kopfbelastungen eines Dummys beim PKW-Crash-Test mit den Belastungen des Prüfkopfes bei Fallversuchen gemäß ECE-R 22 verglichen. Es werden maximale Beschleunigungen  $a(\max)$ , Beschleunigungen im Intervall von 3 ms  $a(3 \text{ ms})$  und HIC-Werte für alle Versuche angegeben und diskutiert.

Bei den Helmfallversuchen ist ein enger Zusammenhang zwischen HIC und maximaler Beschleunigung zu erkennen. Im weiteren wird daher eine Funktion diskutiert, die diesen Zusammenhang beschreibt. Bei den Helmversuchen wird zusätzlich zu den vor-

her aufgeführten Werten noch der Anstieg der Beschleunigung ( $da/dt$ ) und die Rückprallgeschwindigkeit bestimmt. Durch zweifache Integration des Beschleunigung/Zeit-Signals wird die Eindrückung des Schutzpolsters ermittelt. Es zeigt sich, daß diese bei Aufschlägen auf den Stirnpunkt B teilweise größer zu sein scheint als die Dicke der Schutzpolsterung selbst ist. Das liegt daran, daß der Schwerpunkt des Prüfkopfes nicht senkrecht über dem Aufschlagpunkt des Helmes auf den Amboß ist. Dadurch wird eine Rotation des Prüfkopfes induziert. Im weiteren wird daher der Einfluß dieser Rotationsbewegungen und insbesondere der dabei auftretenden Rotationsbeschleunigungen untersucht.

Im weiteren werden anhand von Vergleichen mit Modellrechnungen Grenzen für die Wirksamkeit von Motorradshutzhelmen diskutiert. Daraus wird ein mögliches Schutzkriterium für die Kopfbelastung bei Falltests gemäß ECE-R 22 abgeleitet, das wahrscheinlich jedoch nur dann erfüllt werden kann, wenn in der ECE-Regelung der sogenannte Zweitschlag entfällt.

## 2 Kopfbelastungen bei PKW-Crash-Versuchen

Um ein breites Spektrum von Kopfbelastungen abzudecken, wurden insgesamt 17 Frontal-Crash-Teste aus den Forschungsprojekten der BAST ausgewählt, die den Einfluß der Geschwindigkeit [4] und der Korrosion [5] der Testfahrzeuge auf die Dum-

Versuch	Fahrz. Code	Kenn-Nr. BAST	KFZ Hersteller	KFZ Typ
1	1	GE 05	Volkswagen	Golf II
2	1	GE 06	Volkswagen	Golf II
3	2	GE 16	Ford	Fiesta
4	2	GE 07	Ford	Fiesta
5	2	GE 08	Ford	Fiesta
6	3	GE 13	Audi	100
7	3	GE 12	Audi	100
8	3	GE 09	Audi	100
9	3	GE 10	Audi	100
10	3	GE 11	Audi	100
11	4	KOR 7	Mitsubishi	Colt
12	5	KOR 8	Fiat	Panda
13	6	KOR 9	Renault	R 5
14	7	KOR 10	Opel	Kadett
15	8	KOR 11	Volkswagen	Golf II
16	9	KOR 12	Ford	Fiesta
17	10	KOR 13	Mercedes Benz	W 124

Tab. 1: Versuchsnummer, BAST-Schlüssel und Fahrzeuge bei den PKW-Crash-Testen

mybelastung zum Thema hatten. Insgesamt neun verschiedene Fahrzeugtypen verschiedener Größe sind dabei getestet worden (Tabelle 1), die Anprallgeschwindigkeiten reichten von 30 – 55 km/h. Alle Versuche wurden gegen eine starre Barriere mit 100 % Überdeckung Fahrzeug/Barriere durchgeführt; bei allen ausgewählten Versuchen kam es zu einem Anprall des Kopfes an das Lenkrad.

Versuch	v [m/s]	Fahrzeug	Dummy	a (max) [g]	a (3ms) [g]	HIC	t2 – t1 [ms]
1	15,28	1	HIII	104,9	100,2	1317	37,0
2	15,28	1	HIII	174,0	89,8	1207	34,0
3	12,55	2	HIII	223,2	84,6	580	40,4
4	13,89	2	HIII	81,4	74,3	715	39,6
5	15,28	2	HIII	164,5	75,0	847	35,3
6	8,33	3	HIII	28,9	27,7	196	89,0
7	11,11	3	HIII	113,1	85,6	449	28,0
8	13,89	3	HIII	144,3	126,2	949	7,7
9	13,89	3	HIII	153,2	113,2	783	6,1
10	15,28	3	HIII	146,8	114,0	1245	13,1
11	13,89	4	HII	145,3	90,5	946	29,3
12	13,89	5	HII	242,6	107,6	1016	7,0
13	13,89	6	HII	121,0	113,1	1182	13,3
14	13,89	7	HII	123,5	113,8	936	9,6
15	13,89	8	HII	115,8	99,3	585	42,0
16	13,89	9	HII	227,2	96,0	874	33,2
17	13,89	10	HII	102,5	97,7	943	28,4
min	8,33	–	–	28,9	27,7	196	6,1
max	15,28	–	–	242,6	126,2	1317	89,0

Tab. 2: Wichtige Größen der Kopfbelastung des Dummys

Anm.: Spalte 3: Fahrzeug 8 ist der gleiche Typ wie Fahrzeug 1, jedoch stark korrodiert, Spalte 4: HII = Hybrid II, HIII = Hybrid III, Spalte 7: nach FMVSS 208 ist der Berechnungszeitraum für den HIC auf 36 ms begrenzt, die in der Tabelle angegebenen Werte sind jedoch über den gesamten Beschleunigungsverlauf gerechnet.

In Tabelle 2 sind Versuchsnummer, Fahrzeuggeschwindigkeit v, Fahrzeugtyp, Dummytyp, maximale Beschleunigung, Beschleunigung in einem Intervall von 3 ms, HIC und das Berechnungsintervall (frei) für den HIC angegeben. Ein Zusammenhang zwischen den einzelnen aufgelisteten Größen ist nicht zu erkennen. HIC-Werte von über 1000 können bei Kopfbeschleunigungen von wenig mehr als 100 g auftreten (Versuch 1), HIC-Werte von unter 1000 auch bei Beschleunigungen von über 220 g (Versuch 16). HIC-Berechnungsintervalle reichen für den Fall HIC > 1000 von 7 ms – 37 ms. Das Toleranzkriterium  $a(3\text{ ms}) < 80\text{ g}$  ist lediglich in drei Fällen erfüllt, die Kriterien gemäß ECE-R 22 in allen.

Versuch	T (a > 60g) [ms]	a (max) vor [g]	T (a > 20%) [ms]
1	19	54	58
2	22	45	39
3	8	40	15
4	8	38	56
5	20	24	33
6	0	26	175
7	6	39	47
8	8	38	28
9	6	21	10
10	13	35	28
11	15	20	36
12	11	25	27
13	13	43	33
14	10	45	60
15	7	48	51
16	12	35	22
17	11	55	50

Tab. 3: Wichtige Größen der Kopfbelastung des Dummys II

In Tabelle 3 sind Versuchsnummer, der Zeitraum T(a>60 g), in dem das Signal größer als 60 g ist, die maximale Beschleunigung a(max) vor vor dem Anprall des Kopfes an das Lenkrad und die Dauer des Verzögerungssignals T(>20 %) (20 % des Maximalwerts zu Beginn bis 20 % des Maximalwerts am Ende des Signals) angegeben.

Die Dauer der Verzögerungskurve kann bis zu 175 ms betragen. Der Zeitraum, in dem Verzögerungswerte von 60 g überschritten werden (Grenzbeschleunigung nach Wayne-State-Toleranzkurve für Zeiten größer als 45 ms [2]), beträgt bei den angeführten Versuchen 0 ms – 22 ms.

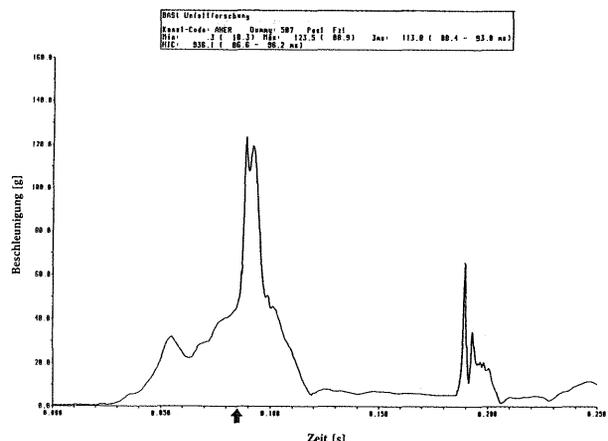


Bild 1: Beschleunigung/Zeit-Verlauf für den Kopf eines Dummys beim PKW Crash Versuch

Der Verlauf des typischen Beschleunigung/Zeit-Diagramms (vgl. Bild 1 und Anhang) läßt sich zusammenfassend folgendermaßen beschreiben:

Der Beschleunigungsverlauf vor dem Anprall auf das Lenkrad ist durch die Rückhaltung des Dummy-Körpers durch den Sicherheitsgurt bestimmt. In diesem Zeitabschnitt treten Kopfbeschleunigungen von 20 g - 55 g auf. Der Anstieg auf den Maximalwert der Beschleunigung wird nach dem Anprall des Kopfes auf das Lenkrad erreicht (Pfeil in Bild 1). Der weitere Verlauf ist dadurch bestimmt, an welcher Stelle der Dummykopf auf das Lenkrad trifft (Kranz, Nabe) und wie hart diese ist. Abhängig davon können kurze, hohe oder längere, moderate Beschleunigungswerte auftreten. Ein weiteres ausgeprägtes Beschleunigungssignal kann auftreten, wenn der Kopf nach dem Rückprall vom Lenkrad auf einen harten Gegenstand trifft (z. B. B-Säule des Fahrzeuges, Signal rechts in Bild 1).

Die Beschleunigung/Zeit-Diagramme für alle Versuche befinden sich im Anhang.

### 3 Kopfbelastungen bei Fallversuchen gemäß ECE-R 22

#### 3.1 Standard-Auswertung der Kopfbelastungen

Die Fallversuche wurden in Anlehnung an ECE-R 22 auf dem Helmprüfstand der BASt durchgeführt. Es wurden ein Prüfkopf der Größe 60 und Helme der entsprechenden Größe verwendet. Zur Beobachtung des Bewegungsablaufes wurde jeder Versuch von einer Hochgeschwindigkeitskamera aufgezeichnet, die mit 3000 Bildern pro Sekunde betrieben wurde.

In Tabelle 4 sind die in den Versuchsreihen verwendeten Helme aufgelistet. Alle Helme entsprechen der ECE-R 22-03.

Versuch	Hersteller	Helmtyp	Schale	Code
G01-G23	Nolan	N25	PC	A
B1/P1	Nolan	N35	PC	1
B2/P2	Nolan	N44	GFK	2
B3/P3	Schuberth	Profil	PC	3
B4/P4	Schuberth	Visor 3	GFK	4
B5/P5	Shoei	XRV	GFK	5
B6/P6	Uvex	Boss	PC	6
B7/P7	Uved	Mach 1	GFK	7
B8/P8	Levior	F 1	PC	8

Tab. 4: Verwendete Helme, PC = Polycarbonat

Folgende Versuchsreihen wurden durchgeführt:

1. Ein Helmtyp (Nolan N25, Code A) wurde mit verschiedenen Geschwindigkeiten (2,7 m/s – 8,8 m/s) auf den Stirnpunkt B beaufschlagt (G01 - G18).

2. Der selbe Helmtyp wurde an verschiedenen Stellen von Punkt B beginnend bis zum Hinterkopf beaufschlagt (G19-G20), vgl. Bild 2. Alle Anprallpunkte lagen auf der Schnittlinie der senkrechten Mittelebene des Prüfkopfes mit der Helmschale.

3. Acht verschiedene Helmtypen wurden mit der in der ECE-R 22 festgeschriebenen Fallgeschwindigkeit (6,8 m/s – 7,0 m/s) getestet. Anprallstellen am Helm waren der Stirnpunkt (Punkt B) und der Scheitelbereich (Punkt P).

Alle Versuche wurden mit demontiertem Visier und Visierhalterung durchgeführt; die Helme wurden nur einem Anpralltest unterzogen, als Anprallpartner diente stets der flache Amboß.

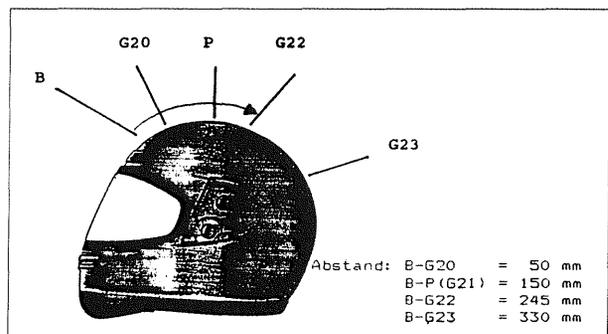


Bild 2: Anprallpunkte bei Versuchen G19-G23

Versuch	v [m/s]	Helmtyp	Punkt	a (max) [g]	a (3ms) [g]	HIC	t2 - t1 [ms]
G01	2,7	A	B	61,3	45,3	86	6,9
G02	3,1	A	B	71,5	58,6	149	6,0
G03	3,5	A	B	91,3	75,9	279	6,1
G04	4,3	A	B	103,0	86,6	389	6,1
G07	5,1	A	B	113,3	94,3	509	6,8
G09	6,0	A	B	135,9	103,0	652	5,2
G10	6,3	A	B	142,6	119,8	829	6,0
G11	6,5	A	B	156,8	125,1	983	5,5
G12	6,7	A	B	181,4	121,9	1029	5,3
G13	6,8	A	B	166,0	132,1	1091	5,6
G14	7,4	A	B	164,4	138,0	1183	5,6
G16	7,3	A	B	175,2	139,8	1263	5,3
G17	8,3	A	B	203,0	153,0	1685	5,1
G18	8,8	A	B	213,2	157,2	1817	4,9
G19	6,7	A	B	159,7	127,8	1026	5,6
min	2,7	-	-	61,3	45,3	86	4,9
max	8,8	-	-	213,2	157,2	1817	6,9
G20	6,8	A	B-P	219,5	163,2	1887	4,4
G21	6,8	A	B-P	213,9	170,5	1907	4,5
G22	6,8	A	B-P	240,6	162,3	2149	4,4
G23	6,8	A	B-P	200,6	168,7	1756	4,9
min	6,6	-	-	213,9	162,3	1756	4,4
max	6,8	-	-	240,6	170,5	2149	4,9

Tab. 5a: Ergebnisse der Fallversuche  
 Erläuterungen siehe nächste Seite

Versuch	v [m/s]	Helm-typ	Punkt	a (max) [g]	a (3ms) [g]	HIC	t2 – t1 [ms]
B1	6,8	1	B	153,2	127,7	964	5,6
B2	6,8	2*	B	173,6	135,2	1 182	5,0
B3	6,9	3	B	149,8	135,2	893	5,3
B4	6,9	4*	B	141,0	119,3	807	5,6
B5	6,8	5*	B	155,0	123,0	938	5,1
B6	6,9	6	B	162,7	128,1	1 018	5,2
B7	6,9	7*	B	183,0	137,2	1 137	4,7
B8	6,8	8	B	131,6	109,2	708	6,3
min	–	–	–	131,6	109,2	708	4,7
max	–	–	–	183,0	137,2	1 182	6,3
P1	6,8	1	P	253,1	177,8	2 173	3,9
P2	6,8	2*	P	222,1	168,5	1 951	4,0
P3	7,0	3	P	223,7	171,3	2 053	4,2
P4	6,9	4*	P	231,8	172,7	2 037	3,8
P5	6,8	5*	P	204,6	177,8	1 921	4,3
P6	7,0	6	P	241,2	184,2	2 255	4,3
P7	6,9	7*	P	268,6	156,7	2 472	3,4
P8	7,1	8	P	209,9	151,8	1 648	4,8
min	–	–	–	204,6	151,8	1 648	3,4
max	–	–	–	268,6	184,2	2 472	4,8

Tab. 5b: Ergebnisse der Fallversuche

Anm.: Spalte 1: Versuche G1 – G19: Helm A, Aufschlagpunkt B, verschiedene Geschwindigkeiten; Versuche G20 – G23: Helm A, verschiedene Aufschlagpunkte; Versuche B1 – B8: verschiedene Helme auf Punkt B beaufschlagt; Versuche P1 – P8: verschiedene Helme im Scheitelbereich beaufschlagt. Spalte 3: mit \* gekennzeichnete Helme haben Schalen aus GFK, andere aus Polycarbonat.

In Tabelle 5 sind Versuchsgeschwindigkeit, Helm-typ, Anprallstelle, maximale Beschleunigung, Beschleunigung über ein Intervall von 3 ms, HIC und das Berechnungsintervall für den HIC angegeben. Im ersten Teil der Tabelle sind die entsprechenden Werte für Helmtyp A aufgeführt (Versuche G1 – G19 und G20 – G23), im zweiten Teil für acht verschiedene Helme für Anprallpunkt B (B1 – B8) und für den Scheitelbereich (P1 – P8).

In allen Versuchen sind die Schutzkriterien gemäß ECE-R 22 erfüllt. In Versuchsreihe G wird ein HIC von 1000 bei Anprallgeschwindigkeiten ab 6,7 m/s überschritten, in Versuchsreihe B haben fünf von acht Helmen einen HIC < 1000. Im Scheitelbereich treten die größten Werte für a(max), a(3 ms) und für den HIC auf. Kein HIC-Wert ist hier kleiner als 1000. Das Kriterium a(3 ms) < 80 g ist lediglich in Versuchsreihe G für Geschwindigkeiten bis 3,5 m/s erfüllt.

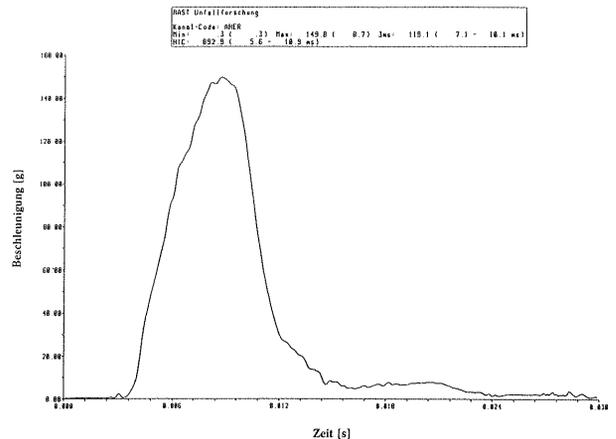


Bild 3: Beschleunigung/Zeit-Verlauf für den behelmten Prüfkopf beim Fallversuch

Der Verlauf der Beschleunigung/Zeit-Diagramme ist für alle durchgeführten Versuche ähnlich (vgl. Bild 3). Es gibt einen steilen Anstieg der Beschleunigung, ein oder zwei ausgeprägte Maxima und danach einen nicht minder steilen Abfall. Die Dauer des Beschleunigungssignals (20 % des Maximalwerts zu Beginn bis 20 % des Maximalwerts am Ende) ist selten länger als 10 ms. Berechnungsintervalle für den HIC reichen für den Fall HIC > 1000 von 3,4 ms – 5,6 ms.

Bei dieser Ähnlichkeit der Signalformen ist zu erwarten, daß die einzelnen Meßgrößen – im Gegensatz zu denen der PKW-Versuche – in einer Beziehung zueinander stehen. Für die Versuchsserie G01 – G19 ist in Abbildung 4 a(max) in Abhängigkeit von der Anprallgeschwindigkeit v dargestellt. An die Meßpunkte läßt sich eine Gerade anpassen. In Bild 5 ist der HIC gegen die Anprallenergie  $E = m/2 \cdot v^2$  aufgetragen. Auch hier ist die Beziehung durch eine Gerade gut beschrieben. Für die jeweils andere mögliche Kombination (a(max) vs. E oder HIC vs. v) ergibt die Regression einen schlechteren Korrelationskoeffizienten.

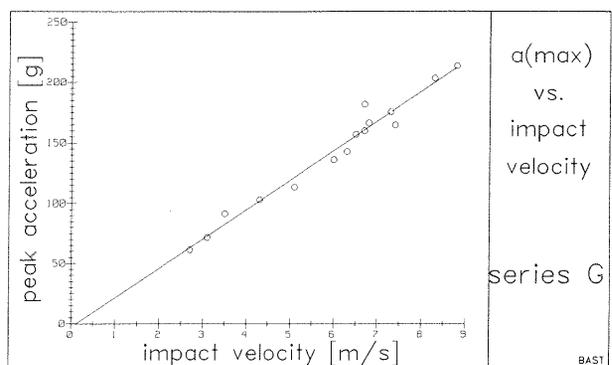


Bild 4: a(max)/Anprallgeschwindigkeit, Versuche G1–G19

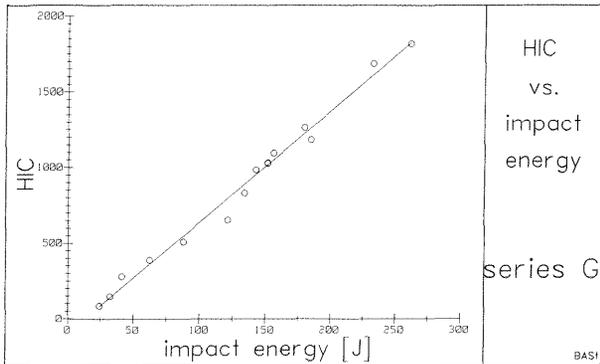


Bild 5: HIC / Anprallenergie, Fallversuche G1 – G19

### 3.2 Zusammenhang zwischen HIC und a(max)

Beim genauen Betrachten der Werte von HIC und a(max) läßt sich ein Zusammenhang zwischen beiden Größen vermuten. In Bild 6 sind für die Versuche mit einer Anprallgeschwindigkeit von 6,8 – 7 m/s die HIC-Werte gegen die maximale Beschleunigung aufgetragen. Um eine bessere Statistik zu bekommen, sind zusätzlich Werte von der MPA-Stuttgart und vom TÜV-Rheinland [6] berücksichtigt worden. Die entsprechenden Versuche wurden im selben Geschwindigkeitsbereich ebenfalls auf einen flachen Amboß durchgeführt. Durch die Hinzunahme weiterer Meßwerte ist eine realitätsnähere Funktionsanpassung möglich, als in [7] allein aus den Werten der BAST vorgeschlagen. Alle berücksichtigten Meßwerte sind in Tabelle A6 im Anhang aufgelistet.

Eine Gerade als funktionaler Zusammenhang zwischen beiden Größen liefert keine befriedigende Beschreibung, die Abzisse wird weit vom Koordinatenursprung geschnitten. Ein besserer Ansatz geht von der Idee aus, daß für jeden analytisch darstellbaren Beschleunigungs/Zeit-Verlauf der HIC darstellbar ist als (vgl. [8]):

$$HIC = \text{const.} \cdot a(\text{max})^{2,5} \cdot t \tag{2}$$

Dies führt zur Vermutung, daß der HIC proportional zu  $a^{2,5}$  ist. Unter der Annahme eines analytisch darstellbaren Verlaufs ist die Geschwindigkeit jedoch proportional zu  $a \cdot t$ , so daß hier der Zusammenhang zwischen HIC und a mit einer Potenz 1,5 zu beschreiben wäre. Für den allgemeinen Fall kann also angenommen werden:

$$HIC = A \cdot a(\text{max})^B \tag{3}$$

mit:

$$1,5 \leq B \leq 2,5. \tag{3a}$$

Die Anpassung dieser Funktion an die Meßwerte ergibt folgende Werte für A und B:

$$A = 0,0526 \quad (0,0468 - 0,0570)$$

$$B = 1,942$$

Der Zahlenwert für B liegt somit innerhalb des Erwartungsbereiches, das Bestimmtheitsmaß  $r^2$  beträgt 0.910 (für Gerade  $r^2 = 0,898$ ). Die Fehlergrenzen für A bei festgehaltenem B wurden dadurch bestimmt, daß 66 % der Meßwerte innerhalb der Fehlergrenzen liegen müssen (Gauß'sche Fehlerrechnung). Der Fehler wurde für Abweichungen nach unten und nach oben getrennt bestimmt. Ein Test für die Richtigkeit dieses Vorgehens ist die Forderung, daß je maximal ein Meßwert außerhalb des dreifachen Fehlers liegen darf. Der Test zeigt, daß keiner der Meßwerte außerhalb liegt und somit der angegebene Fehler als sinnvoll anzusehen ist.

Aus der Funktionsanpassung ist zu entnehmen, daß eine maximale Beschleunigung von 300 g einem HIC von 3399 (3023 – 3678) entspricht.

Abbildung 7 zeigt den funktionalen Zusammenhang zwischen HIC und a(max) innerhalb der einfachen Fehlergrenze. Eine Auflistung der entsprechenden Wertepaare in Beschleunigungsabständen von 5 g befindet sich in Tabelle A7.

