

Experimentelle Untersuchungen über die Art und Schwere von Frakturen am Brustkorb

K. Burow und M. Kramer

Institut für Kraftfahrzeuge der Technischen Universität Berlin

1. Versuchsanlage und Material

Das Risiko von Brustkorbverletzungen beim Insassenunfall liegt - wie die Untersuchungen des HUK-Verbandes zeigten - je nach Sitzposition zwischen 10 und 17 %. Unsere Untersuchungen beziehen sich auf den Stoß des menschlichen Thorax gegen einen stumpfen Körper. In mehr als 200 dynamischen Belastungsversuchen wurden Art und Schwere der Verletzungen in Abhängigkeit von der Belastungshöhe, der Übergang von Einzel- frakturen zu Serienfrakturen mit begleitenden Verletzungen der Organe sowie der Zusammenhang zwischen mechanischen Größen und eingetretenen Verletzungen bestimmt.

Die Versuche wurden an 1 bis 3 Tage alten Leichen durchgeführt, die vorher im Kühlraum (ca. 5° C) aufbewahrt wurden. Grundsätzlich achteten wir darauf, daß keine die Knochenfestigkeit beeinträchtigenden Krankheiten vorlagen. Die Belastungen wurden durch vollkommen starre Stoßkörper unterschiedlicher Form aufgebracht: Ein Zylinder mit 22 cm Durchmesser sowie eine Platte von 22 x 26 cm Aufprallfläche. Leiche und Stoßkörper wurden nach Art eines Doppelpendels aufeinander zubewegt, so daß sich die Aufprallgeschwindigkeit aus den beiden Einzelgeschwindigkeiten addierte. Die Masse des Stoßkörpers entsprach dabei der auf den Stoßmittelpunkt reduzierten Thoraxmasse. Der Stoßmittelpunkt wurde zwischen der Höhe des zweiten und siebenten Rippenbogens variiert; die Stoßgeschwindigkeiten betragen rund 4...8 m/s (FIG.1). In der anschließenden pathologischen Untersuchung wurden die aufgetretenen Verletzungen nach Art, Ort und Schwere bestimmt. Darüberhinaus wurden sämtliche verfügbaren Daten über den Zustand des biologischen Materials (Schwerpunktslage, Größe, Gewicht und Grundleiden sowie Zustand des Skelettes) aufgenommen. Mit Hilfe eines Digitalrechners und eines geeigneten Programmes wurden die Daten ausgewertet, die mechanischen zu den medizinischen Daten korreliert, sowie der Einfluß der verschiedensten Parameter auf die ermittelten Verletzungen bestimmt.

Zwar weist der Altersaufbau der im Krankennaus verstorbenen Patienten (FIG. 2) einen überproportional hohen Anteil der 60...90-jährigen auf, entspricht damit aber dem Anteil der Verkehrstoten in Berlin (West) in derselben Altersstufe. Das Verhältnis der Geschlechter zueinander beträgt rund 56 % Frauen zu 44 % Männern.

2. Belastungsgrenzen

Die große Streuung der Festigkeitswerte des menschlichen Skelettes (allein innerhalb einer Altersgruppe bis zu 50 %) macht es unmöglich, scharfe Belastungsgrenzen anzugeben. Sinnvoll und möglich ist es aber, die Häufigkeitsverteilung von Verletzungen für einen bestimmten Belastungstyp zu bestimmen. Trägt man zum Beispiel die Zahl der frakturierten Rippen als Maß für die Schwere der Brustkorbverletzungen über der Aufprallgeschwindigkeit auf (FIG.3), so erkennt man, daß bereits ab 4 m/s Aufprallgeschwindigkeit erste Rippenfrakturen auftreten; ab 7 m/s können aber bereits so ausgedehnte Rippenserienfrakturen auftreten, daß die Brustwand instabil wird (d.h. die Verletzungen sind lebensgefährlich bis tödlich). Zugleich zeigt das Bild deutlich die erwarteten geschlechtsspezifischen Unterschiede der Belastbarkeit: bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit brechen im allgemeinen bei Männern die Rippen weniger oft als bei Frauen.