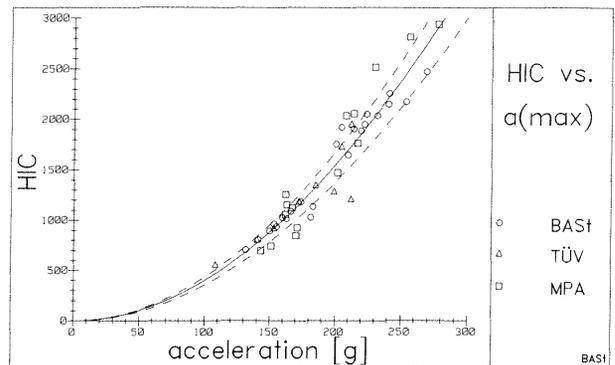


Bild 6: HIC in Abhängigkeit von a(max), Meßwerte und angepaßte Funktion (3) mit Fehlerbereich

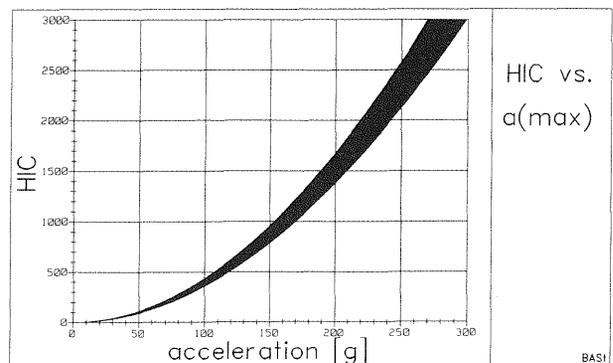


Bild 7: Bandbreite der möglichen HIC-Werte für eine gegebene maximale Beschleunigung

### 3.3 Anstieg der Beschleunigung

Bei den Helmfallversuchen wurde zusätzlich eine Auswertung des Anstiegs der Beschleunigung vorgenommen.

Die Auswertung erfolgte nach [9]. An die Beschleunigungswerte während des Anstiegs des Signals wurde eine Gerade angepaßt. Berücksichtigt wurden dabei nur die Werte von 20 % bis 80 % der maximalen Beschleunigung. Ermittelt wurden Beschleunigungsanstiege bis zu  $2 \cdot 10^5$  g/s (vgl. Bild 8 unten auf dieser Seite und Tabelle A2 im Anhang) beim Anprall im Bereich P, was nach [9] nicht mehr als moderat zu bezeichnen ist. Beim Anprall an Punkt B wurde  $10^5$  g/s nie überschritten.

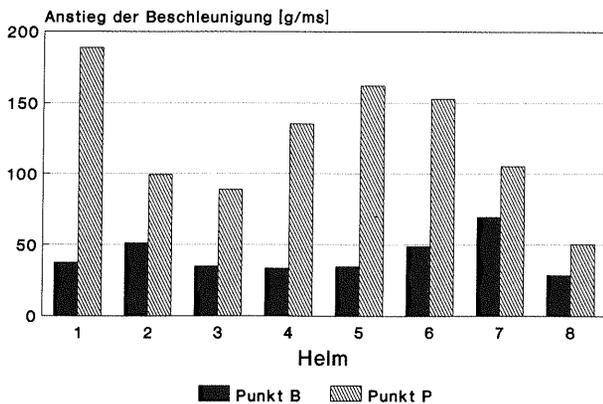


Bild 8: Anstieg der Beschleunigung in  $10^3$  g/s (= g/ms) für die Versuche B1-B8 und P1-P8

### 3.4 Weitere Auswertungen der Helmfallversuche

Durch zweifache Integration des Beschleunigungssignals läßt sich die Eindrückung des Schutzpolsters ermitteln, vgl. hierzu Abbildungen im Anhang 3, in Bild 10 und in Tabelle A3 ist die maximale Eindrückung dargestellt. Auffallend ist, daß bei Beaufschlagungen auf Punkt B Eindrückungen bestimmt wurden, die wohl in der Größenordnung der Schutzpolsterdicke selbst sind. Der Grund dafür wird im nächsten Kapitel erläutert.

Aus der einfachen Integration des Beschleunigungssignals ebenso wie aus der Filmauswertung wurden die Rückprallgeschwindigkeiten ermittelt (vgl. Bild 11 für Versuche B1-B8 und P1-P8). In Tabelle A1 im Anhang sind diese für alle Versuche aufgelistet, in Tabelle A4 die daraus berechneten Rückprallenergien (vgl. auch Bild 12).

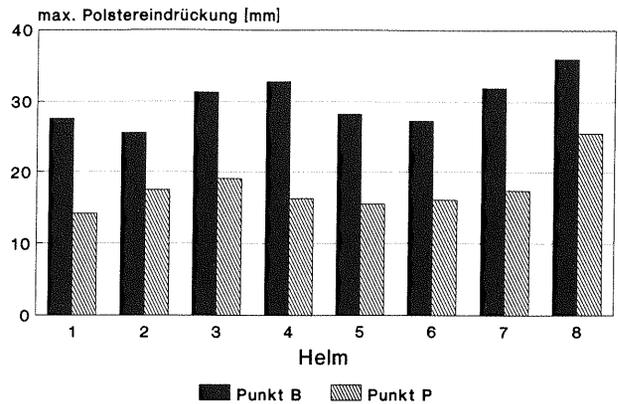


Bild 9: Maximale Polstereindrückungen für die Versuche B1-B8 und P1-P8

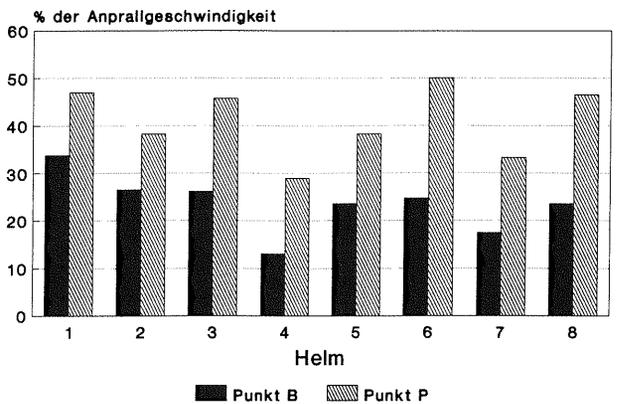


Bild 10: Rückprallgeschwindigkeiten in Prozent der Anprallgeschwindigkeit aus der Integration des Beschleunigungssignals, Versuche B1-B8 und P1-P8

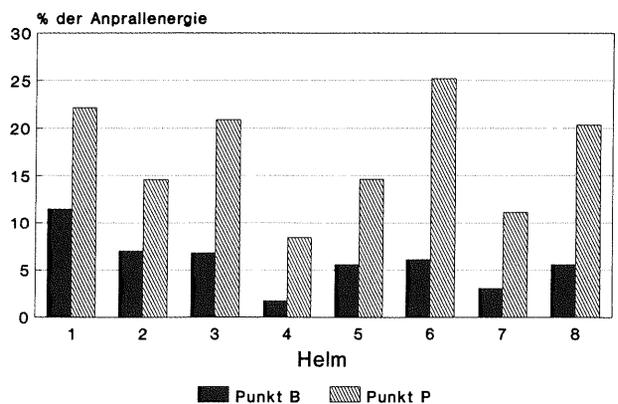


Bild 11: Rückprallenergien in Prozent der Anprallenergie aus der Integration des Beschleunigungssignals, Versuche B1-B8 und P1-P8

### 3.5 Rotatorische Beschleunigung des Prüfkopfes

Auffallend ist die stets geringere maximale Verzögerung bei Fallversuchen auf den Stirnpunkt B. Aus den Hochgeschwindigkeitsfilmen ist zu entnehmen, daß sich der Prüfkopf im Helm während des Aufprallvorganges dreht. Die Ursache dafür ist, daß der Schwerpunkt des Prüfkopfes nicht senkrecht über der Aufschlagstelle ist (vgl. Bild 12). Der

Schwerpunkt ist bestrebt, sich weiter geradlinig in seiner Bewegungsrichtung fortzubewegen; der versetzte Aufprallpunkt führt somit zu einem Drehmoment im Kopf. Die Drehbewegung überträgt sich auf den Helm. Bei Anprallgeschwindigkeiten von 7 m/s dreht sich das rückprallende System Helm-Pruefkopf schließlich mit Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 17 rad/s (vgl. Tabelle A3).

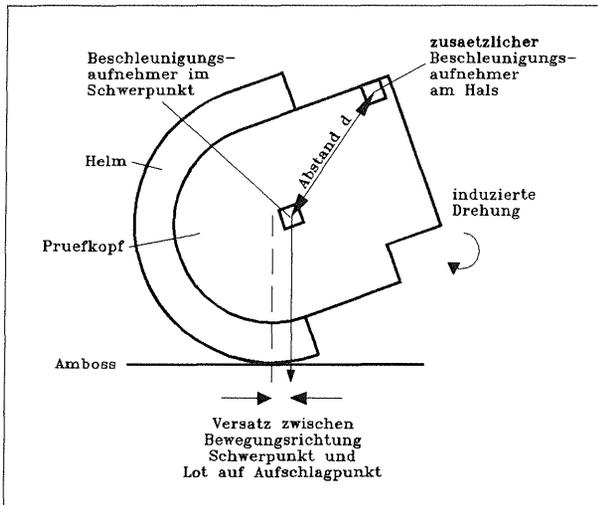


Bild 12: Auftreffen des Systems Pruefkopf-Helm auf den Amboss

Durch die induzierte Drehbewegung wird der Verzögerungsweg für den Schwerpunkt, in dem der Beschleunigungsaufnehmer befestigt ist, länger und die resultierende Beschleunigung entsprechend kleiner. Dieses kann als Hauptursache dafür gewertet werden, daß ein Anprall an Stirnpunkt B als weicher erscheint. Damit ist auch erklärt, warum der Verzögerungsweg länger sein kann als die Schutzpolsterung dick ist.

Während des Anprallvorgangs wird die kinetische Energie nicht nur in Deformationsarbeit und Rückprallenergie umgewandelt, sondern auch in Rotationsenergie. Das aus einem Pendelversuch bestimmte Trägheitsmoment beträgt für das System Pruefkopf-Helm A 0,055 kg/m<sup>2</sup>. Damit ergibt sich bei einer Winkelgeschwindigkeit von 20 rad/s eine Rotationsenergie von 11 J, die im Vergleich zur Anprallenergie von 166 J (bei einer Anprallgeschwindigkeit von 7 m/s) allerdings verhältnismäßig gering ist.

Interessant im Zusammenhang mit der Drehbewegung ist das Auftreten von Rotationsbeschleunigungen. Um diese zu messen, wurde am Hals des Pruefkopfes ein zweiter Beschleunigungsaufnehmer angebracht (vgl. Abb. 12). Im Falle einer Rotationsbewegung um eine beliebige Achse, die rechtwinklig zur senkrechten Mittelebene des Pruefkop-

fes ist, kann die Rotationsbeschleunigung  $b(\text{rot})$  angenähert werden durch den Absolutbetrag der Differenz zwischen der resultierenden Beschleunigung im Schwerpunkt  $a_{\text{res}}(\text{SP})$  und der resultierenden Beschleunigung am Hals  $a_{\text{res}}(\text{Hals})$  dividiert durch den Abstand  $d$  der Beschleunigungsaufnehmer:

$$b(\text{rot}) = \left| a_{\text{res}}(\text{SP}) - a_{\text{res}}(\text{Hals}) \right| / d \quad (4)$$

Streng genommen müßten die einzelnen Komponenten der Beschleunigungen getrennt betrachtet werden. Im vorliegenden Fall, für den angenommen werden kann, daß  $|a_{\text{res}}(\text{SP}) - a_{\text{res}}(\text{Hals})|$  klein ist gegen die einzelnen resultierenden Beschleunigungen und daß die Richtungen von  $a_{\text{res}}(\text{SP})$  und  $a_{\text{res}}(\text{Hals})$  um weniger als 30° von der Senkrechten auf die Verbindungsachse der Beschleunigungsaufnehmer abweichen, ist der Fehler im Vergleich zur exakten Rechnung jedoch kleiner als 15 %.

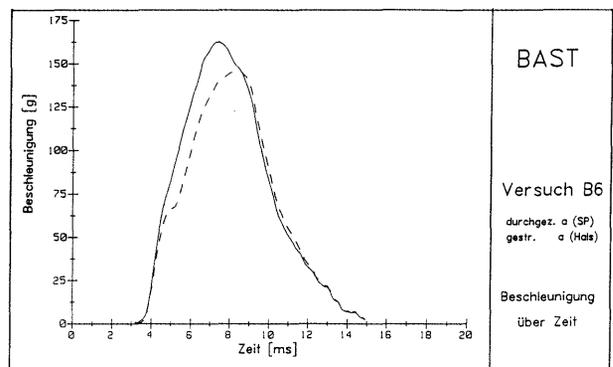


Bild 13:  $a_{\text{res}}(\text{SP})$  und  $a_{\text{res}}(\text{Hals})$  / Zeit, Fallversuch B6

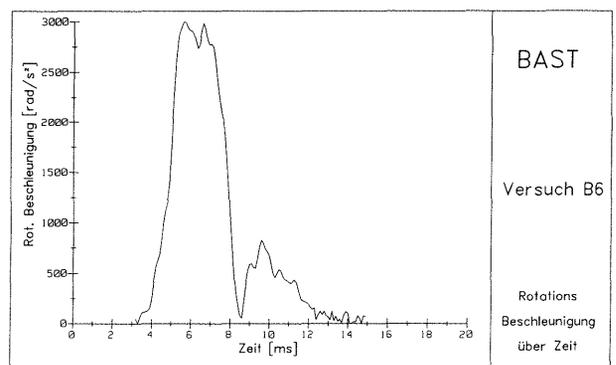


Bild 14:  $b(\text{rot})$  / Zeit, Fallversuch B6

Ein Teil der beschriebenen Versuche wurde mit dieser Meßanordnung durchgeführt. In Abbildung 13 sind die Beschleunigungen von beiden Aufnehmern dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß sich im ersten Moment nach dem Aufschlag beide Punkte des Kopfes parallel bewegen, denn beide Beschleunigungen sind gleich, danach wird der Hals weniger stark verzögert: die Rotation wird nun eingeleitet. In der Abbildung 14 ist die nach (4) be-

rechnete Rotationsbeschleunigung dargestellt. Für diese ergeben sich bei den Versuchen B1 – B8 und G19 Werte im Bereich von  $b(\text{rot}) = 2,4 \text{ krad/s}^2 - 4,8 \text{ krad/s}^2$ . Im Anhang befinden sich weitere Darstellungen entsprechender Verläufe.

Für den Anprall an den Scheitelpunkt ist die Bestimmung von  $b(\text{rot})$  nach (4) nicht möglich. Die im Hochgeschwindigkeitsfilm beobachteten Drehgeschwindigkeiten beim Rückprall sind für diesen Fall vergleichsweise gering.

#### 4 Vergleich der Kopfbeschleunigungen bei PKW-Crash-Testen und Fallversuchen gemäß ECE-R 22

Für die Ermittlung der Kopfbelastung des Dummys beim PKW-Crash-Versuch ist der HIC als Verletzungskriterium etabliert. Das erscheint für den komplexen Verlauf der Kopfbeschleunigungen sinnvoll: ein numerisches Rechenverfahren bestimmt das Zeitintervall für die größte Kopfbelastung und ordnet dieser einen Zahlenwert zu. Es besteht kein Zusammenhang zwischen HIC,  $a(\text{max})$  und  $a(3 \text{ ms})$ , so daß eine Bewertung nach anderen Größen eine andere Rangfolge der einzelnen Versuche ergeben würde.

Für die Fallversuche läßt sich jedoch ein enger Zusammenhang zwischen HIC und  $a(\text{max})$  feststellen. Die Einführung des HIC als Bewertungsgröße für die Güte der Stoßdämpfung eines Helmes ist somit nicht unbedingt erforderlich, allerdings gilt das nur für Helme, die sich zur Zeit auf dem Markt befinden, vgl. Kapitel 5 und 6. Anzumerken ist, daß die ECE-R 22 HIC-Werte von bis zu etwa 3400 zuläßt, was mehr als dem dreifachen der Toleranzgrenze von FMVSS 208 entspräche. Nicht außer acht gelassen werden sollte jedoch, daß die Berechnungsintervalle für den HIC bei den Fallversuchen sehr kurz sind. Bei den Versuchen, bei denen der HIC über 1000 ist, liegen sie zwischen 3,4 ms und 5,6 ms (vgl. Bild 15). Gerade aber für den Bereich dieser kurzen Zeiten ist der HIC stark kritisiert worden [10].

Eine größere Beachtung als bisher sollte der Rotationsbeschleunigung geschenkt werden. In den hier geschilderten Fallversuchen wurden Werte von  $2,4 \text{ krad/s}^2$  bis  $4,8 \text{ krad/s}^2$  abgeschätzt. Selbst wenn in Fallversuchen ein idealisierter Vorgang betrachtet wird, geben diese Zahlen einen Anhaltspunkt über ihre Größenordnung im realen Unfall. Wie sie im Vergleich zu den parallel auftretenden translatorischen Beschleunigungen zu bewerten

sind, läßt sich aus dem GAMBIT-Toleranzkriterium [11] ersehen. GAMBIT definiert einen Zusammenhang G, der den Wert 1 nicht übersteigen darf [11]:

$$G = a(\text{max})/250 + b(\text{rot})/10\,000 < 1. \tag{5}$$

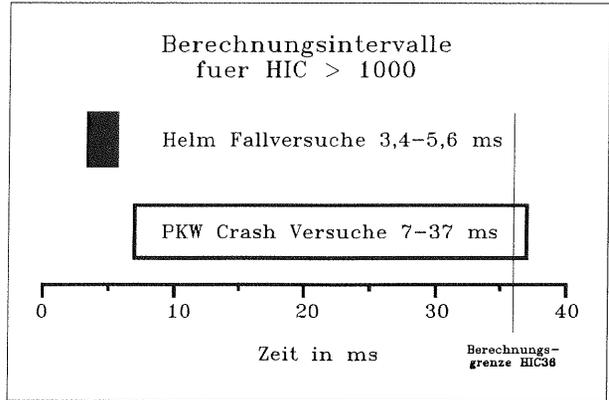


Bild 15: Berechnungsintervalle für HIC > 1000

Dabei hat  $a(\text{max})$  die Einheit g und  $b(\text{rot})$  die Einheit  $\text{rad/s}^2$ . In Abbildung 16 sind für die Versuche B1 – B8 und G10 die jeweiligen Anteile nach Gleichung (5) dargestellt. Auffällig ist, daß die G-Werte für Helme mit GFK-Schale größtenteils höher liegen, in zwei Fällen wird die Toleranzgrenze  $G = 1$  überschritten.

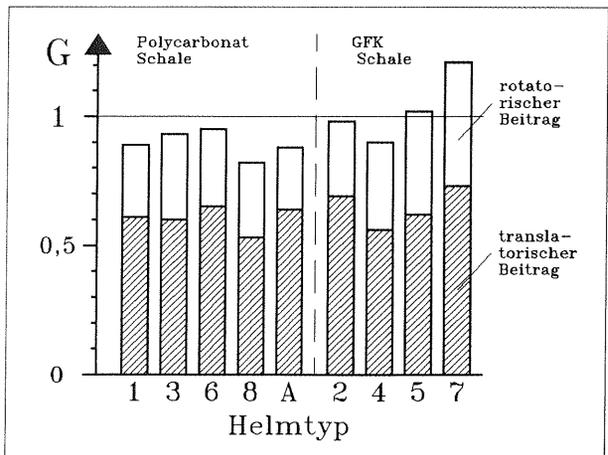


Bild 16: Rotatorischer und translatorischer Anteil der Kopfbelastung bei Fallversuchen B1 – B8 und G19

#### 5 Grenzen der Helmentwicklung

In diesem Kapitel sollen einige Anmerkungen darüber gegeben werden, welche Verbesserungen der Stoßdämpfung bei Schutzhelmen möglich sind. Dabei soll jeweils von einer Anprallgeschwindigkeit von 7 m/s ausgegangen werden. Das Kapitel teilt sich in zwei Unterkapitel, im ersten wird die Verbesserung diskutiert, die durch eine Reduktion der Rückprallge-

schwindigkeit des Systems Prüfkopf/Helm möglich wäre, im zweiten werden die Vorteile optimierter Beschleunigung/Zeit-Verläufe beim Helmtest diskutiert.

## 5.1 Verbesserungsmöglichkeiten der Schutzhelme durch Reduktion der Rückprallgeschwindigkeiten

Rückprallgeschwindigkeiten des Systems Prüfkopf/Helm können bis zu 50 % der Anprallenergie betragen, vgl. Tabelle A1. Eine Reduktion der maximalen Beschleunigung ist aber nicht zu erwarten, wenn nur die Rückprallgeschwindigkeiten reduziert werden: die größte Beschleunigung tritt immer während des Abbremsvorganges des Prüfkopfes auf und nie während der „Beschleunigung“ auf die Rückprallgeschwindigkeit. Anders ist es jedoch beim HIC, hier geht die „Rückbeschleunigung“ ebenfalls in die Berechnung ein.

Für die Versuche B1–B8 und P1–P8 wurde die Reduktion der HIC-Werte bestimmt, die sich ergeben würde, wenn die Anteile des Beschleunigungssignals beim Rückprallvorgang unberücksichtigt blieben. Dabei ergibt sich für die Versuche auf Bereich P eine durchschnittlich mögliche Reduktion von 13,8 % (9,0 % – 16,7 % in den einzelnen Versuchen), bei den Versuchen auf Punkt B eine Reduktion von nur 1,0 % (0,0 % – 3,2 %), vgl. auch Tabelle A5 im Anhang. Die Ergebnisse für die Versuche P1–P8 (Bereich P) sind in Bild 17 dargestellt.

Die auf den ersten Anschein geringen Reduktionen der HIC-Werte sind verständlich, wenn man bedenkt, daß die Beschleunigung mit der Potenz 2,5 in die HIC-Berechnung eingeht, jedoch nur linear in die Geschwindigkeit. Die Verbesserungsmöglichkeiten für Schutzhelme allein durch eine Erhöhung der Energieabsorption in der Schutzpolsterung sind also gering.

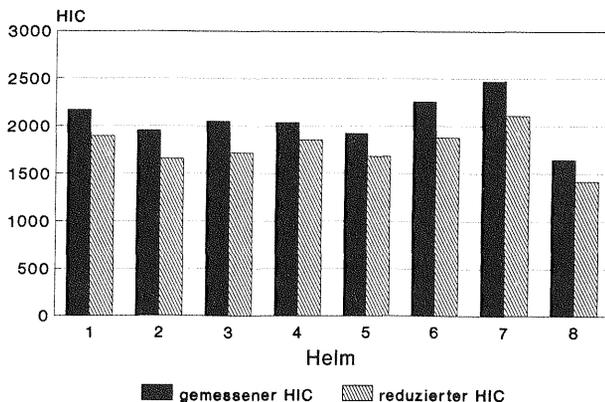


Bild 17: Vergleich zwischen berechnetem HIC aus der Versuchsserie P1–P8 und reduziertem HIC unter der Annahme, daß die Rückprallgeschwindigkeit gleich Null ist

## 5.2 Verbesserungsmöglichkeiten durch optimiertes Beschleunigungs/Zeit-Verhalten

Eine Optimierung des Beschleunigungs/Zeit-Verhaltens ( $a/t$ ) bei der Helmprüfung bedeutet gleichzeitig eine Änderung der Kraft/Weg-Kennung ( $F/x$ ) der Schutzpolsterung.

Folgende  $a/t$ -Verläufe sollen im weiteren diskutiert werden (vgl. [8]):

1. rechteckiger  $a/t$ -Verlauf

$$a(t) = \text{const} = a(\text{max}) \quad (6)$$

2. Sinus-förmiger Verlauf (Viertelsinus)

$$a = a(\text{max}) * \sin(t) \quad (7)$$

3. Cosinus-förmiger Verlauf (Inverser Halbcosinus)

$$a(t) = -a(\text{max})/2 * \cos(t) + a(\text{max})/2 \quad (8)$$

4. Dreieck-förmiger Verlauf

$$a(t) = a(\text{max}) * t/T_1 \text{ für } t \leq T_1 \quad (9)$$

Die  $a/t$ -Verläufe sind in Abbildung 18 dargestellt. Es wird stets angenommen, daß in dem hypothetischen Fallversuch sämtliche Energie in der Schutzpolsterung absorbiert wird, so daß die Rückprallgeschwindigkeit gleich Null ist. Daher gehen die  $a/t$ -Verläufe (7–9) nach ihrem Maximum sofort auf Null zurück.

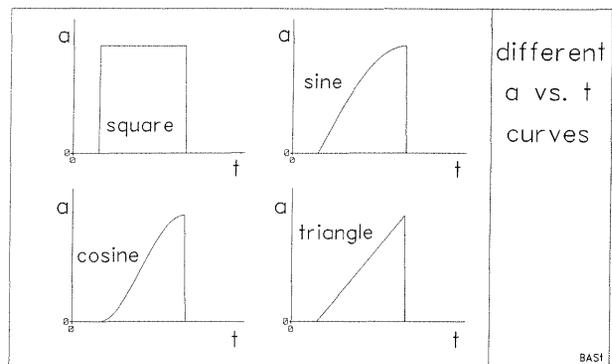


Bild 18: Theoretische Beschleunigung/Zeit-Verläufe

Ein rechteckiger  $a/t$ -Verlauf (6) bedeutet, daß die Kraft unabhängig vom Weg ist, das wiederum bedeutet, daß selbst bei niedrigeren Aufprallgeschwindigkeiten beim Helmtest die selben  $a(\text{max})$  auftreten. Ein Sinus-förmiger  $a/t$ -Verlauf (7) bedeutet, daß die Kraft linear mit dem Weg zunimmt, in diesem Fall ist  $a(\text{max})$  bei niedrigeren Anprallgeschwindigkeiten ebenfalls kleiner. Cosinus-förmige (8) oder Dreieck-förmige (9)  $a/t$ -Verläufe haben eine progressiv steigende Beziehung zwischen Kraft

und Weg. Für niedrigere Anprallgeschwindigkeiten gilt auch hier, daß  $a(\max)$  kleiner ist.

Ist der funktionale Zusammenhang zwischen  $a$  und  $t$  bekannt läßt sich für eine feste Anprallgeschwindigkeit (in folgenden 7 m/s) die Beschleunigung  $a(\max)$  und der HIC in Abhängigkeit von der maximalen Eindringtiefe der Schutzpolsterung berechnen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 19 und 20 dargestellt. Die Berechnung des HIC erfolgte nach [8]. Deutlich ist zu erkennen, daß der rechteckige  $a/t$ -Verlauf bei einer gegebenen Eindringungstiefe den geringsten HIC und die geringste max. Beschleunigung liefert. Der Sinus-förmige  $a/t$ -Verlauf hat von den bisher behandelten Verläufen die zweitbesten Ergebnisse.

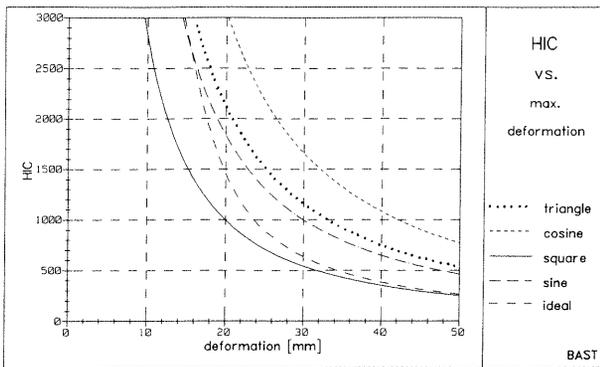


Bild 19: HIC gegen maximale Schutzpolstereindrückung für verschiedene theoretische  $a/t$ -Verläufe

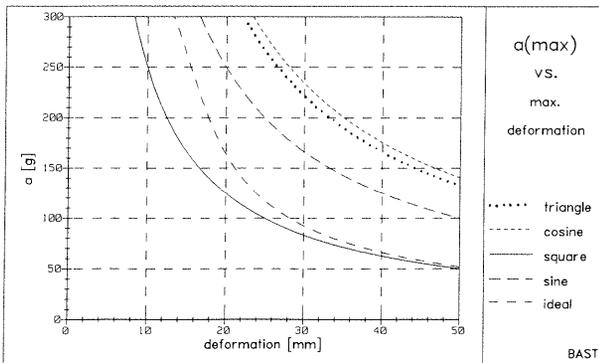


Bild 20:  $a(\max)$  gegen maximale Schutzpolstereindrückung für verschiedene theoretische  $a/t$ -Verläufe

Ein großer Kritikpunkt an dem rechteckigen  $a/t$ -Verlauf ist, daß der Beschleunigungsanstieg am Anfang und am Ende des Signals unendlich ist. Dieses ist zum einen technisch nicht erfüllbar, zum zweiten biomechanisch bedenklich (vgl. [9]). Daher soll noch ein weiterer  $a/t$ -Verlauf diskutiert werden (vgl. Bild 21), dieser  $a/t$ -Verlauf wird im weiteren als „idealer Verlauf“ bezeichnet.

Beim „idealen Verlauf“ steigt das Beschleunigungssignal mit einer Steigung von  $10^5$  g/s an, mit

Erreichen des Maximalwertes bleibt es konstant bis zur maximalen Eindrückung (was ebenfalls bedeutet, daß die Geschwindigkeit gleich Null ist) und fällt dann wiederum mit  $10^5$  g/s auf Null ab. Es resultiert also eine leichte Rückprallgeschwindigkeit, die sich aber generell nicht vermeiden läßt, wenn gefordert wird, daß der Abfall des Beschleunigungssignales ebenfalls in endlich kurzer Zeit erfolgen soll. Es kann an dieser Stelle nicht diskutiert werden, ob die Grenze für den Beschleunigungsanstieg bzw. -Abfall tatsächlich bei  $10^5$  g/s zu ziehen ist. Für die weitere Diskussion ist es vielmehr interessant zu sehen, welche Auswirkungen eine solche Grenze auf die Eindringtiefe der Schutzpolsterung hat.

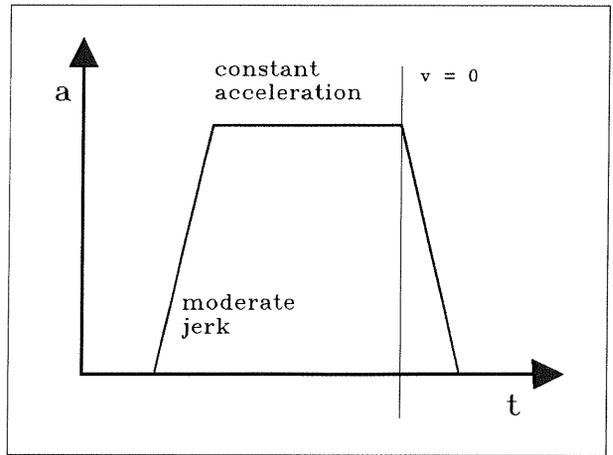


Bild 21: „Idealer“  $a/t$ -Verlauf

HIC und  $a(\max)$  in Abhängigkeit von der maximalen Eindrückung für den „Ideal-Verlauf“ sind ebenfalls in den Abbildungen 15 und 16 eingezeichnet. Für Polstereindrückungen über 30 mm unterscheiden sich die entsprechenden HIC und  $a(\max)$  wenig von denen des rechteckigen Verlaufs. Bei kleineren Eindrückungen werden die Abweichungen groß, das liegt daran, daß der Zeitanteil, bei dem das Signal konstant ist, mit abnehmender maximaler Polstereindrückung immer kürzer wird. In gleicher Weise wird der Zeitraum, in dem das Signal ansteigt oder abfällt, größer, das Signal nähert sich einem Dreieck-förmigen Verlauf an.

Schutzpolsterungsdicken herkömmlicher Motorradhelme betragen etwa 30 mm – 40 mm. Es ist wenig realistisch anzunehmen, daß zukünftige Motorradhelme über eine dickere Schutzpolsterung verfügen können, denn es sind ebenfalls Grenzen für den Helmumfang durch die Aktive Sicherheit gesetzt (Gewicht, Winddruck, Sicht etc.). Wird angenommen, daß bei einem idealen Dämpfungsmaterial das Material bis auf 25 % der ursprünglichen Dicke zusammengedrückt werden kann, so ergeben

sich mögliche Verzögerungswege  $x(\max)$  von 23 mm–30 mm. In der folgenden Tabelle 6 sind für diese jeweils die HIC und  $a(\max)$  für die verschiedenen a/t-Verläufe dargestellt. Die angenommene Anprallgeschwindigkeit beträgt wiederum 7 m/s.

a/t Verlauf	x (max)	HIC	a (max)
Rechteck	23 mm	811	109 g
	30 mm	544	83 g
Sinus	23 mm	1 492	218 g
	30 mm	1 006	167 g
Cosinus	23 mm	2 454	304 g
	30 mm	1 660	234 g
Dreieck	23 mm	1 721	288 g
	30 mm	1 157	221 g
Ideal	23 mm	1 077	134 g
	30 mm	637	93 g

Tab. 6: HIC und  $a(\max)$  in Abhängigkeit von der Eindrücktiefe bei verschiedenen a/t-Verläufen

Es ist zu bemerken, daß bei einem Verzögerungsweg von 23 mm nur bei einem rechteckigen a/t-Verlauf ein HIC von unter 1000 erreicht werden kann, bei 30 mm jedoch auch mit dem Idealverlauf, der Sinus-förmige Verlauf liefert hier einen HIC von 1006.

Wie sich reale a/t-Verläufe (aus Versuchen P1–P8 und B1–B8) im Vergleich zu den hypothetischen darstellen, wird in Bild 22 und 23 gezeigt. Die meisten Meßwerte liegen zwischen dem rechteckigen und dem Sinus-förmigen a/t-Verlauf. Steile Anstiege der Beschleunigung von bis zu  $2 \cdot 10^5$  g/s bewirken, daß die Meßwerte für Anpralbereich P teilweise links vom „Idealverlauf“ liegen. Für Punkt B sind die Verzögerungswege wegen der induzierten Drehung (vgl. Kapitel 3.5) sehr groß, für Bereich P liegen sie bis auf eine Ausnahme alle unter 20 mm (vgl. auch Tabelle A3).

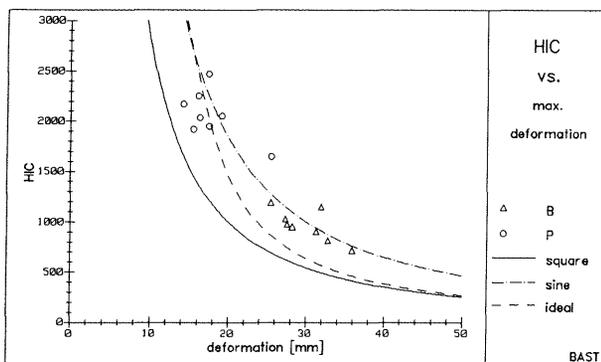


Bild 22: HIC gegen maximale Schutzpolstereindrückung, Testreihe P1-P8 und B1-B8 und theor. a/t-Verläufe

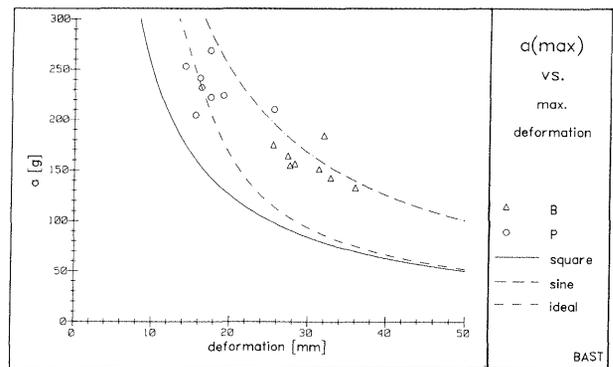


Bild 23:  $a(\max)$  gegen maximale Schutzpolstereindrückung, Testreihe P1-P8 und B1-B8 und theor. a/t-Verläufe

Mit den Eindrücktiefen der einzelnen Versuche lassen sich die Reduktionsmöglichkeiten von HIC und  $a(\max)$  für die Annahme berechnen, daß der a/t-Verlauf rechteckig ist (vgl. auch Tabelle A5 im Anhang). Für Versuche P1 – P8 ergibt sich unter dieser Annahme eine gemittelte Verringerung des HIC um 39,2 % (23,2 % – 58,2 % in den einzelnen Versuchen), für  $a(\max)$  um 37,3 % (21,6 % – 53,5 %). Nur in einem Fall würde der HIC auf einen Wert von unter 1000 reduziert. Bild 24 zeigt die mögliche HIC-Reduktion für die Versuche P1–P8.

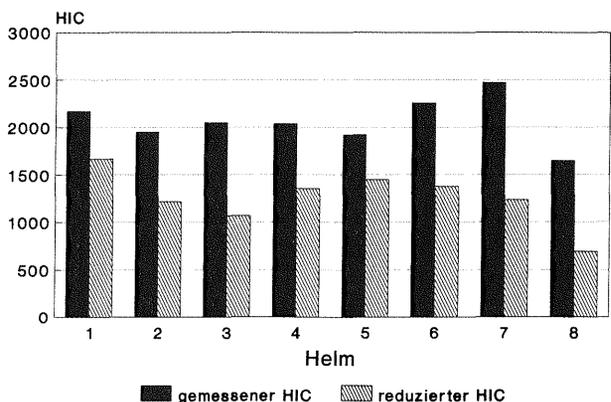


Bild 24: Vergleich zwischen berechnetem HIC aus der Versuchsserie P1 – P8 und reduzierten HIC-Werten unter der Annahme eines rechteckigen a/t-Verlaufs

Für die Versuche B1 – B8 ergibt sich für den HIC eine Reduktion von 42 % (36,4 % – 56,5 %) und für  $a(\max)$  46,1 % (41,1 % – 57,2 %), wobei aber wiederum anzumerken ist, daß die ohnehin vergleichsweise niedrigen Testwerte aus der induzierten Rotation herrühren. Lassen wir das Verbesserungspotential für Punkt B im weiteren also außer Betracht

Für Bereich P stellt sich die Frage, mit wieviel mehr Verzögerungsweg eine gleiche Reduktion der Meßwerte zu erreichen wäre. Die mittlere Eindrücktiefe aller Versuche auf Bereich P beträgt 17,7 mm. Wird

der Sinus-förmige a/t-Verlauf, der von allen a/t-Verläufen dem realen anscheinend am besten entspricht (vgl. Bild 22 und 23), zu Grunde gelegt, so ist festzustellen, daß für eine HIC-Reduktion um 39,2 % lediglich 6,8 mm mehr Weg nötig sind, für eine Reduktion von a(max) um 37,3 % 10,4 mm. Wird der „Ideal-Verlauf“ zu Grunde gelegt, ist die erforderliche Vergrößerung des Weges noch geringer.

Bei künftigen Helmentwicklungen sollte also Wert auf einen möglich großen Verzögerungsweg gelegt werden. Mit einem durchschnittlichen Verzögerungsweg von 17,7 mm im Bereich P lassen sich selbst im theoretisch besten Fall keine HIC-Werte von unter 1200 erreichen. Ein Verformungsweg von etwa 30 mm sollte angestrebt werden, so lassen sich mit 2 der 5 diskutierten a/t-Verläufe (Rechteck und „Ideal“) HIC-Werte von weniger als 1000 erreichen, für den Sinus-förmigen Verlauf läge der HIC-Wert nur knapp über der HIC = 1000 Grenze. Die Werte für die max. Beschleunigung sind für die 2 Verläufe mit dem geringsten HIC unter 100 g, für den Sinus-förmigen Verlauf ist a(max) 167 g.

Daß Verzögerungswege von mehr als 25 mm auch bei heutigen Helmen möglich sind, zeigt der Versuch P8. Der a/t-Verlauf bei diesem Helm ist jedoch so ungünstig, daß ein für diesen Weg verhältnismäßig hoher HIC (1648) und a(max) (209,9 g) errechnet wird (vgl. Abb. 18 und 19).

Eine deutliche Verbesserung der Motorradschutzhelme wird erst dann möglich sein, wenn in der Prüfung gemäß ECE-R 22 der sogenannte Zweitschlag entfällt. Denn solange dieser existiert, muß die Schutzpolsterung für den zweiten Schlag auf den halbrunden Amboß eine „Reserve-Stoßabsorptionsfähigkeit“ behalten und dieses schließt eine optimale Ausnutzung der Dämpfungsmöglichkeiten beim ersten Schlag aus.

## 6 Schlußbetrachtungen

Die vorliegende Arbeit bestätigt, daß die Grenzwerte für die Kopfbelastung beim Test von Motorradschutzhelmen weitaus weniger streng sind als beim PKW-Crash-Versuch, wo ein HIC von 1000 gefordert wird. Bei einer gegebenen Aufprallgeschwindigkeit von 7 m/s lassen sich von Helmen mit normalen Schutzpolsterdicken theoretisch aber auch HIC-Werte von unter 1000 und maximale Beschleunigungen von weniger als 100 g erreichen. Voraussetzung dafür ist jedoch eine optimale Ausnutzung des Verzögerungsweges, der geforderte Zweit-

schlag bei ECE-R 22 verhindert das jedoch bei heutigen Motorradhelmen.

Für den Fall der Abschaffung des Zweitschlages, was seit einiger Zeit in der Diskussion ist, können aus den Betrachtungen in Kapitel 5 neue mögliche Grenzwerte für die Helmprüfung abgeleitet werden. Aus Tabelle 6 ist zu entnehmen daß für den kleineren Verzögerungsweg von 23 mm bei dem optimalen rechteckigen a/t-Verlauf ein HIC von 811 und ein a(max) von 109 g errechnet wird. Ein Helm hat jedoch auch annehmbare Beschleunigungswerte bei Beaufschlagungen auf andere Amboßformen, z. B. auf den halbrunden Amboß bei ECE-R 22, zu liefern. Eine Optimierung der Schutzpolsterung kann somit immer nur einen Kompromiß darstellen, die theoretisch besten Grenzwerte können somit nur als grober Anhaltspunkt dienen.

Wird daher davon ausgegangen, daß ein realistischer Helm nur etwa halb so gute Beschleunigungswerte einhalten kann wie ein optimaler theoretischer, so ließe sich ein HIC-Wert von 1500 oder eine maximale Beschleunigung von 200 ng fordern. Zwar gibt es für keinen dieser Grenzwerte eine biomechanische Begründung, doch sind sie im Gegensatz zu den derzeitigen Grenzwerten erfreulich klein.

Im Hinblick auf eine mögliche, von heutigen Helmen abweichende Kraft/Weg-Charakteristik der Schutzpolsterung ist einem HIC von 1500 der Vorzug als Kopfschutzkriterium zu geben, denn eine maximal zulässige Beschleunigung von 200 g könnte einem HIC von über 2000 entsprechen. Zwar ist die Kritik am HIC für zeitlich kurze Berechnungsintervalle (vgl. [10]) nicht von der Hand zu weisen, der HIC ist jedoch das einzige etablierte Kopfschutzkriterium, das ebenfalls eine zeitliche Bewertung der Kopfbeschleunigung zuläßt.

Streng genommen könnte dieser neue Grenzwert aber nur eine Verbesserung der Stoßdämpfung im Bereich P bewirken, bei Punkt B und auch Punkt X wird er bereits von einigen Helmen erfüllt [6]. Beim Aufschlag auf Punkt B handelt es sich jedoch nicht um eine rein lineare Verzögerung, wie in vorliegender Arbeit nachgewiesen wurde. Es tritt ebenfalls eine rotatorische Beschleunigung auf, die insbesondere auch von der Geometrie des Helmes abhängig ist. Es ist davon auszugehen, daß dieses in gleicher Form auch für Punkt X gilt. Der Beschleunigungsaufnehmer im Schwerpunkt des Prüfkopfes ist jedoch nur in der Lage, lineare Beschleunigungen des Prüfkopfes zu erfassen. Weiterer Forschungsbedarf wird daher darin gesehen, optimierte Testbedingungen und -Kriterien für die Punkte B und X zu entwickeln.

## Literatur

- [ 1] ECE-Regelung Nr. 22: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Schutzhelme für Fahrer und Mitfahrer von Krafträdern und Mopeds (Einschließlich Änderung 03 Ergänzung 1 vom 5. Mai 1991). Bonn: Kirschbaum Verlag.
- [ 2] KRAMER, F.: Schutzkriterien für den Fahrzeuginsassen im Falle sagittaler Belastungen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 12 Nr. 137. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990.
- [ 3] § 571 208 Standard No. 208; Occupant Crash Protection. Code of Federal Regulations, Transportation, 49, Parts 400 to 999, Revised as of October 1, 1991. Washington: U.S. Government Printing Office 1991.
- [ 4] FAERBER, E.: Influence of Rigid Wall Impact Speed on Dummy and Vehicle Loadings. 13th ESV Conference. Paris: 1991.
- [ 5] FAEBER, E., WOBLEN, G.-D.: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F1, Bergisch Gladbach, 1993.
- [ 6] KÖNIG, W., WERNER, H., SCHULLER, E., BEIER, G., SPANN, W.: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft F2, Bergisch Gladbach, 1993.  
TÜV Rheinland e.V.: Kennlinienprüfung von Schutzhelmen nach ECE-Regelung Nr. 22. Projekt zur Fahrzeugtechnischen Forschung des BMV Nr. 1.9001. Juni 1990, unveröffentlicht.
- [ 7] ZELLMER, H.: Vergleichende Analyse der Kopfbeschleunigungen bei PKW- und Motorradunfällen aus PKW-Crash Versuchen und Fallversuchen gemäß ECE-R 22. VDI Berichte 1025, Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.
- [ 8] FAERBER, E.: On the Application of the HIC as Head Protection Criterion. IRCOBI Conference 1985.
- [ 9] WALFISCH, G., FAYON, A., TARRIÈRE, C., CHAMOULARD, F., GUILLON, F., GOT, C., PATEL, A. HUREAU, J.: Human Head Tolerance to Impact: Influence of the Jerk (Rate of Onset of Linear Acceleration) on the Occurrence of Brain Injuries. IRCOBI Conference 1981.
- [10] NEWMAN, J. A.: Head Injury Criteria in Automotive Crash Testing. 24. Stapp Car Crash Conference. 1980.
- [11] NEWMAN, J. A.: A Generalized Acceleration Model for Brain Injury Threshold (GAMBIT). IRCOBI Conference 1986.



## Anhang

A1 Tabellen zu den Fallversuchen

A2 Beschleunigung/Zeit-Verläufe der PKW-Versuche

A3 Beschleunigung/Zeit-Verläufe und Kraft/Weg-Kennlinien der Helmversuche

A4 Rotationsbeschleunigungen/Zeit-Verläufe der Helmversuche



## **Anhang 1**

Tabellen zu den Fallversuchen

Versuch	Aufschlag Punkt	h [m]	Geschwindigkeit [m/s]					
			V <sub>o</sub> Ls.	V <sub>o</sub> Fi.	V <sub>e</sub> Ls.	V <sub>e</sub> Fi.	Delta V	
			Ls.	Fi.	Ls.	Fi.	Ls.	Fi.
G01	B	0.4	2.7	2.7	0.7	1.0	3.4	3.7
G02	B	0.6	3.1	3.1	1.2	1.2	4.3	4.3
G03	B	0.8	3.5	3.6	2.1	1.9	5.6	5.5
G04	B	1.0	4.3	4.3	2.4	2.3	6.7	6.6
G07	B	1.6	5.1	5.3	2.1	2.1	7.2	7.4
G09	B	2.0	6.0	5.8	2.0	1.8	8.0	7.6
G10	B	2.2	6.3	6.6	2.4	2.3	8.7	8.9
G11	B	2.4	6.5	6.5	2.5	2.5	9.0	9.0
G12	B	2.6	6.7	/	2.4	/	9.1	/
G13	B	2.8	6.8	6.8	2.7	2.0	9.5	8.8
G14	B	3.0	7.4	7.4	2.5	2.2	9.9	9.6
G16	B	3.5	7.3	/	2.7	/	10.0	/
G17	B	4.0	8.3	8.7	2.4	2.3	10.7	11.0
G18	B	4.5	8.8	9.0	2.1	2.0	10.9	11.0
G19	B	2.8	6.7	6.9	2.5	2.1	9.2	10.0
G20	B-P	2.8	6.8	6.8	3.4	2.8	10.2	9.6
G21	B-P	2.8	6.8	/	3.5	/	10.3	/
G22	B-P	2.8	6.6	6.7	4.0	3.3	10.6	10.0
G23	B-P	2.8	6.8	7.0	3.1	2.5	9.9	9.5
B1	B	2.8	6.8	/	2.3	/	9.1	/
B2	B	2.8	6.8	/	1.8	/	8.6	/
B3	B	2.8	6.9	6.7	1.8	1.4	8.3	8.1
B4	B	2.8	6.9	6.9	0.9	1.0	7.8	7.9
B5	B	2.8	6.8	7.1	1.6	2.0	8.4	9.1
B6	B	2.8	6.9	7.6	1.7	1.2	8.6	8.8
B7	B	2.8	6.9	7.2	1.2	1.1	8.1	8.3
B8	B	2.8	6.8	7.0	1.6	1.2	8.4	8.2
P1	P	2.8	6.8	7.0	3.2	2.8	10.0	9.8
P2	P	2.8	6.8	/	2.6	/	9.4	/
P3	P	2.8	7.0	7.3	3.2	3.3	10.2	10.6
P4	P	2.8	6.9	7.1	2.0	1.9	8.9	9.0
P5	P	2.8	6.8	/	2.6	/	9.4	/
P6	P	2.8	7.0	/	3.5	/	10.5	/
P7	P	2.8	6.9	7.0	2.3	2.5	9.2	9.5
P8	P	2.8	7.1	7.2	3.3	3.0	10.4	10.2

Tabelle A1: Fallversuche I

dargestellt: Versuchsbezeichnung, Aufschlagpunkt, Fallhöhe h Anprallgeschwindigkeit v<sub>o</sub> gemessen durch Lichtschranke (LS) oder aus der Filmauswertung (Fi), Rückprallgeschwindigkeit v<sub>e</sub> aus der Integration des Beschleunigungssignals (Ls) oder aus der Filmauswertung und die Entsprechende Differenz Delta v zwischen v<sub>o</sub> und v<sub>e</sub>.