Stoßkräfte und Verzögerungen abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit zeigt die Abbildung 4 (FIG.4) für beide Stoßkörper. Die gemessenen thorakalen Verzögerungen betragen beim Zylinder zwischen 5 und 17 g-Einheiten, bei der Platte lagen sie zwischen 5 und 25 g; die Stoßkräfte schwankten zwischen 100 und 600 kp bei beiden Stoßkörpern. Bei Stoßkräften unter 200 kp beobachtete Rippenfrakturen gehören ausnahmslos zu extrem kleinen und leichten Versuchspersonen (25.. 40 kp Körpergewicht) oder zu senften (über 85 Jahre). Die Grenze, ab der generell mit einem Bruch zu rechnen ist, liegt für den zylindrischen Stoßkörper bei etwa 200 kp Stoßkraft, das entspricht einer Verzögerung von 7 g; für den Plattenstoßkörper ermittelten wir etwas höhere Werte (330 kp Stoßlast bzw. 11 g als Bruchgrenze). Über die große Zahl der Fälle gesehen, steigt zwar die Stoßbelastung mit der Aufprallgeschwindigkeit, nicht jedoch die Grenze, ab der es überhaupt zu einem Bruch kommt.

Für die Schwere des Traumas sind meist weniger die Rippenserienfrakturen selbst als vielmehr die begleitenden Verletzungen an der intercostalen Muskulatur und den intercostalen Gefäßen, der costalen Pleura und den inneren Organen bestimmend. Bei unseren Versuchen ist allerdings die Häufigkeit von Organverletzungen im Vergleich zur Praxis relativ gering, (FIG. 5), das mag seinen Grund vor allem im fehlenden Gefäßtonus der Leichen haben. Die Art der zu beobachtenden Verletzungen hängt stark von der Stoßkörperform, dem Ort des Stoßes und der Auftreffgeschwindigkeit ab. Liegt der Stoßort niedrig (unterhalb des sechsten Rippenbogens), kommt es schon bei geringen Geschwindigkeiten (ab 4 m/s) zu Verletzungen von Leber, Milz und Nieren. Bei höheren Versuchsgeschwindigkeiten

spießen die durch Biegung frakturierten Rippen durch ihre nach innen gerichteten Bruchenden die costale Pleura auf und reißen sie zum Teil mehrere Zentimeter ein. Verletzungen der großen Gefäße waren erst bei sehr hohen Aufprallgeschwindigkeiten - ab 8 m/s - zu beobachten, Herz- und Lungenverletzungen nur in zwei Fällen. Auffällig war die sehr viel höhere Zahl von Verletzungen beim zylindrischen Stoßkörper gegenüber der Platte.

Eine etwas differenziertere Betrachtungsweise der die Festigkeit des Brustkorbes beeinflussenden Parameter (FIG.6) zeigt, daß man die Gefährdung des von einem Stoß gegen den Brustkorb Betroffenen recht gut durch vier leicht unterscheidbare Merkmale charakterisieren kann; nämlich das Alter, die Konstitution und das Geschlecht, den Muskel- und Ernährungszustand sowie durch ein möglicherweise vorhandenes, den Knochenzustand beeinträchtigendes Leiden (Osteoporose etc.). Die schwersten Schädigungen und ernstesten Verletzungen traten naturgemäß immer dann ein, wenn diese vier Merkmale Extremwerte annahmen; also sehr hohes Alter (über 75), weiblich und von zierlicher Konstitution, stark reduzierter Muskel- und Ernährungszustand und eine weit fortgeschrittene Osteoporosis.

Eine Versuchsperson kann natürlich diese Merkmale verschieden stark ausgeprägt aufweisen, aber man kann aufgrund dieser Merkmalsklassifizierung bereits das untersuchte biologische Material in vier, nach ihrem Verhalten im dynamischen Belastungsversuch deutlich unterscheidbare Gruppen einteilen (FIG.7). Traten diese vier charakteristischen Merkmale sehr ungünstig ausgeprägt auf und summierten sich ihre negativen Effekte (Gruppe 1), so konnten Rippenserienfrakturen bereits ab 4 m/s Aufprallgeschwindigkeit beobachtet werden. Ab 6,5 m/s Aufprallgeschwindigkeit besteht für diese Gruppe eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit, schwere Brustkorbverletzungen davonzutragen; ohne Frakturen blieb kein Angehöriger dieser Gruppe. Weisen dagegen die vier Merkmale günstige Werte auf (Gruppe 4), beginnt erst ab 6 m/s Auftreffgeschwindigkeit das Risiko von Frakturen. Keine Versuchsperson dieser Gruppe hatte bis zu einer Geschwindigkeit von 7 m/s mehr als 4 frakturierte Rippen.