Versuch	Beschleunigung					Steigung
	a (max) [g]	a (max) [m/s]	a (3ms) [g]	a (20%) [g]	a (80%) [g]	da/dt [10 <sup>5</sup> g/s]
G01	61.3	601.4	45.3	12.3	49.0	0.244
G02	71.5	701.4	58.6	14.3	57.2	0.179
G03	91.3	895.7	75.9	18.3	73.0	0.215
G04	103.0	1010.4	86.6	20.6	82.4	0.185
G07	113.3	1111.5	94.3	22.7	90.6	0.238
G09	135.9	1333.2	103.0	27.2	108.7	0.209
G10	142.6	1398.9	119.8	28.5	114.1	0.359
G11	156.8	1538.2	125.1	31.4	125.4	0.335
G12	181.4	1779.5	121.9	36.3	145.1	0.363
G13	166.0	1628.5	132.1	33.2	132.8	0.366
G14	164.4	1612.8	138.0	32.9	131.5	0.418
G16	175.2	1718.8	139.8	35.0	140.2	0.408
G17	203.0	1991.4	153.0	40.6	162.4	0.475
G18	213.2	2091.5	157.2	42.6	170.6	0.497
G19	159.7	1566.7	127.8	31.9	127.8	0.337
G20	219.5	2153.3	163.2	43.9	175.6	0.692
G21	213.9	2098.4	170.5	42.8	171.1	1.358
G22	240.6	2360.3	162.3	48.1	192.5	1.968
G23	200.6	1967.9	168.7	40.1	160.5	0.960
B1	153.2	1502.9	127.7	30.6	122.6	0.375
B2	173.6	1703.0	135.2	34.7	138.9	0.512
B3	149.8	1469.5	135.2	30.0	119.8	0.348
B4	141.0	1383.2	119.3	28.2	112.8	0.334
B5	155.0	1520.6	123.0	31.0	124.0	0.350
B6	162.7	1596.1	128.1	32.5	130.1	0.489
B7	183.0	1795.2	137.2	36.6	146.4	0.694
B8	131.6	1291.0	109.2	26.3	105.3	0.285
P1	253.1	2482.9	177.8	50.6	202.5	1.887
P2	222.1	2178.8	168.5	44.4	177.7	0.993
P3	223.7	2194.5	171.3	44.7	179.0	0.888
P4	231.8	2274.0	172.7	46.4	185.5	1.352
P5	204.6	2007.1	177.8	40.9	163.7	1.620
P6	241.2	2366.2	184.2	48.2	193.0	1.528
P7	268.6	2635.0	156.7	53.7	214.9	1.052
P8	209.9	2059.1	151.8	42.0	167.9	0.505

Tabelle A2: Fallversuche II

dargestellt: maximale Beschleunigung a(max) in den Einheiten g und m/s<sup>2</sup>, die Beschleunigung im Zeitintervall von 3 ms a(3 ms), die Beschleunigungswerte bei 20 % bzw. 80 % des Maximalwertes a(20 %) und a(80 %) und der Anstieg der Beschleunigung da/dt.

Versuch	HIC	$t_2 - t_1$ [ms]	F [kN]	$X_k$ [mm]	$\alpha_k$ [rad/s <sup>2</sup> ]	$w_k$ [rad/s]	
						Num.	Film
G01	86	6.9	3.37	10.1	/	/	1.4
G02	149	6.0	3.93	12.2	/	/	6.1
G03	279	6.1	5.01	13.3	/	/	1.5
G04	389	6.1	5.65	15.2	/	/	5.0
G07	509	6.8	6.22	21.9	/	/	7.6
G09	652	5.2	7.47	29.4	/	/	7.0
G10	829	6.0	7.84	26.3	/	/	9.3
G11	983	5.5	8.61	27.1	/	/	9.7
G12	1029	5.3	9.97	28.6	/	/	/
G13	1091	5.6	9.12	28.0	/	/	10.6
G14	1183	5.6	9.01	31.1	/	/	12.8
G16	1263	5.3	9.62	30.0	2629	9.3	/
G17	1685	5.1	11.15	35.2	3045	9.7	15.1
G18	1817	4.9	11.71	35.4	3365	10.0	14.7
G19	1026	5.6	8.76	28.9	2385	7.1	10.5
G20	1887	4.4	12.06	20.5	/	/	0.2
G21	1907	4.5	11.72	15.6	/	/	/
G22	2149	4.4	13.22	13.4	/	/	3.5
G23	1756	4.9	11.02	18.7	2833	13.1	11.2
B1	964	5.6	8.41	27.6	2746	9.3	/
B2	1182	5.0	9.54	25.5	2911	6.4	/
B3	893	5.3	8.23	31.3	3284	9.6	11.9
B4	807	5.6	7.74	32.8	3360	11.0	9.6
B5	938	5.1	8.51	28.2	3964	14.1	15.4
B6	1018	5.2	8.94	27.3	3001	8.9	6.0
B7	1137	4.7	10.06	31.9	4834	9.0	9.1
B8	708	6.3	7.23	36.0	2863	9.4	17.2
P1	2173	3.9	12.20	14.2	/	/	1.4
P2	1951	4.0	12.94	17.5	/	/	/
P3	2053	4.2	12.29	19.1	/	/	0.7
P4	2037	3.8	12.71	16.3	/	/	0.0
P5	1921	4.3	11.24	15.5	/	/	/
P6	2255	4.3	13.25	16.1	/	/	/
P7	2472	3.4	14.76	17.4	/	/	0.0
P8	1648	4.8	11.53	25.5	/	/	0.0

Tabelle A3: Fallversuche III

dargestellt: HIC, Berechnungsintervall  $t_2 - t_1$  für HIC, Kraft F, maximale Eindrückung  $X_k$ , Rotationsbeschleunigung  $\alpha_k$  und resultierende Rotationsgeschwindigkeit  $w_k$  nach der Integration von  $\alpha_k$  ( $w_k$  Num.) und Filmauswertung ( $w_k$  Film)

Versuch	m [kg]	$E_o$ [J]	$E_e$ [J]	$E_{rot}$ [J]	$E_{abs}$ [J]
G01	6.76	24.6	3.4	0.1	21.1
G02	"	32.5	4.9	1.0	26.6
G03	"	43.8	12.2	0.1	31.5
G04	"	62.5	17.9	0.7	43.9
G07	"	94.9	14.9	1.6	78.4
G09	"	113.7	11.0	1.4	101.3
G10	"	147.2	17.9	2.4	126.9
G11	"	142.8	21.1	2.6	119.1
G12	"	/	/	/	/
G13	"	156.3	13.5	3.1	139.7
G14	"	185.1	16.4	4.5	164.2
G16	"	/	/	/	/
G17	"	255.3	17.9	6.3	231.1
G18	"	273.8	13.5	5.9	254.4
G19	"	160.9	14.9	3.0	143.0
G20	"	156.3	26.5	0	129.8
G21	"	/	/	/	/
G22	"	151.7	36.8	0.3	114.6
G23	"	165.6	21.1	3.5	141.0
B1	6.96	/	/	/	/
B2	7.19	/	/	/	/
B3	6.92	155.3	6.8	3.9	144.6
B4	6.90	164.3	2.8	2.5	159.0
B5	7.07	178.2	9.0	6.5	168.2
B6	6.77	195.5	9.8	1.0	184.7
B7	7.18	186.1	5.2	2.3	178.6
B8	7.20	176.4	5.1	8.1	163.2
P1	6.96	170.5	27.3	0.1	143.2
P2	7.12	/	/	/	/
P3	6.92	184.4	37.7	0.0	146.7
P4	6.90	173.9	13.8	0.0	160.1
P5	7.07	/	/	/	/
P6	6.77	/	/	/	/
P7	7.18	175.9	22.4	0.0	153.5
P8	7.20	186.6	32.4	0.0	154.2

Tabelle A4: Fallversuche IV

dargestellt: Masse m des Systems Prüfkopf/Helm, Anprallenergie  $E_o$ , Rückprallenergie  $E_e$ , Rotationsenergie  $E_{rot}$  und durch die Schutzpolsterung absorbierte Energie  $E_{abs}$  jeweils aus der Filmauswertung.

Reduktion des HIC durch Vernachlässigung der Rückprallgeschwindigkeit						
Versuch	HIC	HIC red.	% Red.	a (max) [g]	a (max) red.	% Red.
B1	964	940	2,5	/	/	/
B2	1182	1144	3,2	/	/	/
B3	893	884	1,0	/	/	/
B4	807	807	0,0	/	/	/
B5	938	930	0,9	/	/	/
B6	1018	1018	0,0	/	/	/
B7	1137	1137	0,0	/	/	/
B8	708	708	0,0	/	/	/
P1	2173	1895	12,8	/	/	/
P2	1951	1558	15,0	/	/	/
P3	2053	1720	16,2	/	/	/
P4	2037	1854	9,0	/	/	/
P5	1921	1683	12,4	/	/	/
P6	2255	1878	16,7	/	/	/
P7	2472	2107	14,8	/	/	/
P8	1648	1420	13,8	/	/	/
Reduktion von HIC und a(max) durch Optimierung des a/t-Verlaufs						
Versuch	HIC	HIC red.	% Red.	a (max) [g]	a (max) red.	% Red.
B1	964	613	39,4	153,2	90,3	41,1
B2	1182	690	41,6	173,6	97,7	43,7
B3	893	508	43,1	149,8	79,7	46,8
B4	807	476	41,0	141,0	76,3	45,9
B5	938	595	36,6	155,0	88,6	42,8
B6	1018	624	38,7	162,7	91,5	43,8
B7	1137	495	56,5	183,0	78,4	57,2
B8	708	411	41,9	131,6	69,3	47,3
P1	2173	1669	23,2	253,1	176,2	30,4
P2	1951	1217	37,6	222,1	142,7	35,7
P3	2053	1069	47,9	223,7	130,9	41,5
P4	2037	1356	33,4	231,8	153,4	33,8
P5	1921	1449	24,6	204,6	160,4	21,6
P6	2255	1379	38,9	241,2	155,1	35,9
P7	2472	1235	50,0	268,6	144,2	46,3
P8	1648	690	58,2	209,9	97,7	53,5

Tabelle A5: Modellrechnungen zu Fallversuchen

oberer Teil der Tabelle zu Kapitel 5.1, unterer zu Kapitel 5.2, dargestellt HIC, reduzierter HIC (HIC red.) für jeweilige Annahme, Reduktion in % (% Red.), entsprechend für a(max).

No.	a[g]	HIC	Testpoint				
1	181	1029	B				
2	166	1091	B				
3	160	1026	B				
4	219	1887	*				
5	214	1907	P				
6	241	2149	*				
7	201	1756	*				
8	153	964	B				
9	174	1182	B				
10	150	893	B				
11	141	807	B				
12	155	938	B				
13	163	1018	B				
14	183	1137	B				
15	132	708	B				
16	253	2173	P				
17	222	1951	P				
18	224	2053	P				
19	232	2037	P				
20	205	1921	P				
21	241	2255	P				
22	269	2472	P				
23	210	1648	P				
				a[g]	HIC	min HIC	max HIC
24	172	1183	B				
25	185	1342	B	100	403	358	436
26	205	1721	P	105	443	394	479
27	212	1942	P	110	484	431	524
28	140	800	B	115	528	470	571
29	199	1281	X	120	574	510	621
30	108	551	B	125	621	552	672
31	153	913	P	130	670	596	725
32	212	1202	X	135	721	641	780
				140	774	688	837
33	162	1059	B	145	828	737	896
34	167	1127	B	150	885	787	957
35	217	1763	B	155	943	839	1020
36	162	1259	B	160	1003	892	1085
37	163	1156	B	165	1065	947	1152
38	170	849	X	170	1128	1003	1221
39	143	698	X	175	1193	1061	1291
40	202	1473	X	180	1260	1121	1364
41	171	927	X	185	1329	1182	1439
42	151	744	X	190	1400	1245	1515
43	208	2035	P	195	1472	1310	1593
44	256	2812	P	200	1547	1376	1674
45	277	2940	P	205	1623	1443	1756
46	230	2519	P	210	1700	1512	1840
47	214	2056	P	215	1780	1583	1926
				220	1861	1655	2014
				225	1944	1729	2104
				230	2029	1805	2196
				235	2115	1882	2289
				240	2204	1960	2385
				245	2294	2040	2482
				250	2385	2122	2581
				255	2479	2205	2683
				260	2574	2290	2786
				265	2671	2376	2891
				270	2770	2464	2998
				275	2870	2553	3106
				280	2973	2644	3217
				285	3077	2737	3329
				290	3182	2831	3444
				295	3290	2926	3560
				300	3399	3023	3678

\* other than B, X or P

1 to 23 BAST, 24 to 32 TÜV, 33 to 47 MPA  
velocity: 6.8 m/s to 7.0 m/s, all on flat anvil

Tabelle A6: Meßwerte zu Abbildung 6, Kapitel 3.2

Tabelle A7: Berechnete HIC-Werte nach oben stehender  
Funktion zu Abbildung 6 und 7, Kapitel 3.2



## Anhang 2

Beschleunigung/Zeit-Verläufe der PKW-Versuche

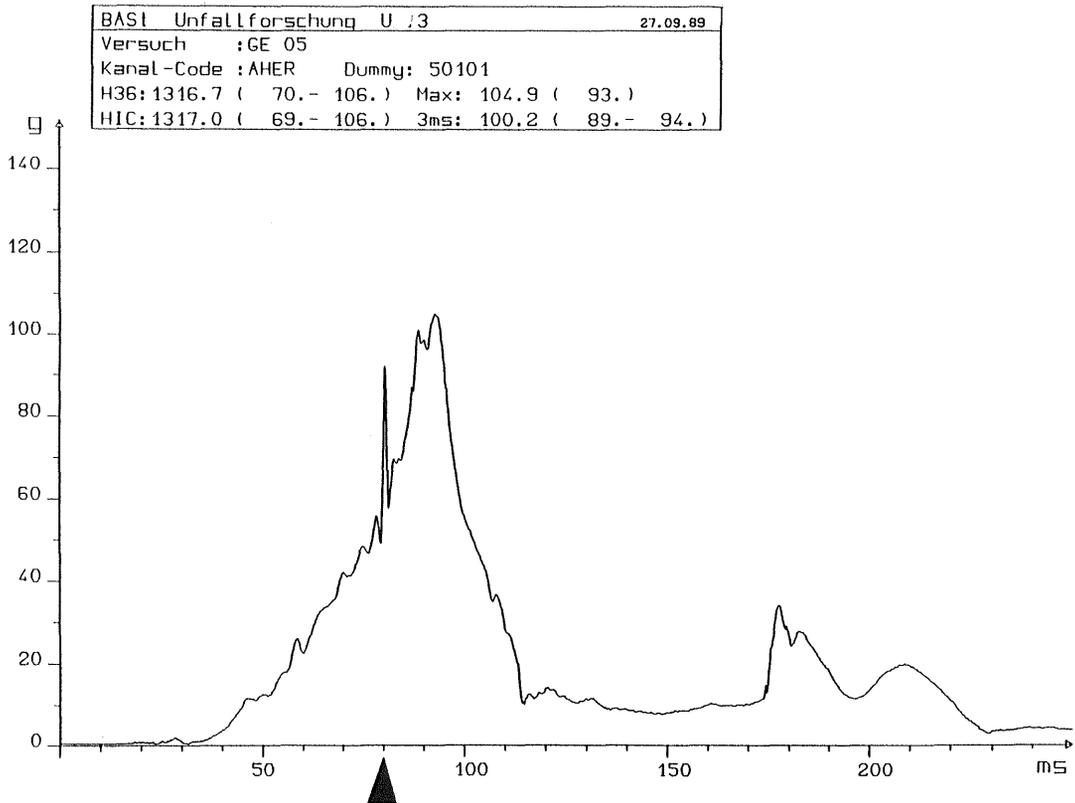


Bild A1: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 1

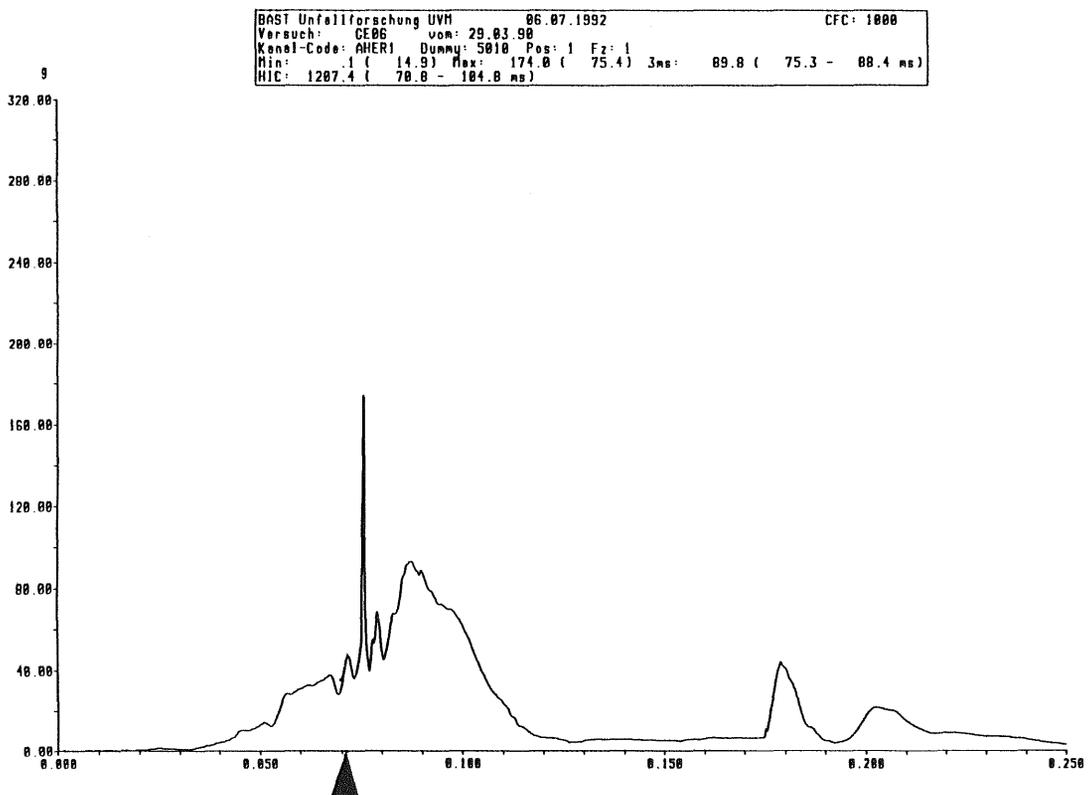


Bild A2: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 2

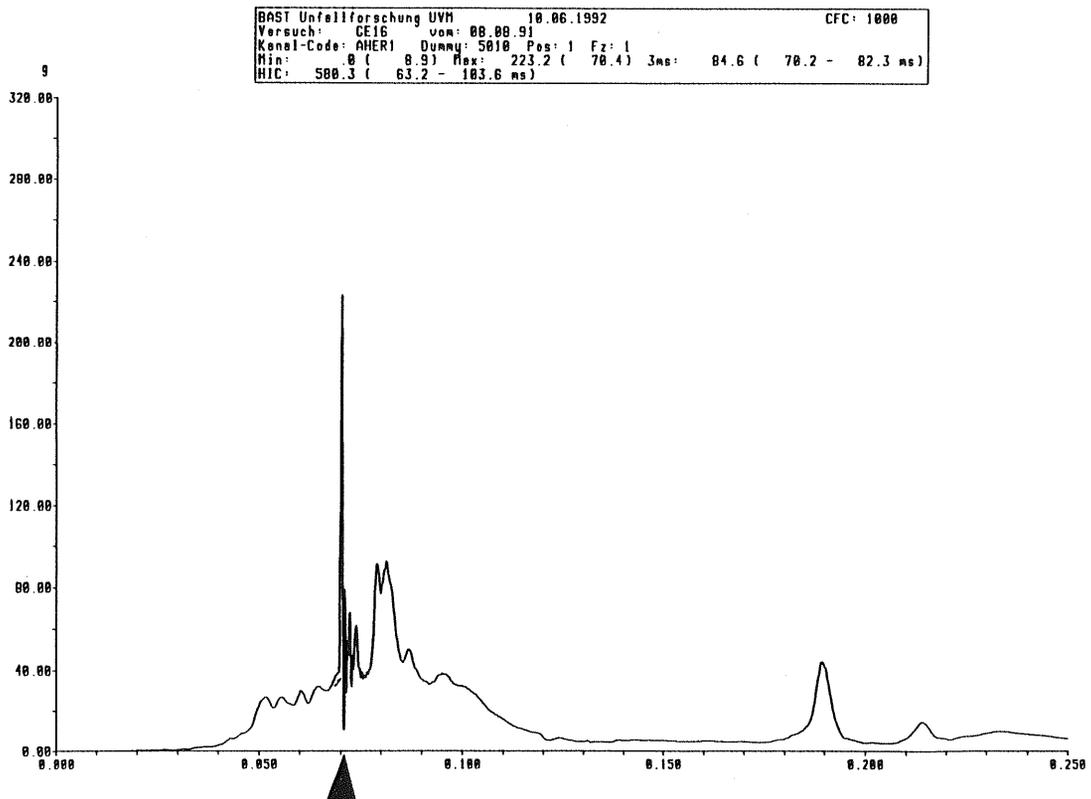


Bild A3: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 3

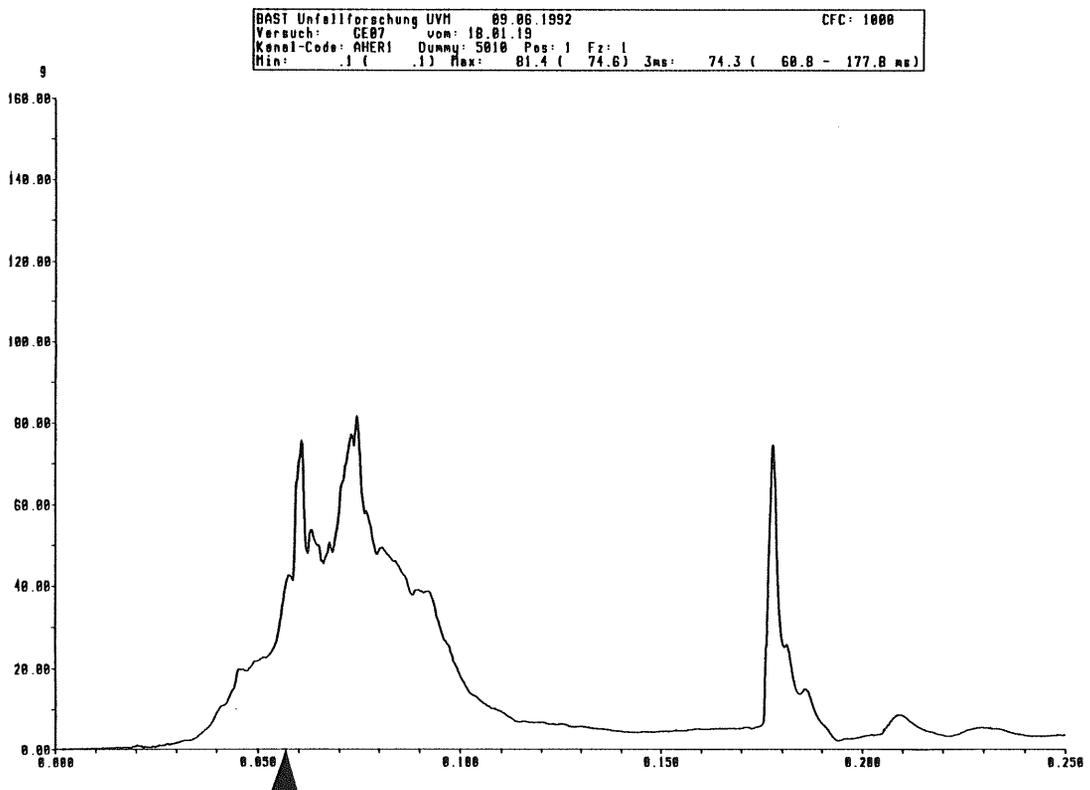


Bild A4: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 4

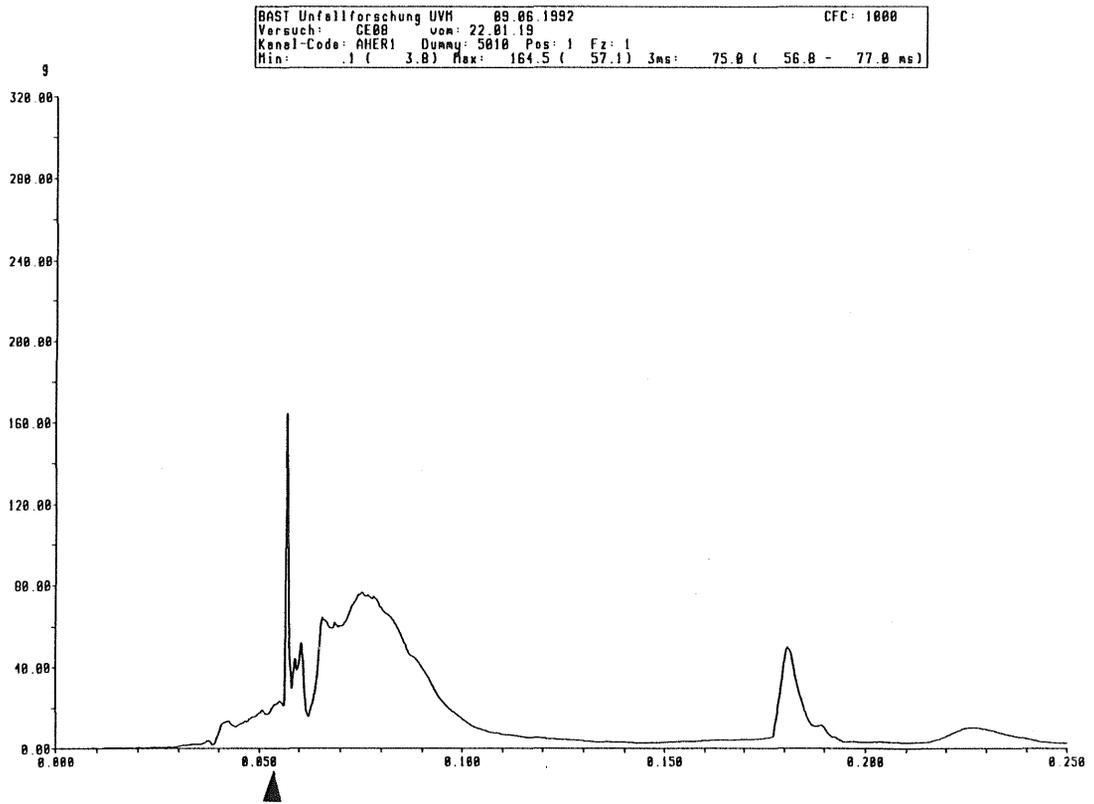


Bild A5: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 5

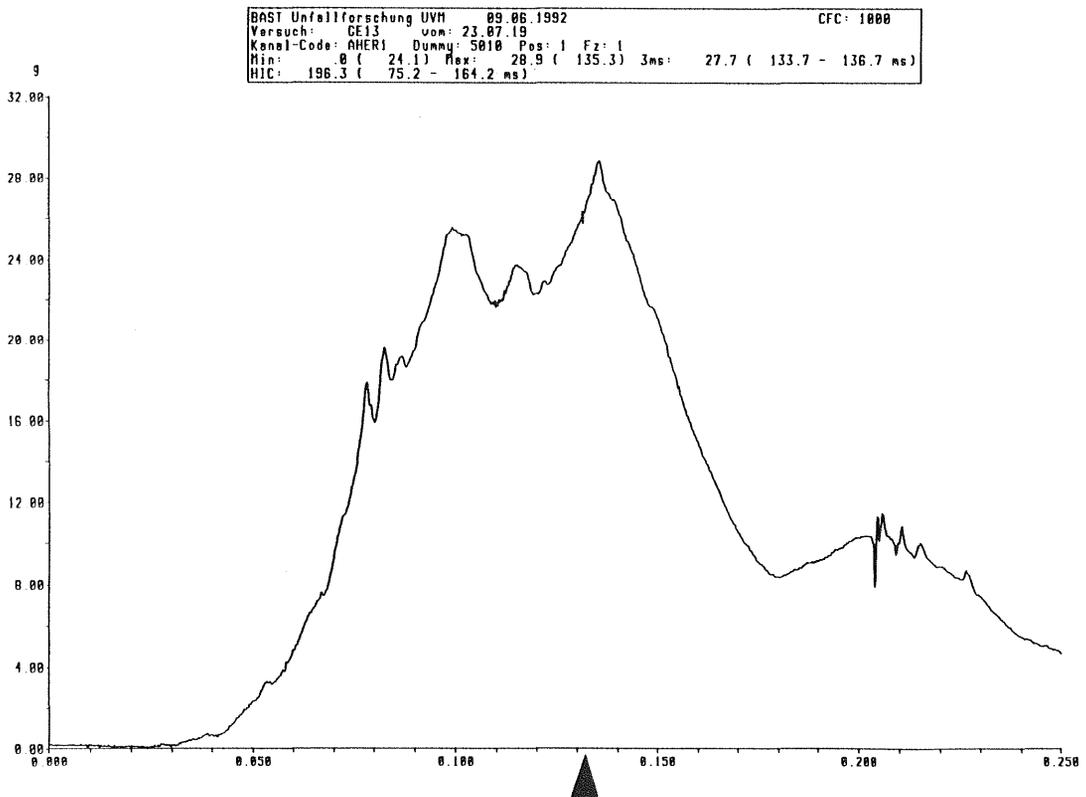


Bild A6: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 6

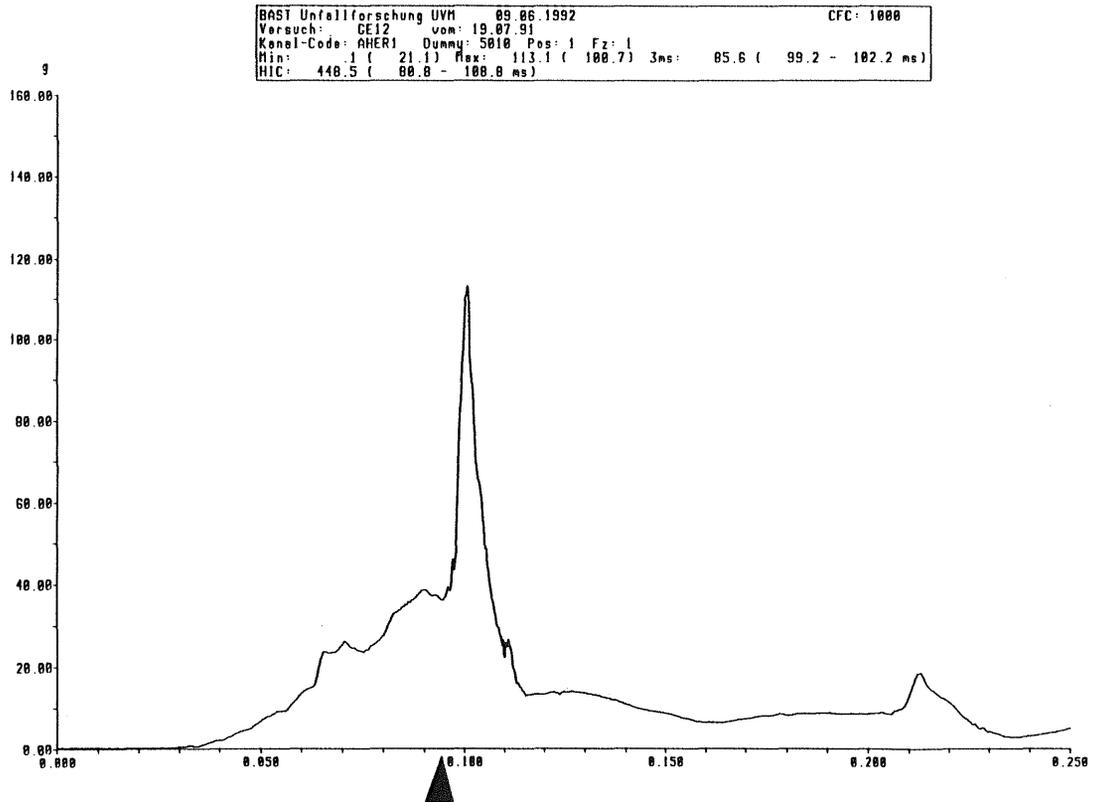


Bild A7: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 7

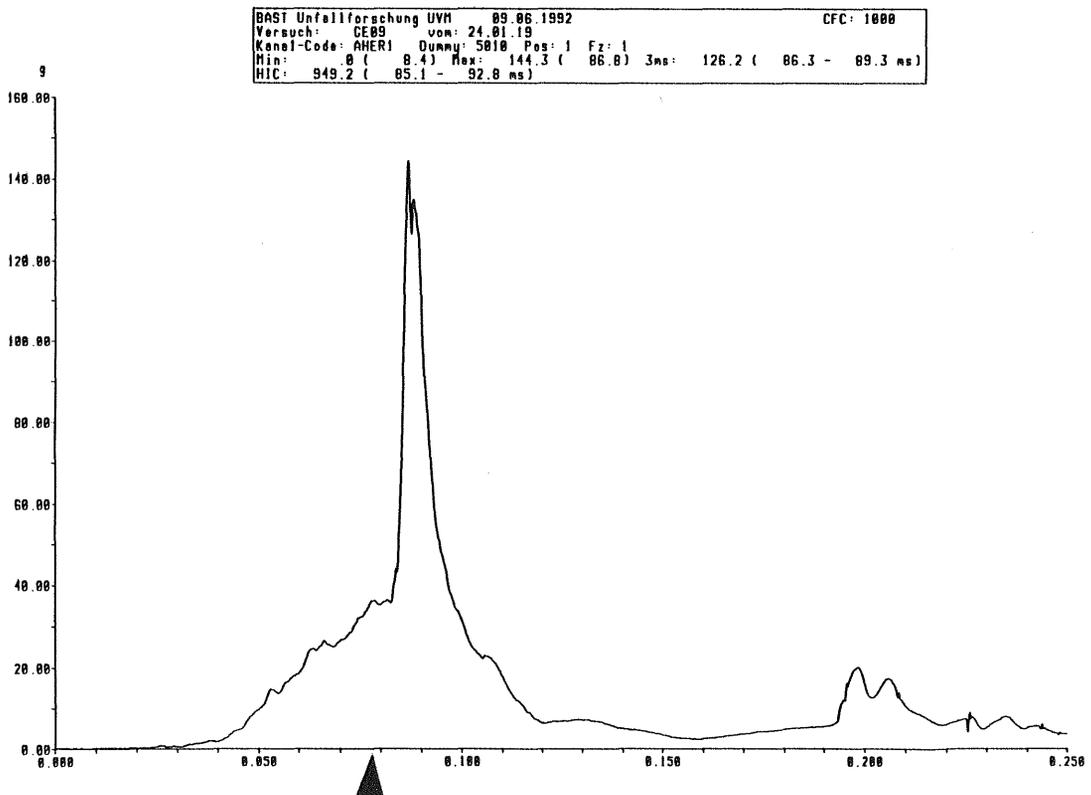


Bild A8: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 8

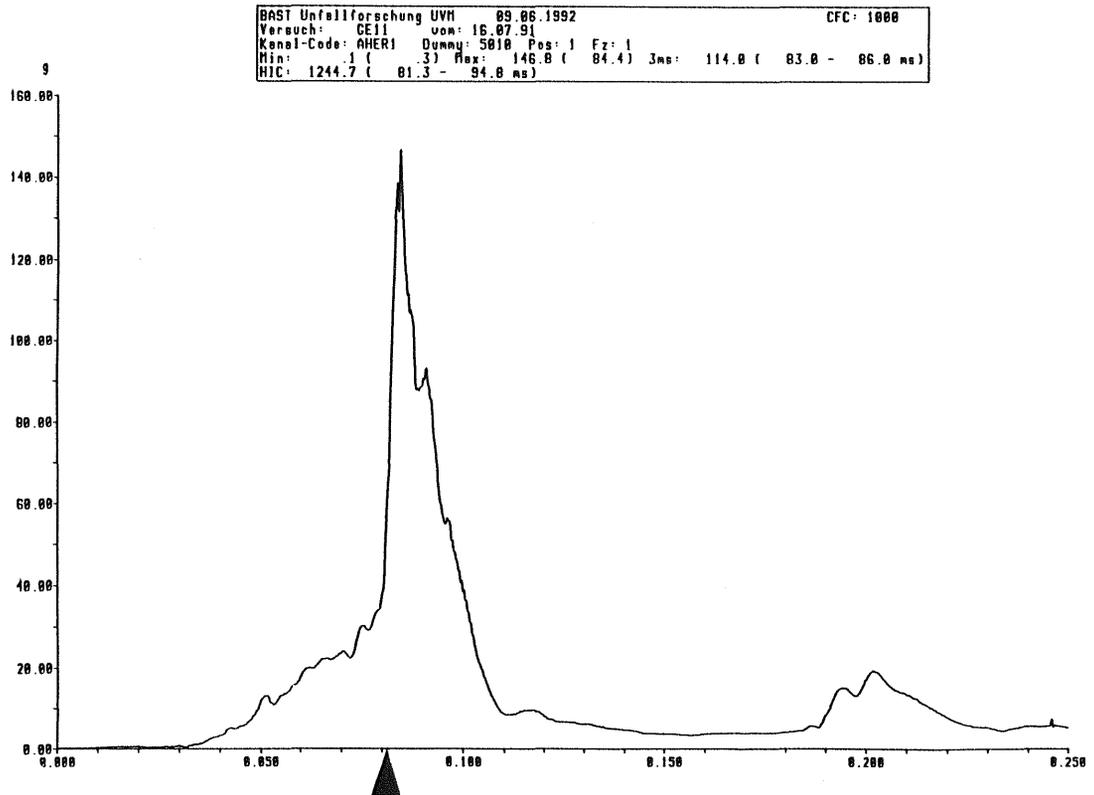


Bild A9: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 9

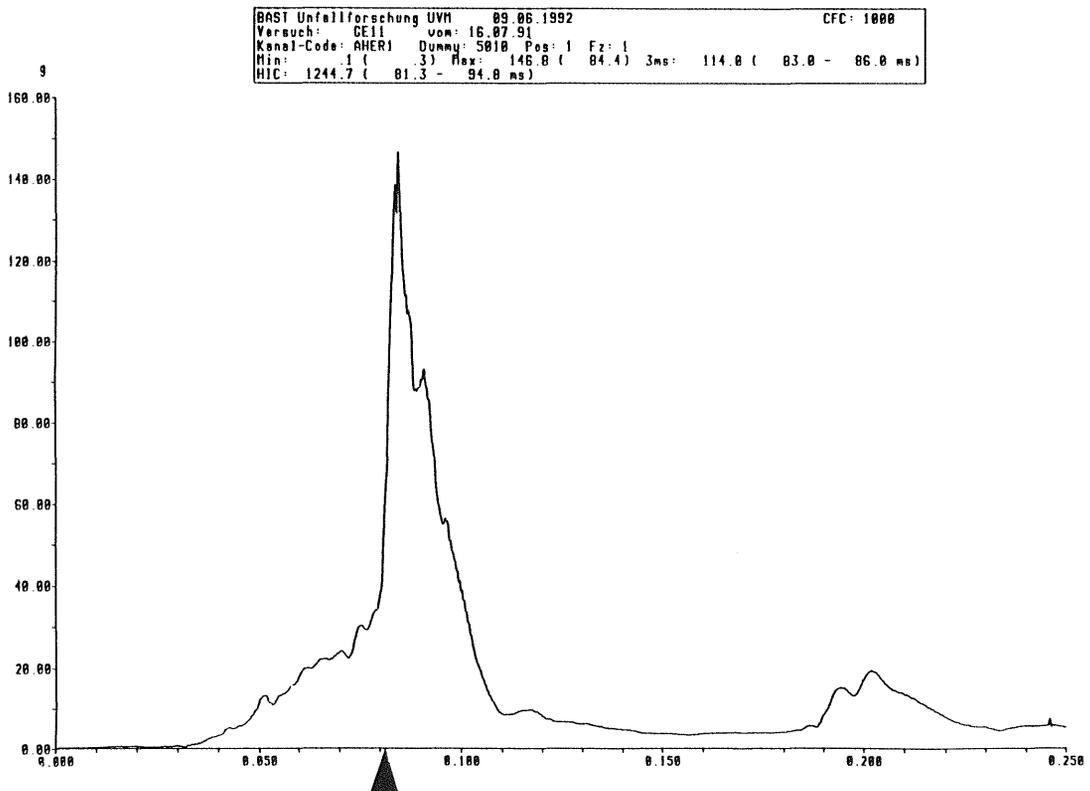


Bild A10: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 10

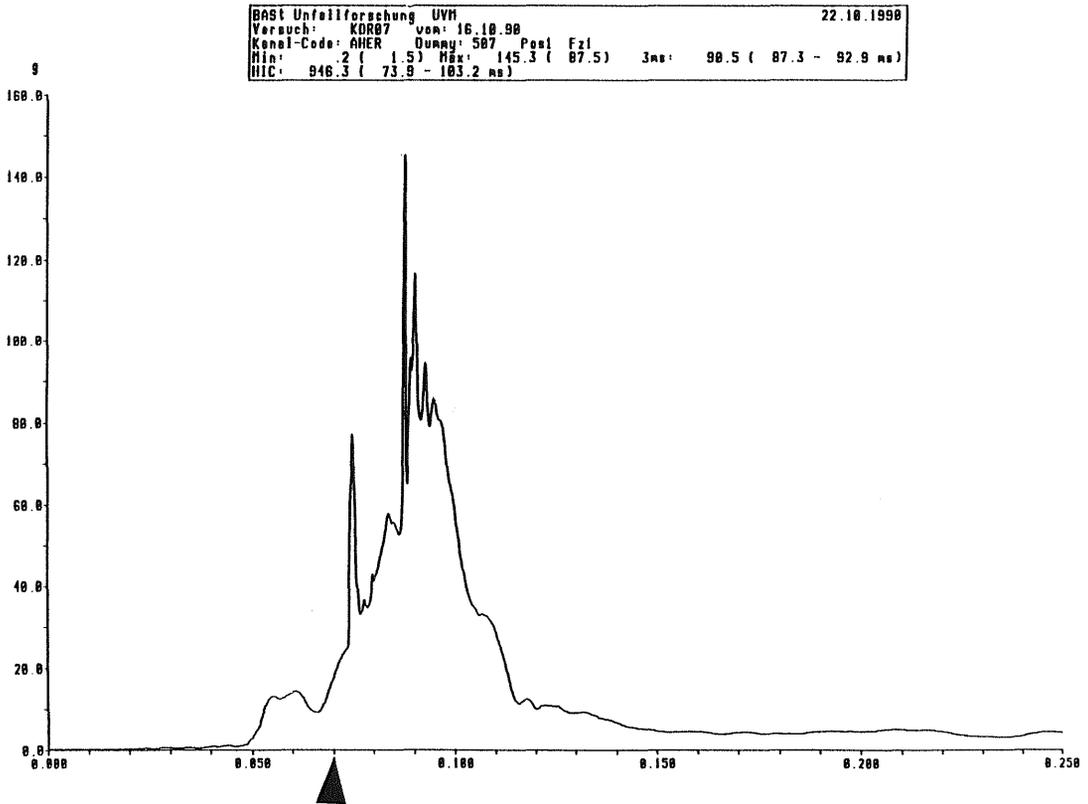


Bild A11: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 11

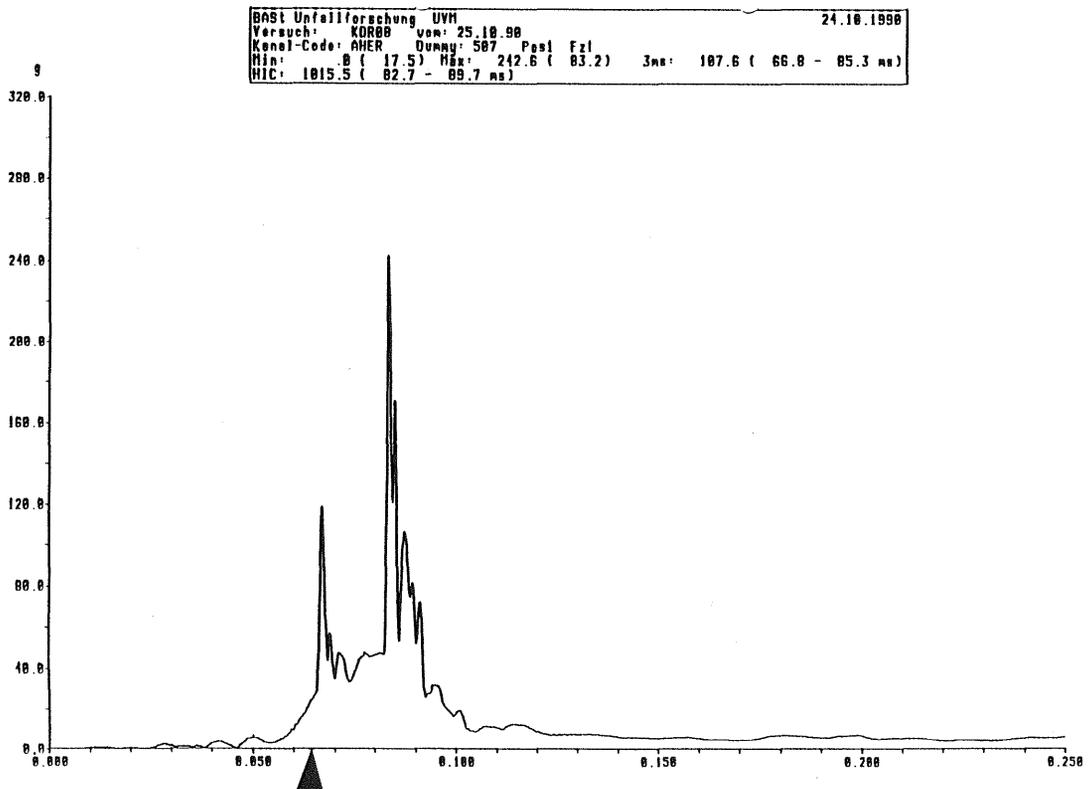


Bild A12: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 12

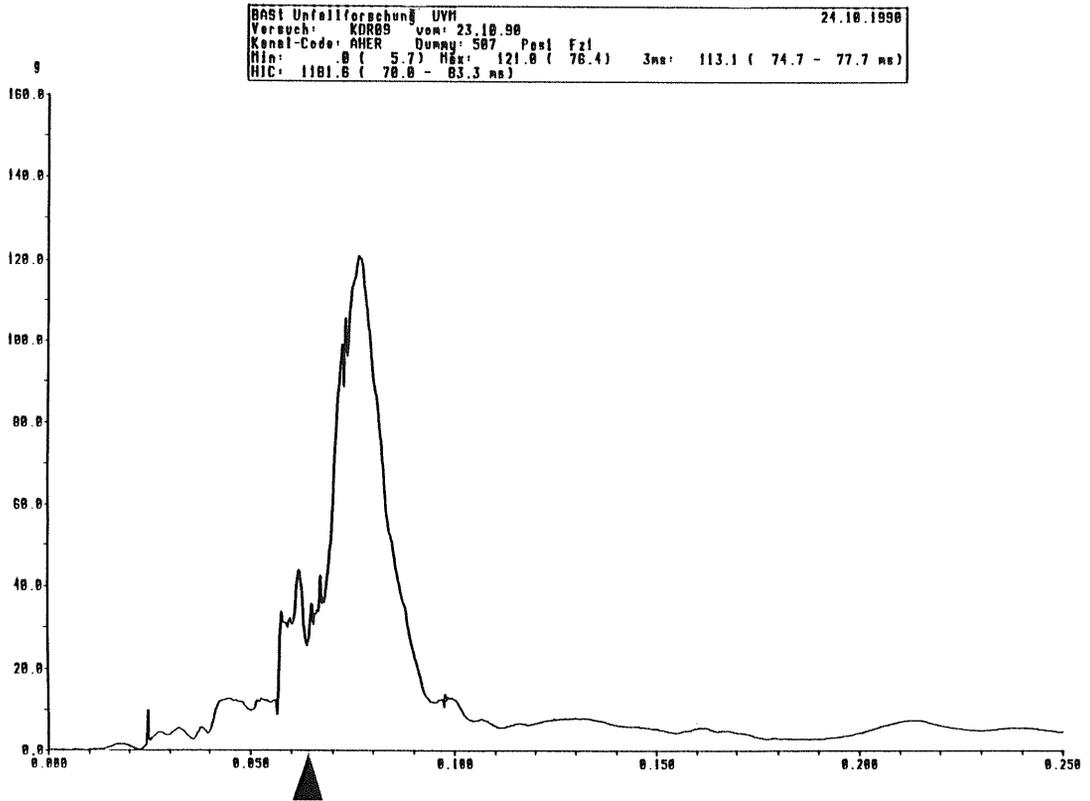


Bild A13: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 13

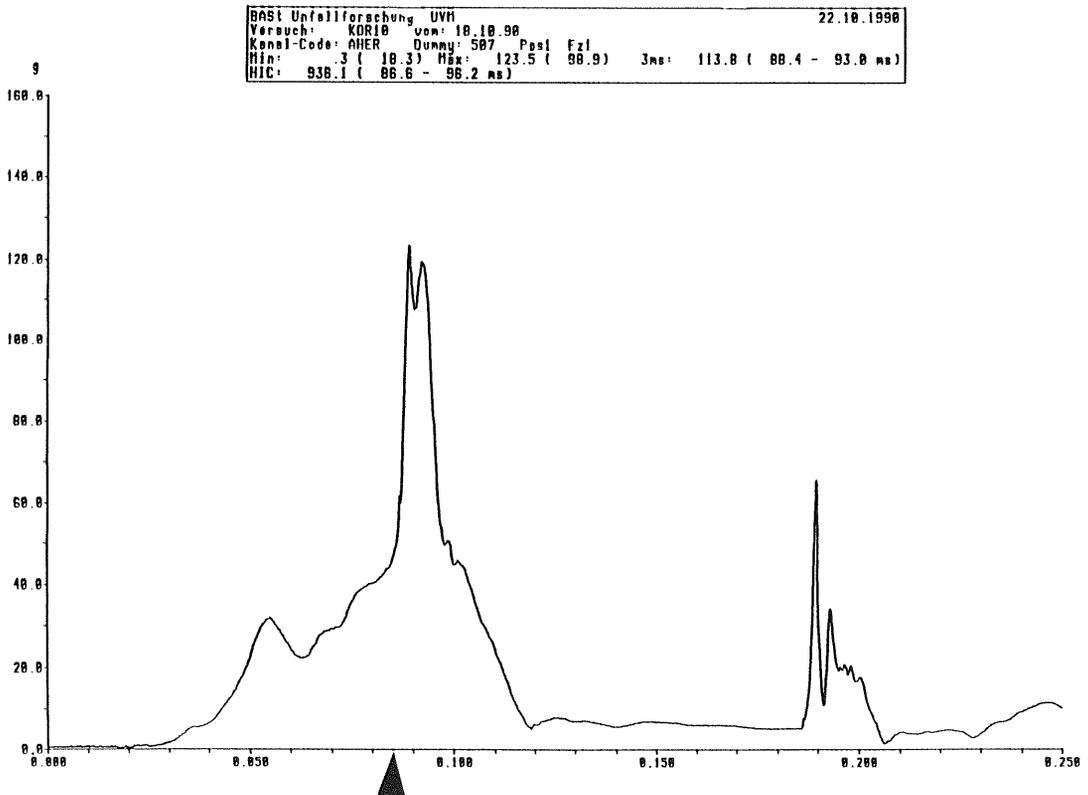


Bild A14: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 14

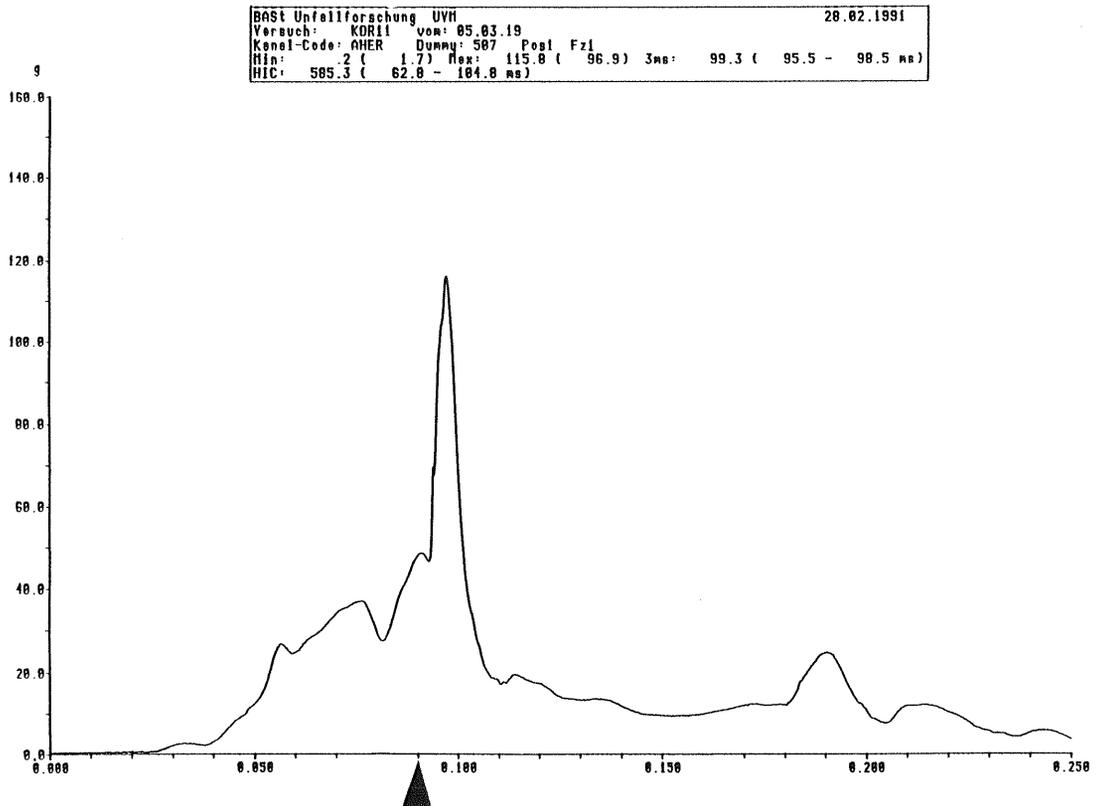


Bild A15: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 15

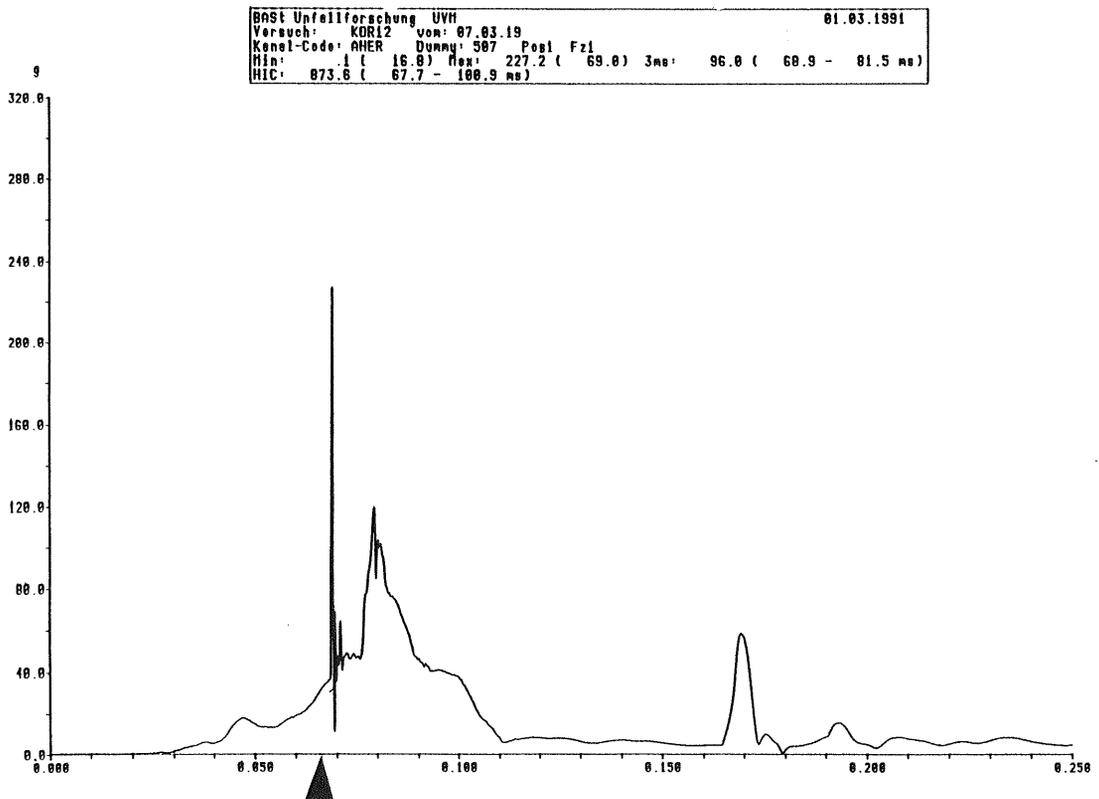


Bild A16: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 16

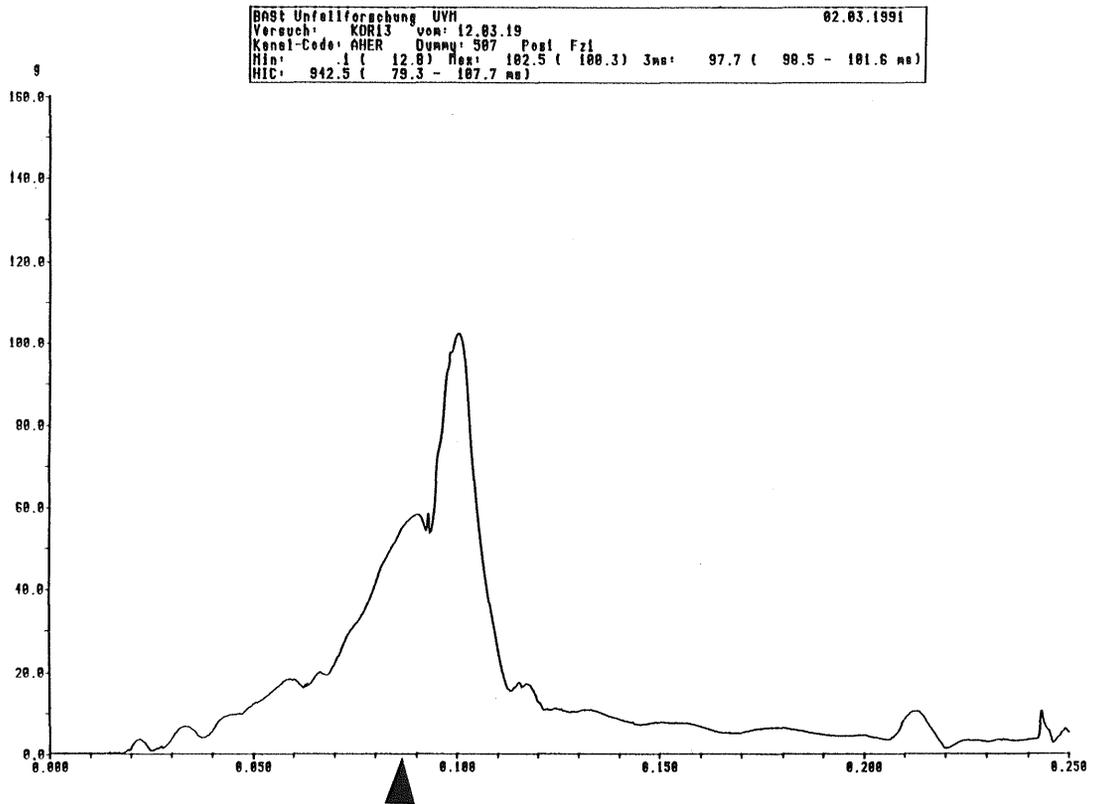
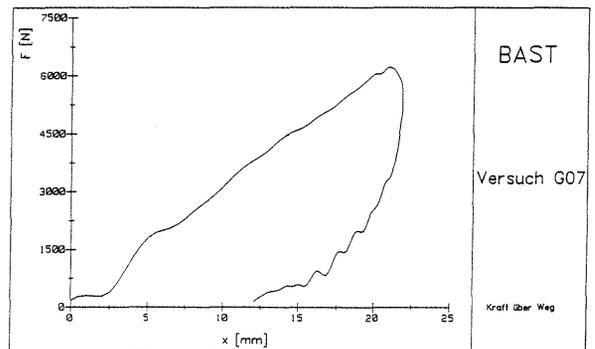
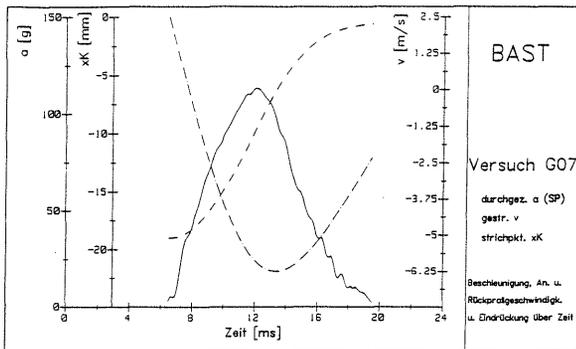
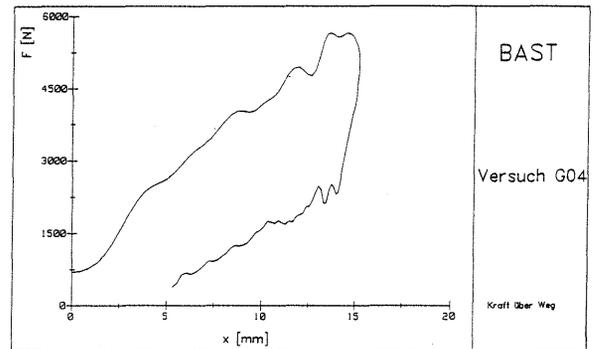
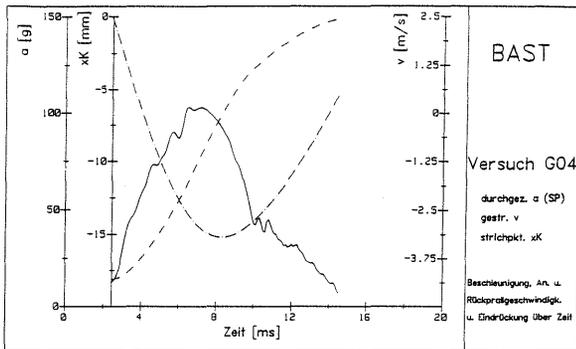
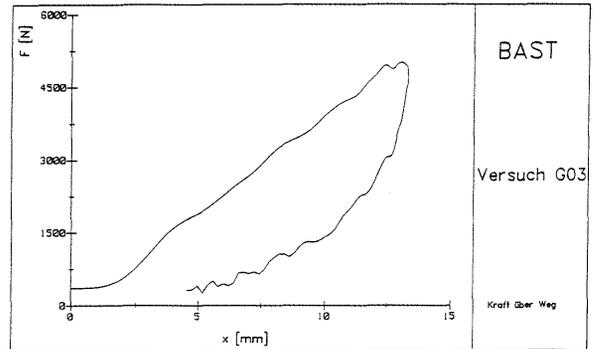
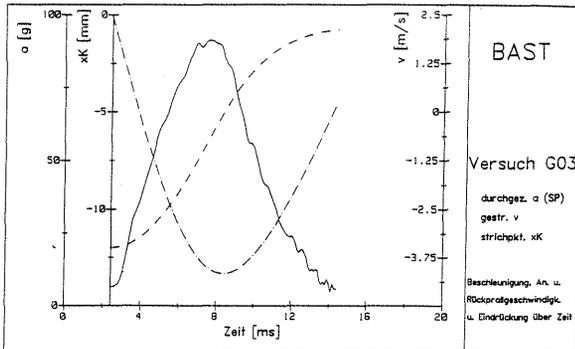
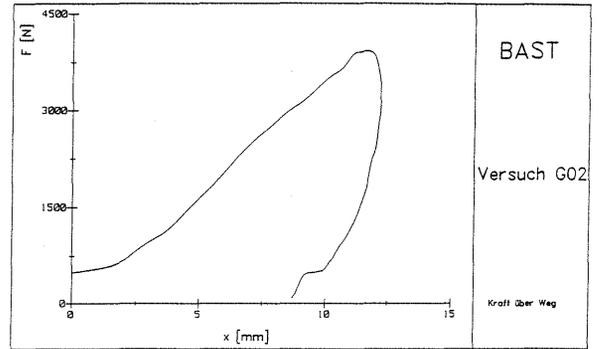
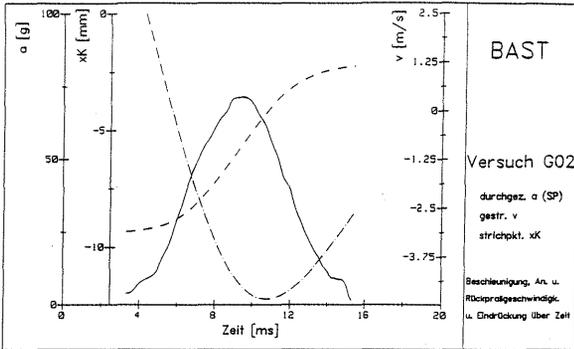
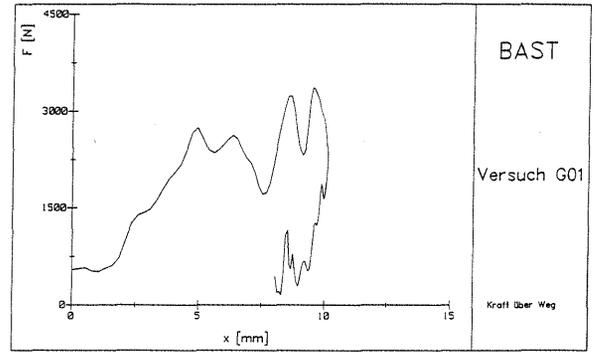
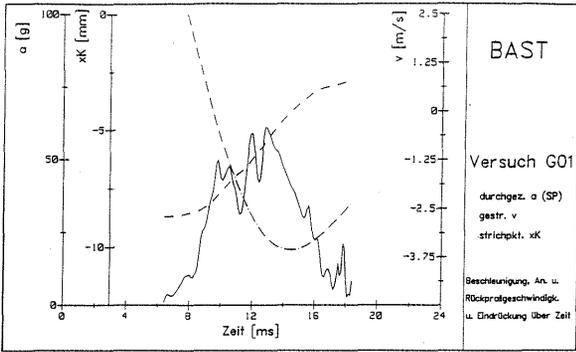
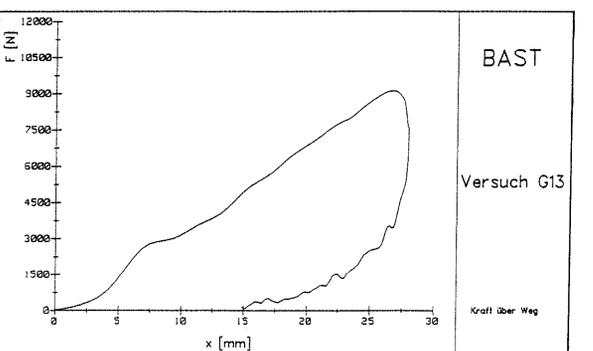
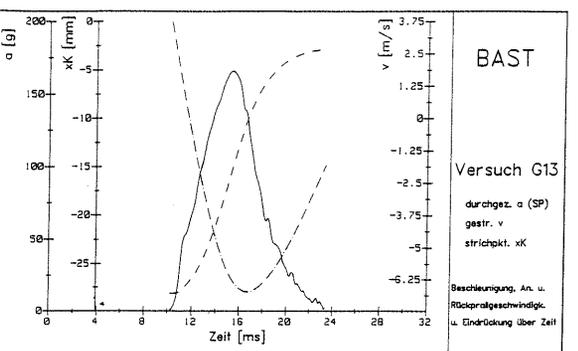
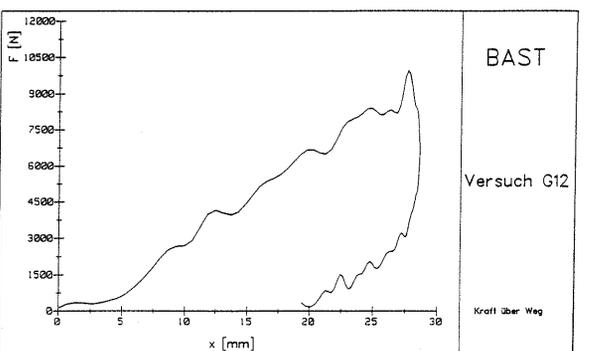
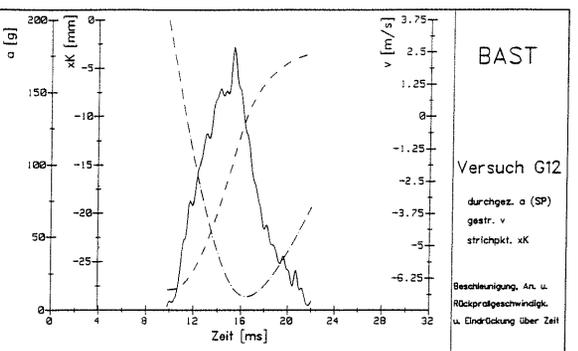
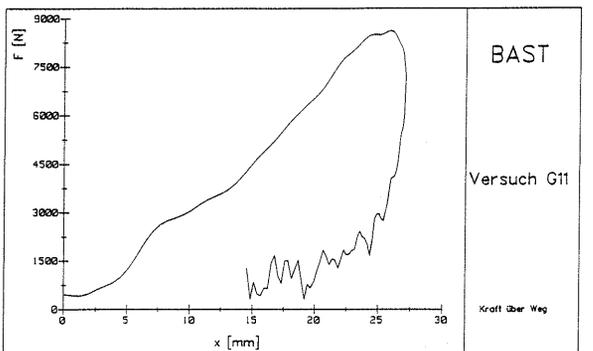
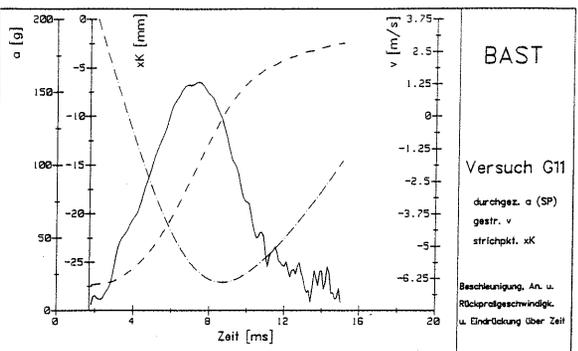
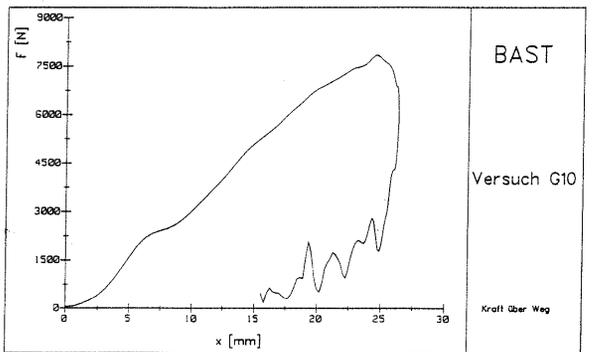
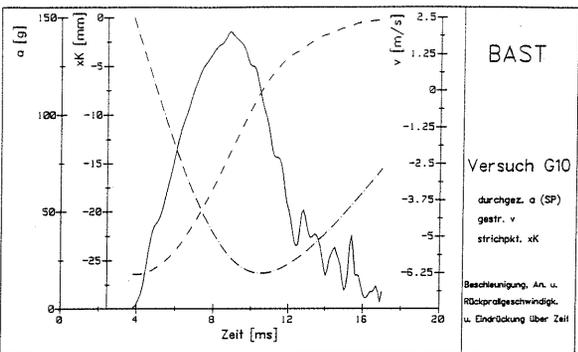
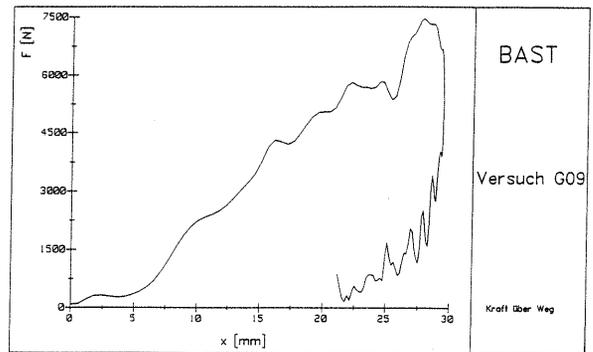
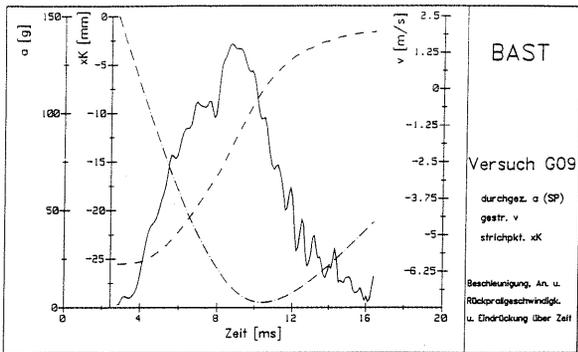


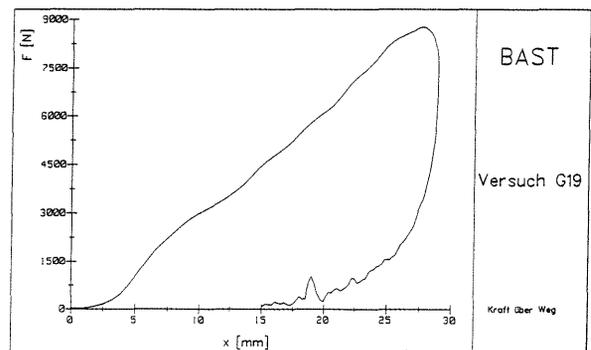
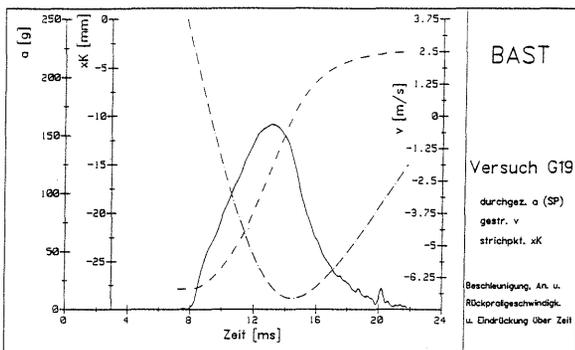
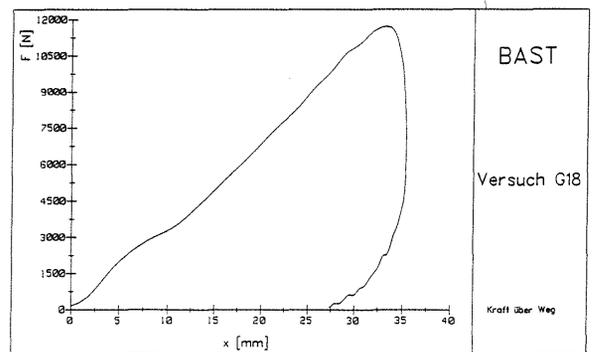
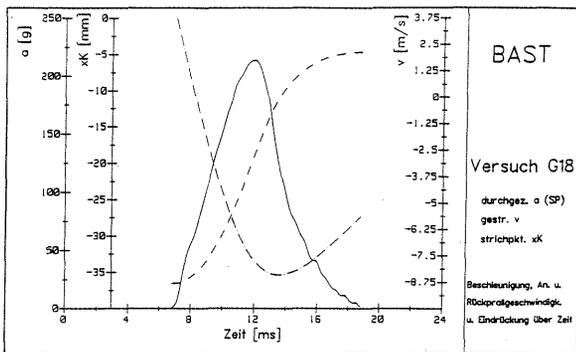
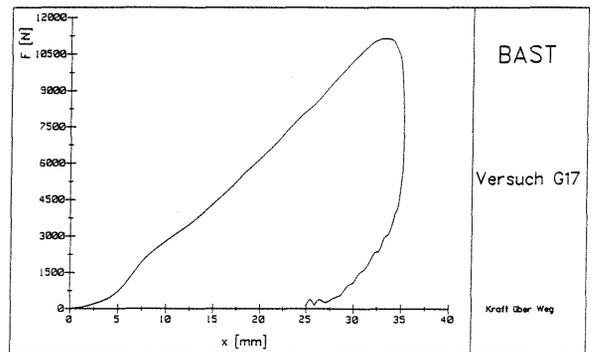
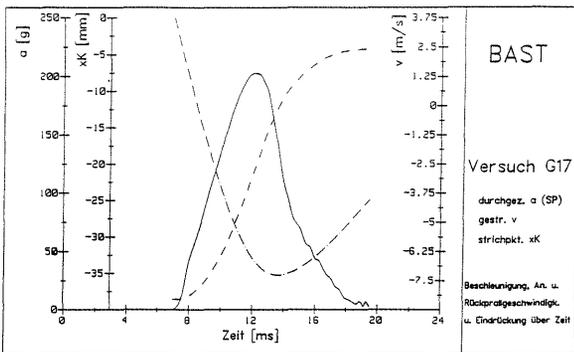
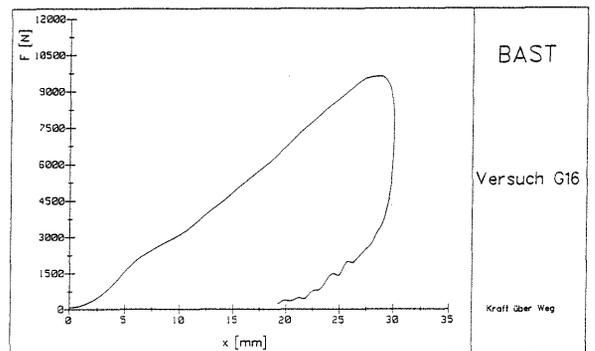
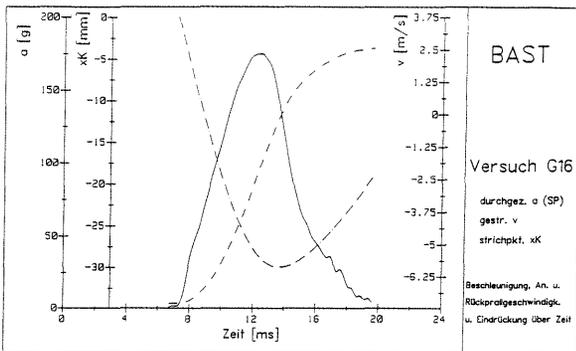
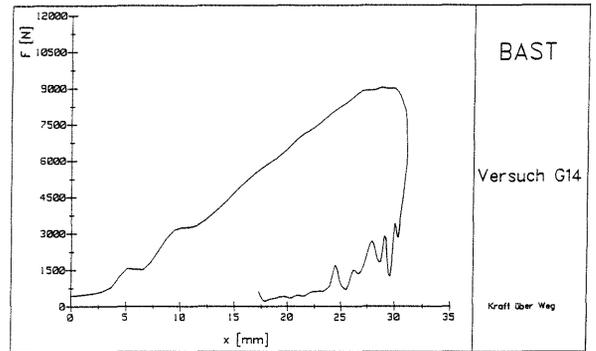
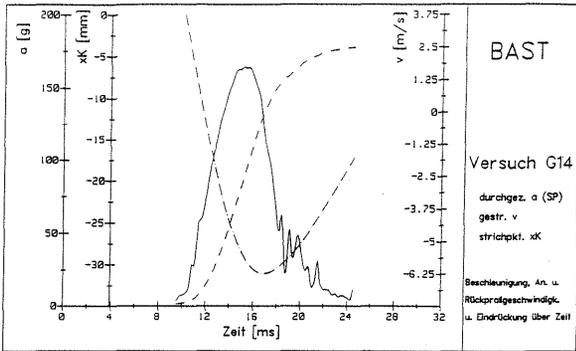
Bild A17: Beschleunigung/Zeit-Verlauf PKW-Versuch 17

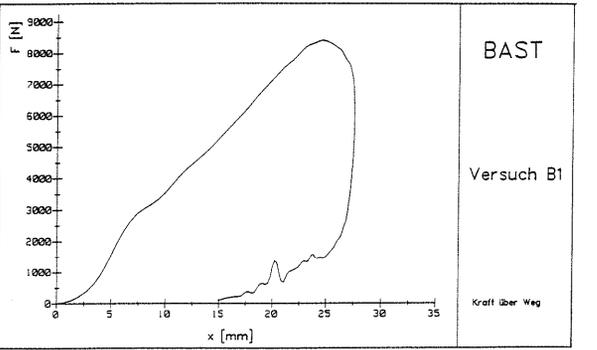
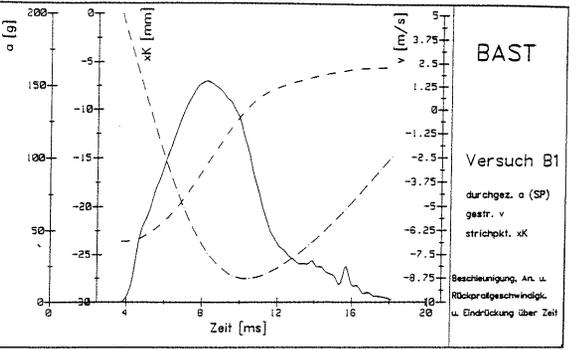
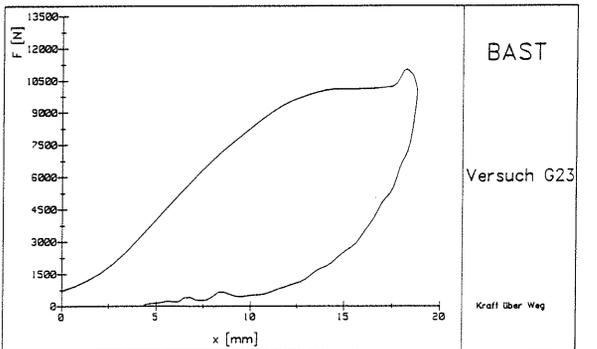
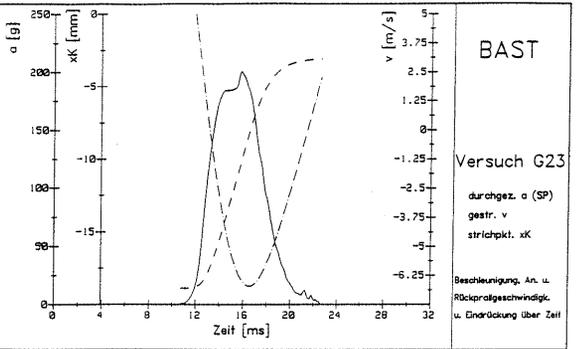
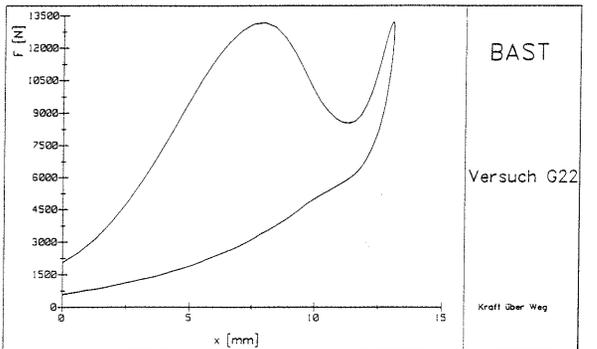
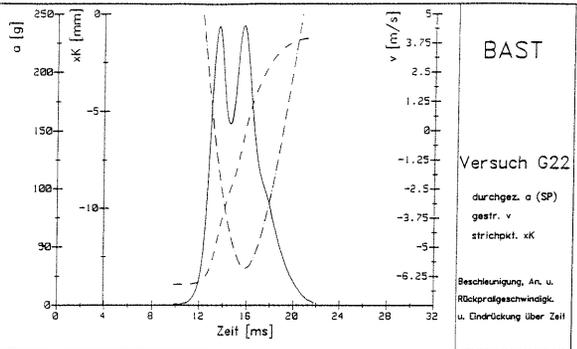
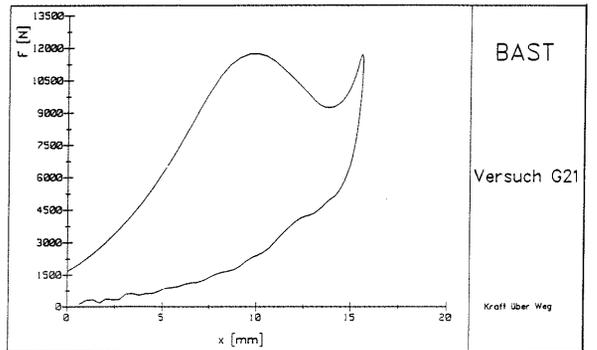
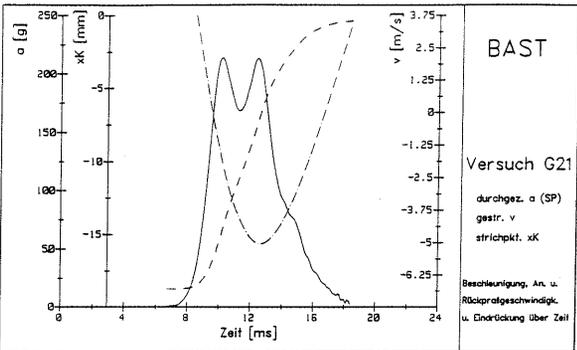
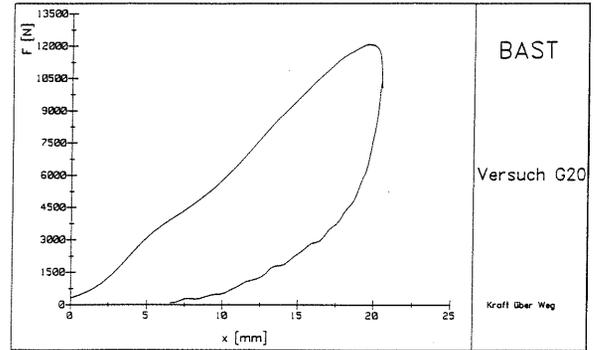
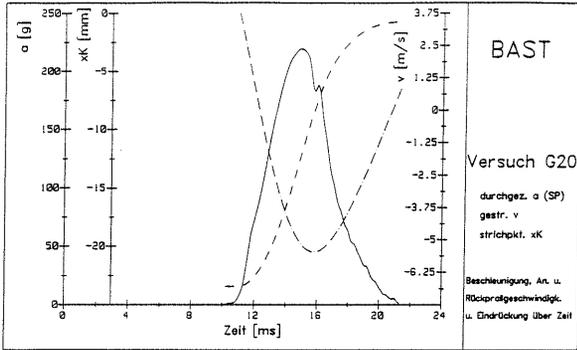
### **Anhang 3**

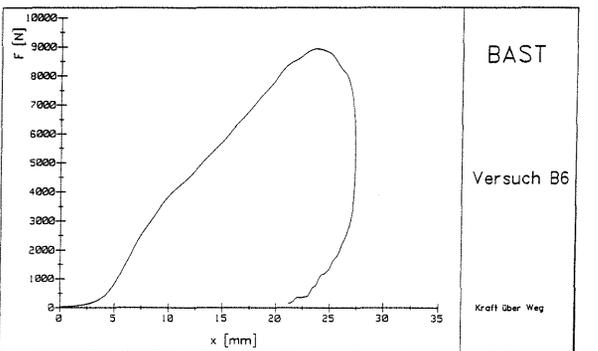
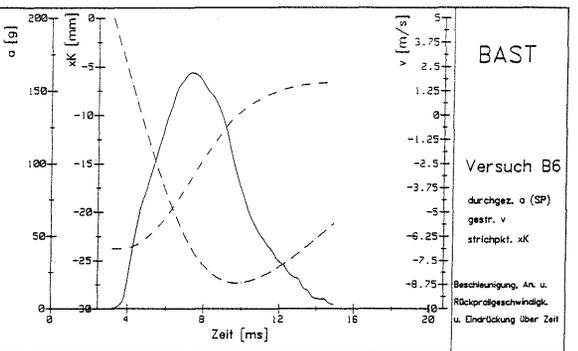
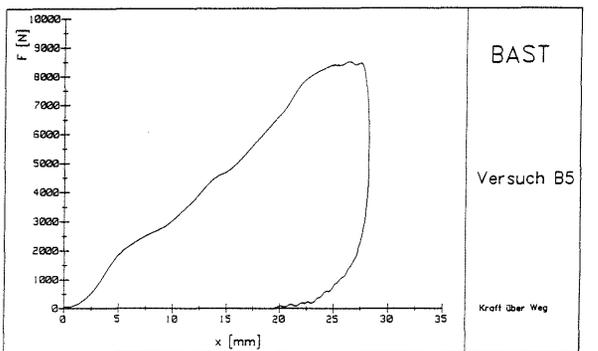
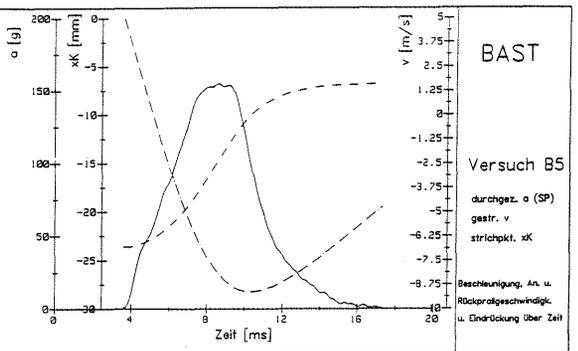
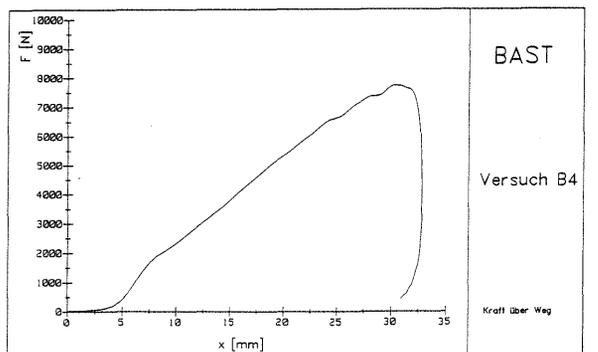
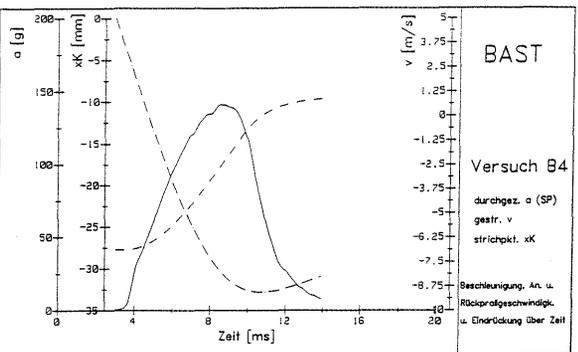
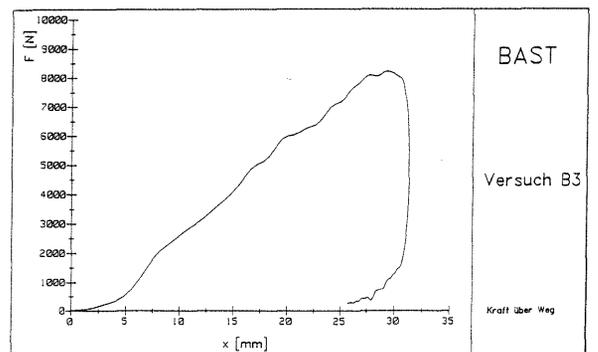
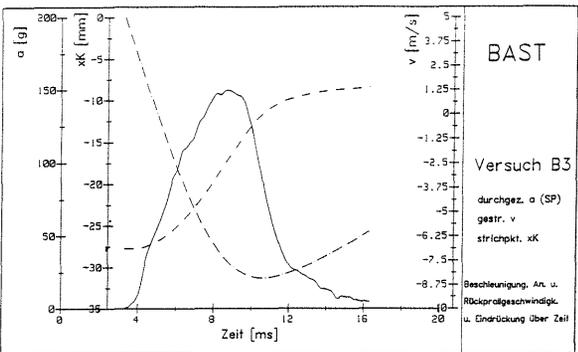
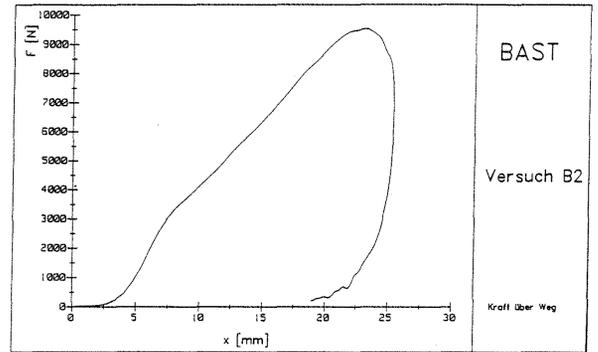
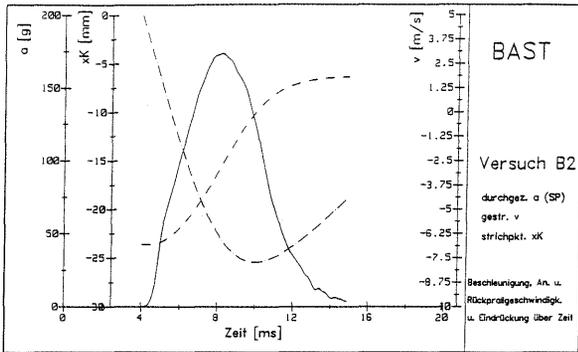
Beschleunigung/Zeit-Verläufe und Kraft/Weg-Kennlinien der Helmversuche

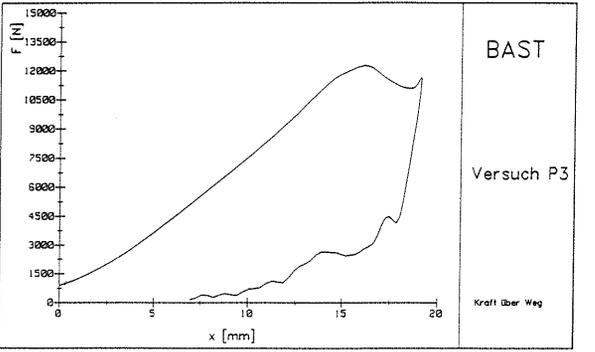
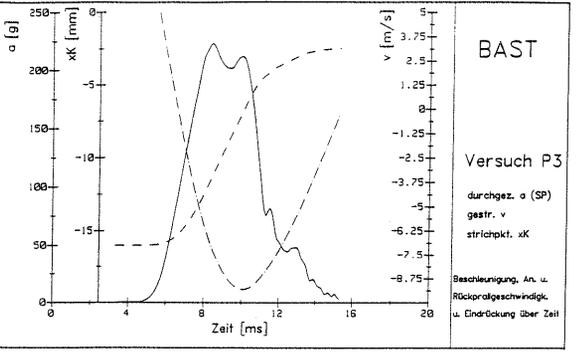
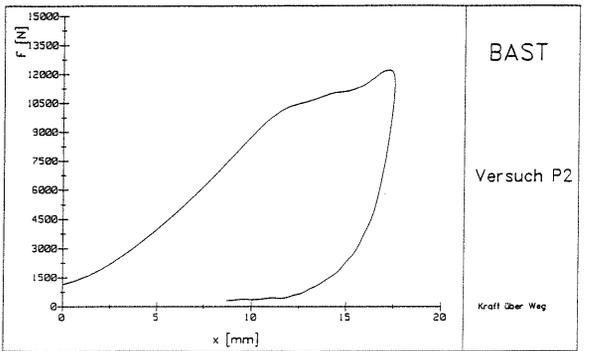
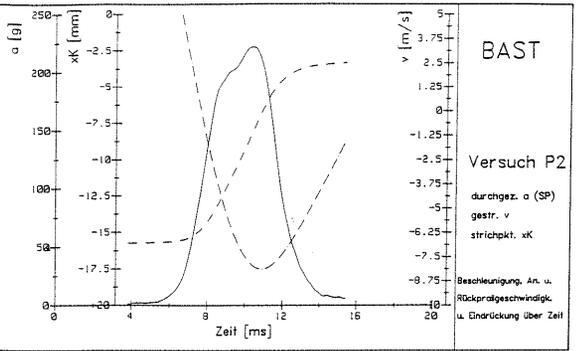
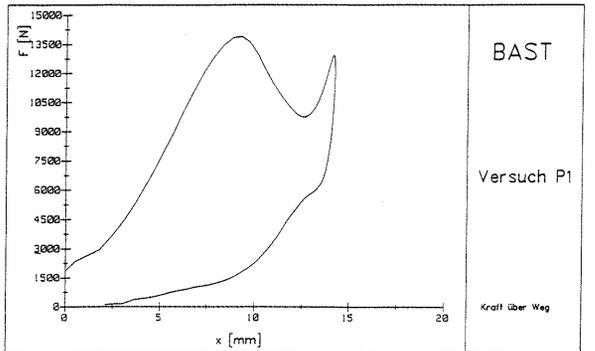
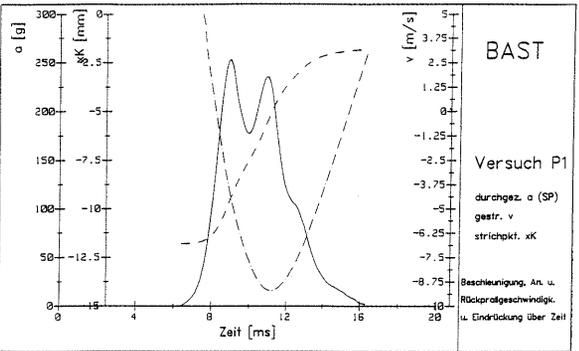
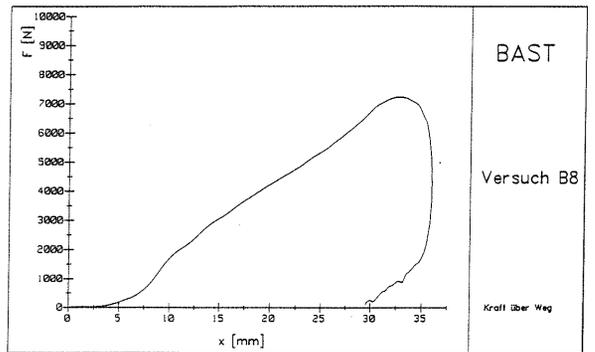
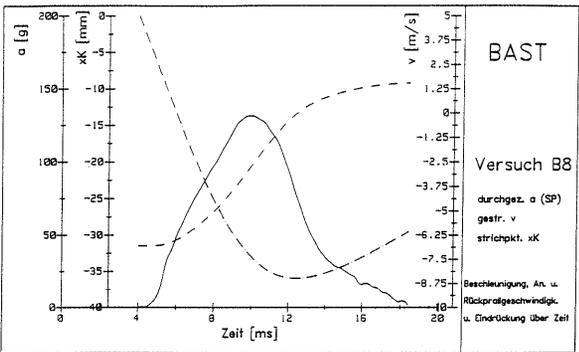
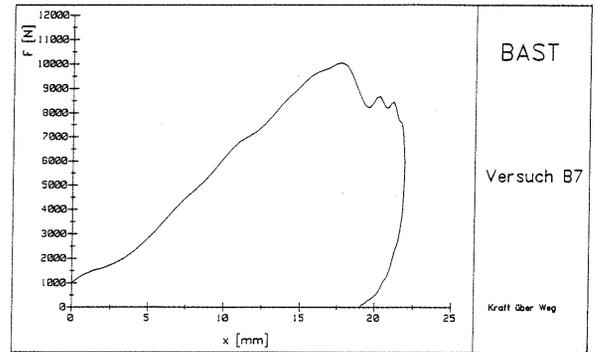
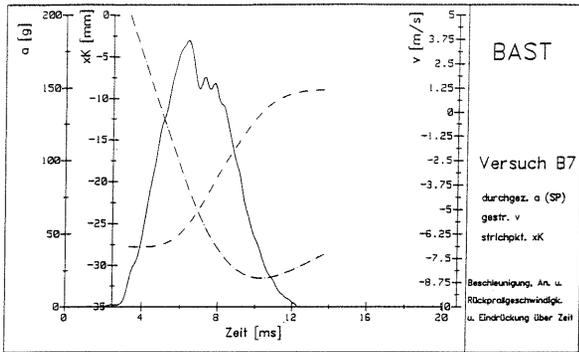


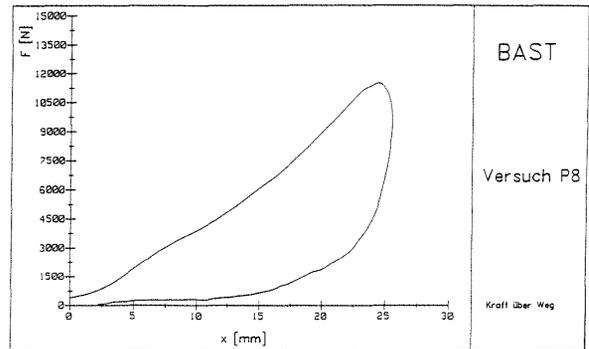
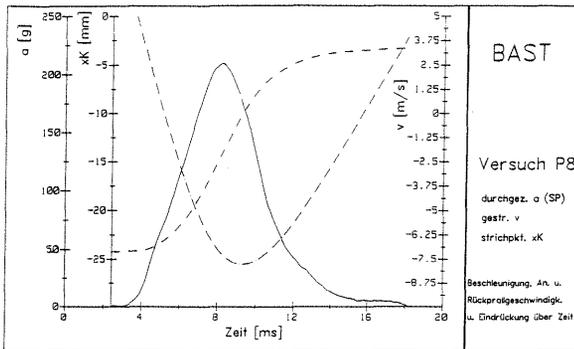
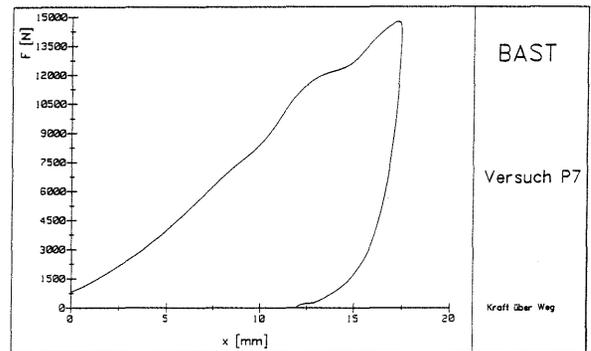
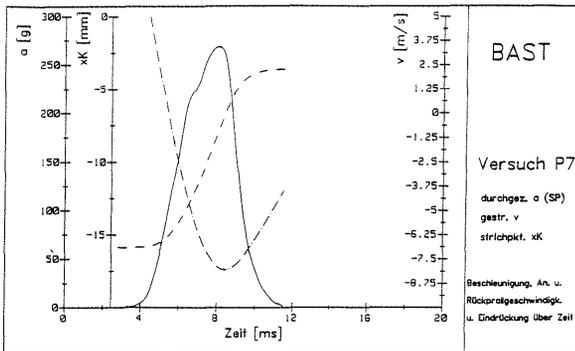
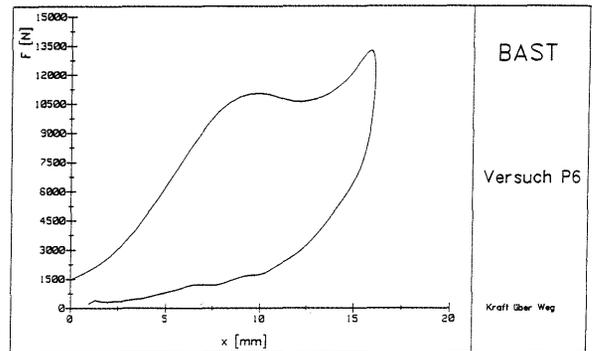
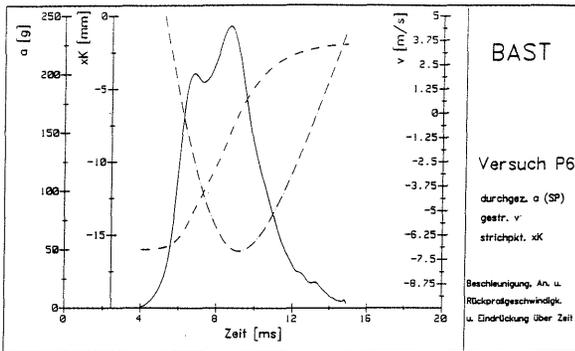
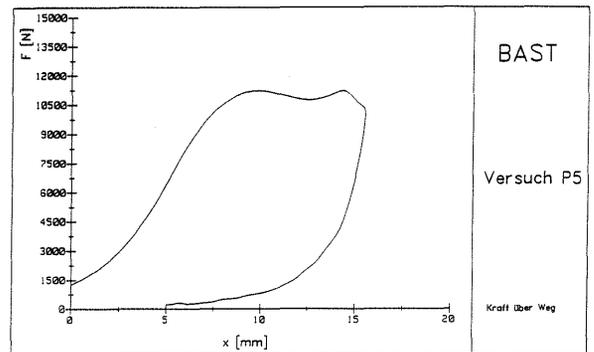
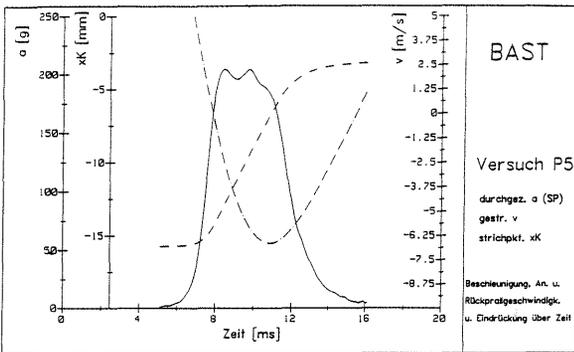
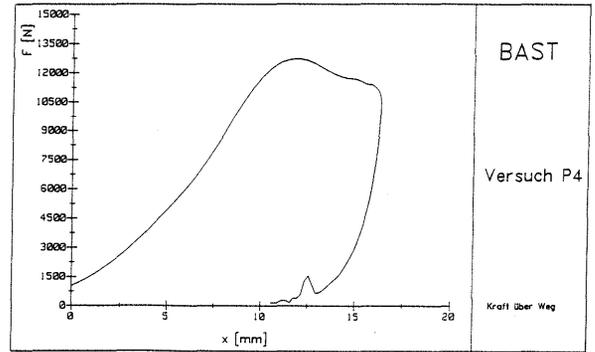
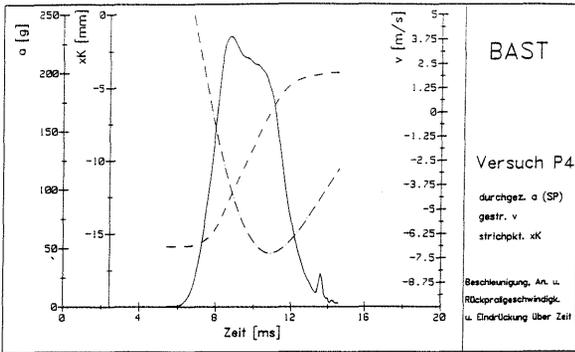






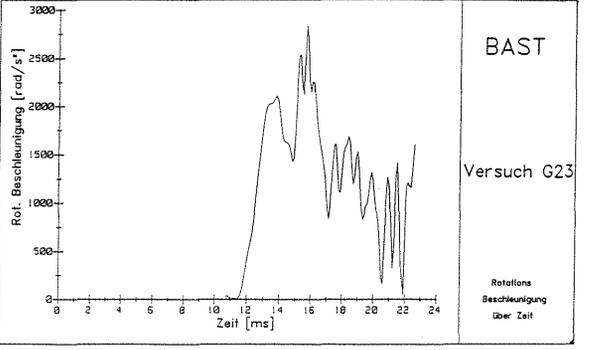
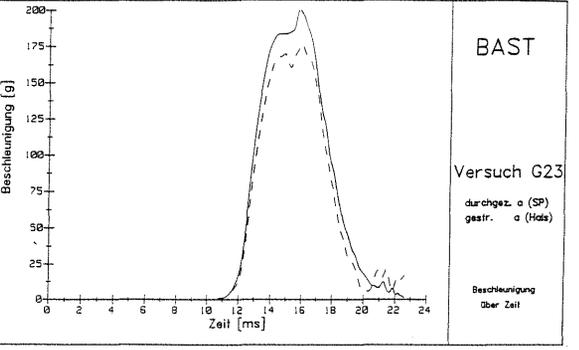
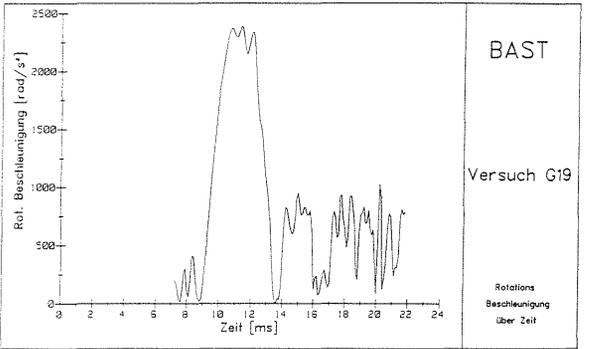
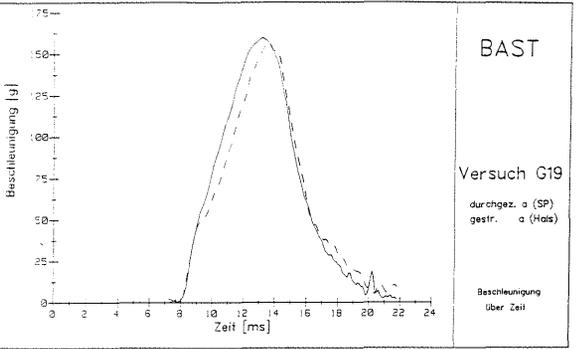
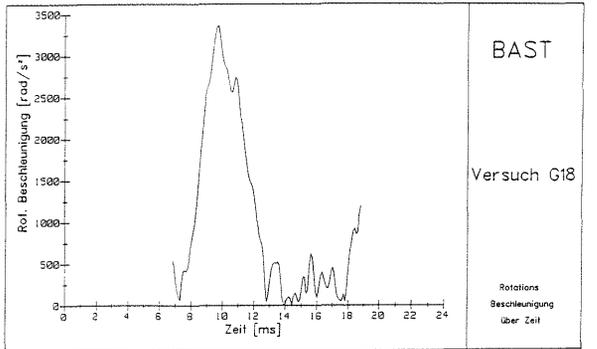
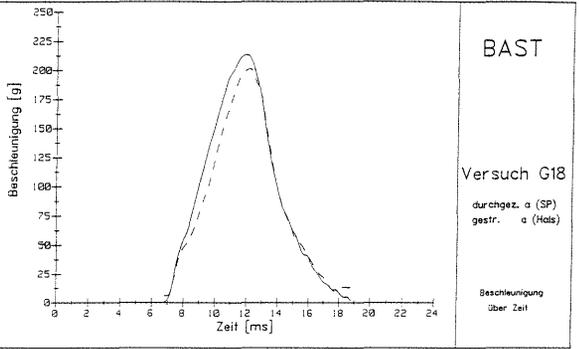
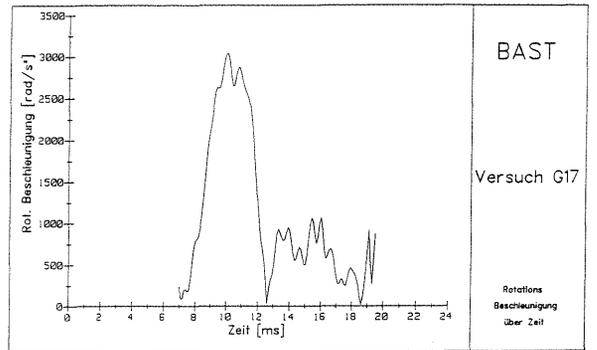
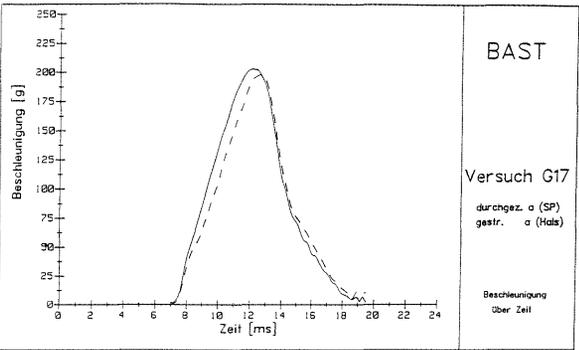
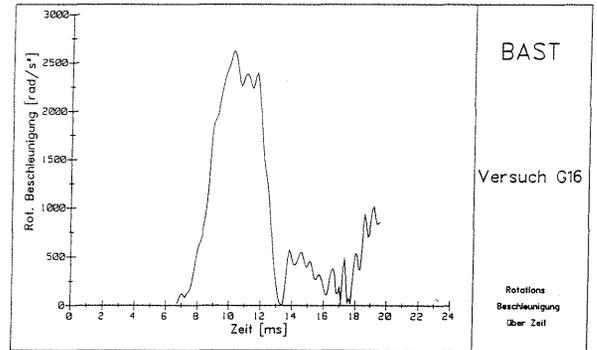
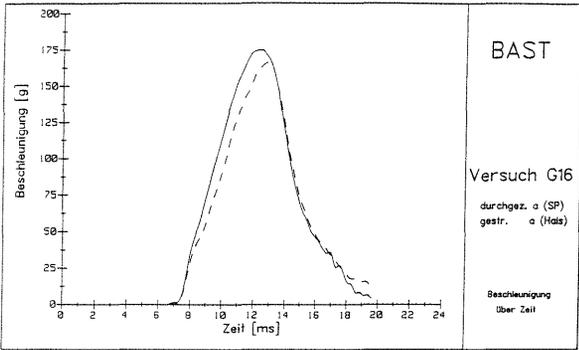


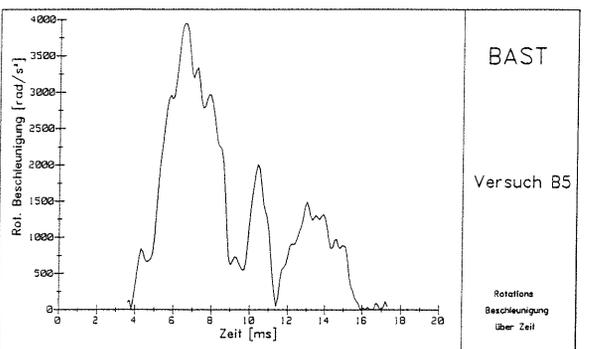
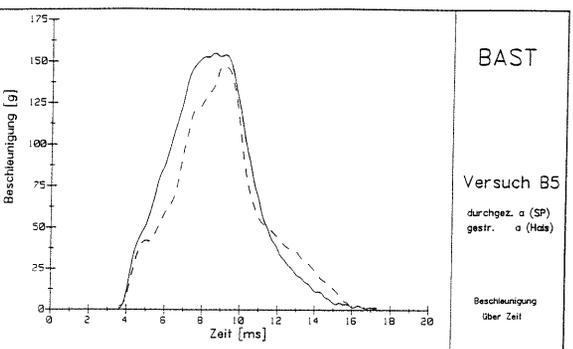
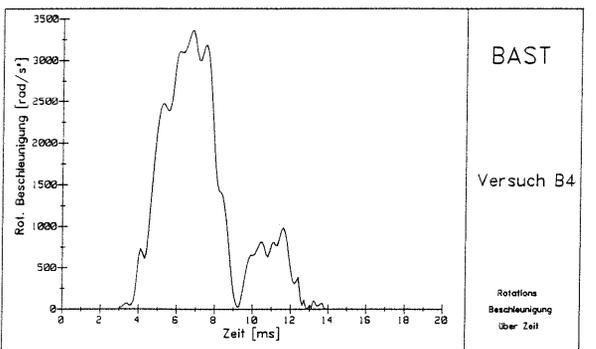
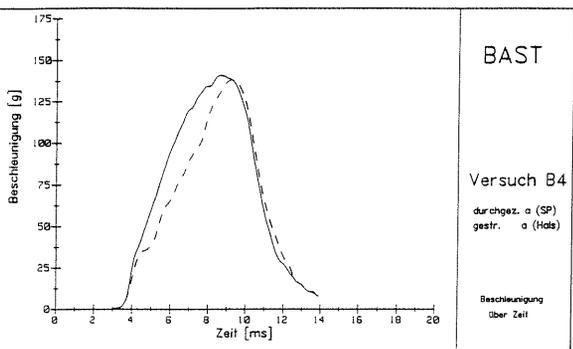
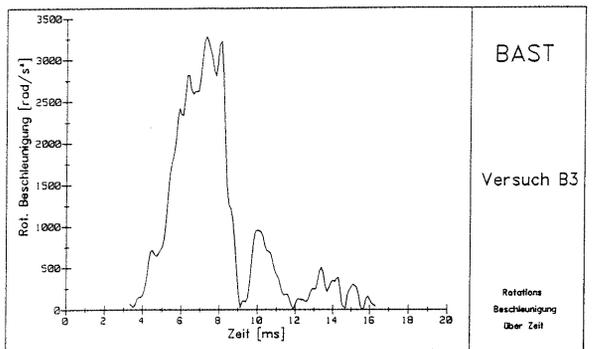
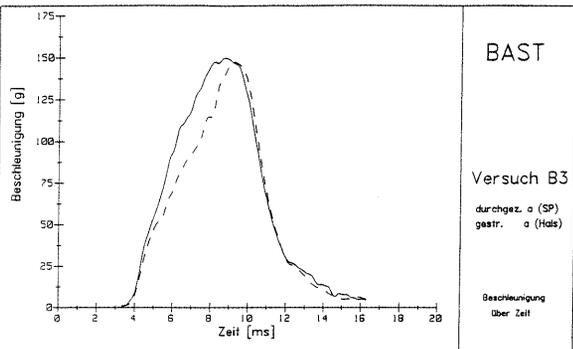
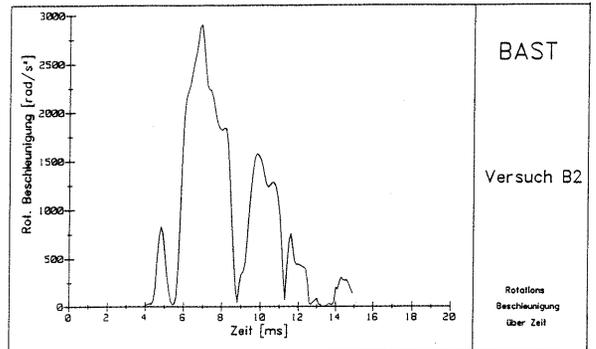
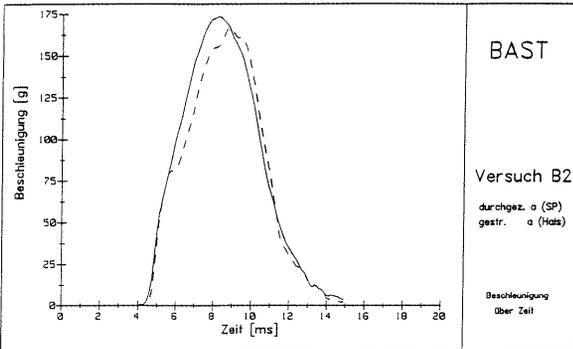
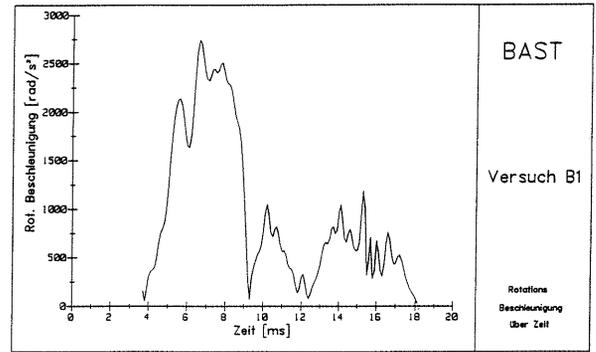
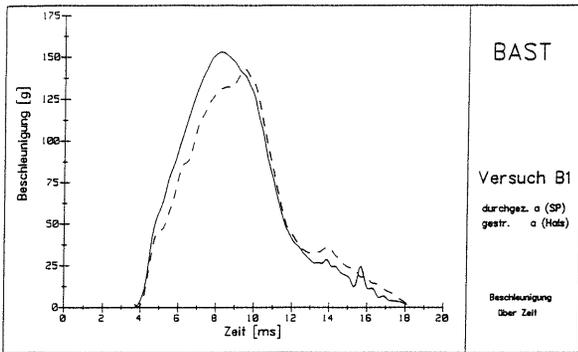


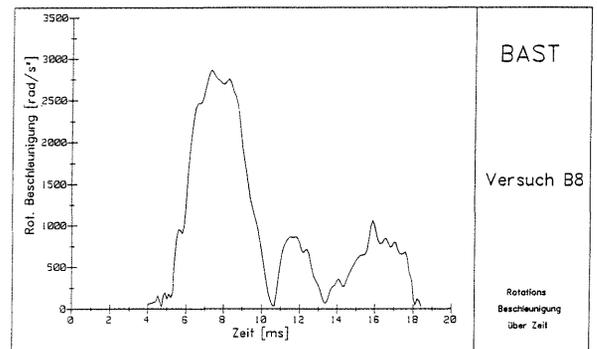
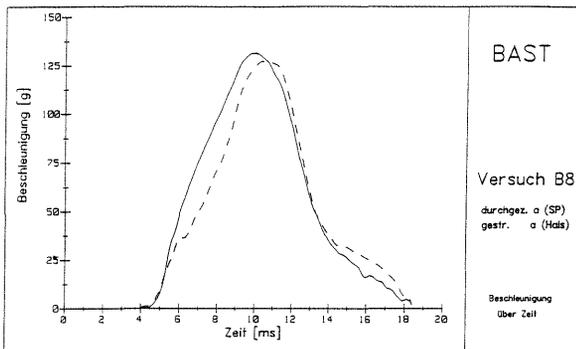
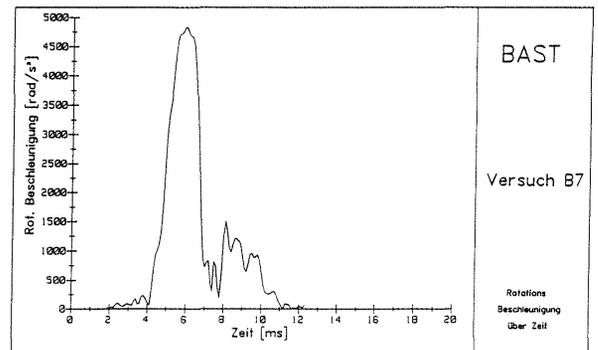
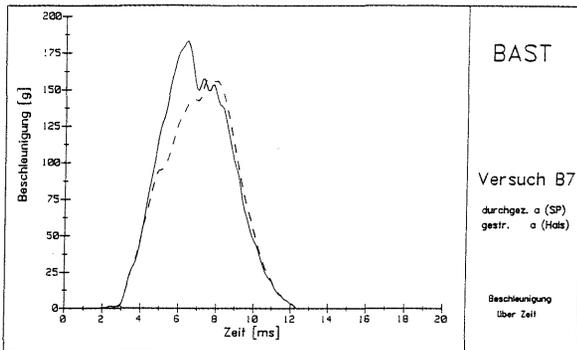
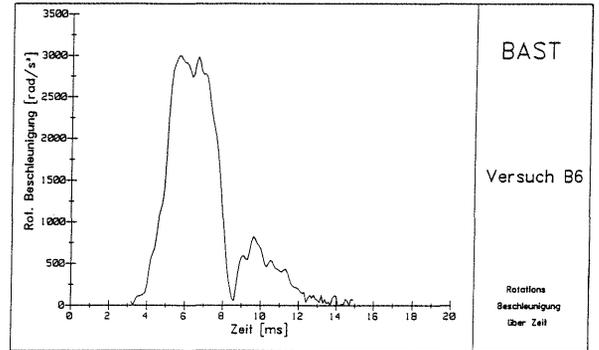
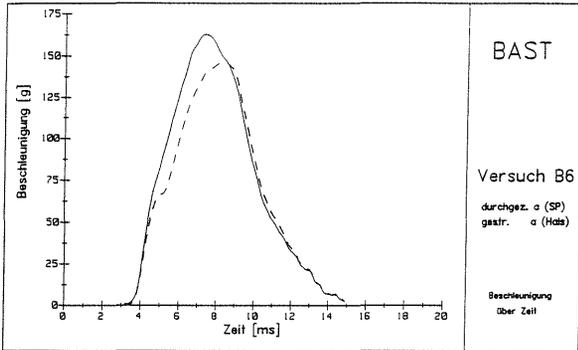


## **Anhang 4**

Rotationsbeschleunigungen/Zeit-Verläufe der Helmversuche







Schriftenreihe

**Berichte der Bundesanstalt  
für Straßenwesen**

Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

F1: Einfluß der Korrosion auf die passive Sicherheit von Pkw

von E. Faerber und G.-D. Wobben

88 Seiten, 1993

DM 23,50

F2: Kriterien für die Prüfung von Motorradhelmen

von W. König, H. Werner, E. Schuller, G. Beier und W. Spann

80 Seiten, 1993

DM 25,50

F3: Sicherheit von Motorradhelmen

von H. Zellmer

52 Seiten, 1993

DM 21,00

---

Zu beziehen durch:

Wirtschaftsverlag NW

Verlag für neue Wissenschaft GmbH

Postfach 10 11 10

D-27511 Bremerhaven

Telefon (04 71) 4 60 93-95, Telefax (04 71) 4 27 65