Diese hier angedeutete Möglichkeit der Klassifizierung biologischen Materials nach leicht unterscheidbaren Merkmalen kann nur eine erste Näherung darstellen; der Vorteil dieser Methode liegt darin, bei biomechanischen Untersuchungen aus den Ergebnissen der Versuche mit einer Gruppe auf die Resultate mit Personen aus einer anderen Gruppe schließen zu können.

3. Einfluß der Stoßkörperform

Die starken Unterschiede in den Ergebnissen mit beiden Stoßkörpern (Zylinder und Platte) lassen sich durch die unterschiedliche Verletzungsmechanik erklären (FIG.8). Beim Zylinder treten einseitige Rippenfrakturen stets unterhalb des Zylinders auf, d.h. die Frakturen liegen auf derselben Seite wie der Stoßmittelpunkt. Trifft dagegen die Platte den Brustkorb seitlich, so werden die Rippen auf der gegenüberliegenden Körperhälfte stärker auf Biegung beansprucht, so daß die Frakturen nicht unter der Platte, sondern hier auf der gegenüberliegenden Körperhälfte häufiger auftreten. Zugleich wurden wesentlich weniger Sternumfrakturen beobachtet, (6 Fälle); im Gegensatz zum zylindrischen Stoßkörper traten sie nur zusammen mit ausgedehnten Rippenserienfrakturen auf. Bei gleicher Aufprallgeschwindigkeit waren beim Zylinder relativ häufiger Rippenbrüche zu beobachten als bei der Platte (FIG.9). Die kritische Geschwindigkeit, bei der bei 50 % aller Fälle mindestens eine Rippe gebrochen wurde, liegt für den Zylinder bei etwa 4,5 m/s, bei der Platte dagegen bei 5,7 m/s. Der höhere Formwiderstand des Brustkorbs gegen flächennahe Belastungen ergab etwas höhere Bruchverzögerungen (11 g gegen 7 g) und um etwa 130 kp höhere Stoßkräfte, ab denen Rippenbrüche auftraten.

Der unterschiedliche Formeinfluß wird besonders deutlich, betrachtet man die Weichteil- und Organverletzungen (FIG. 10). Die Häufigkeit von Verletzungen für die einzelnen Bereiche beträgt bei der Platte höchstens ein Drittel derjenigen des Zylinders.

4. Zusammenfassung

Unsere Experimente über die Art und Schwere von Frakturen am Brustkorb ergaben als kritische Werte, ab denen mit Verletzungen gerechnet werden muß, eine Aufprallgeschwindigkeit von 4,5 bis 5,5 m/s (abhängig von der Stoßkörperform) ein Verzögerungslimit von 7 bzw. 11 g und eine unterste Bruchlast von 200 kp beim Zylinder bzw. 330 kp bei der Platte. Die Grenzggeschwindigkeit von 4,5 m/s (= 15 km/h) für das auftreten erster Frakturen entspricht sehr genau der oberen Grenze der Wirksamkeit energieabsorbierender Stoßfängersysteme wie sie jetzt in den US-Sicherheitsnormen gefordert werden. Bis zu dieser Geschwindigkeit sind daher bei einem möglichen Anprall des Insassen gegen das Lenkrad oder die Armaturenanlage keine oder doch nur geringfügige Verletzungen zu befürchten. Eine einfache Methode wurde zur Klassifizierung der Versuchspersonen nach leicht unterscheidbaren Merkmalen entwickelt, die es gestattet, aus den Resultaten der Versuche mit ungünstigem biologischen Material auf die Verhältnisse bei einem kräftigeren Organismus Rückschlüsse zu ziehen.

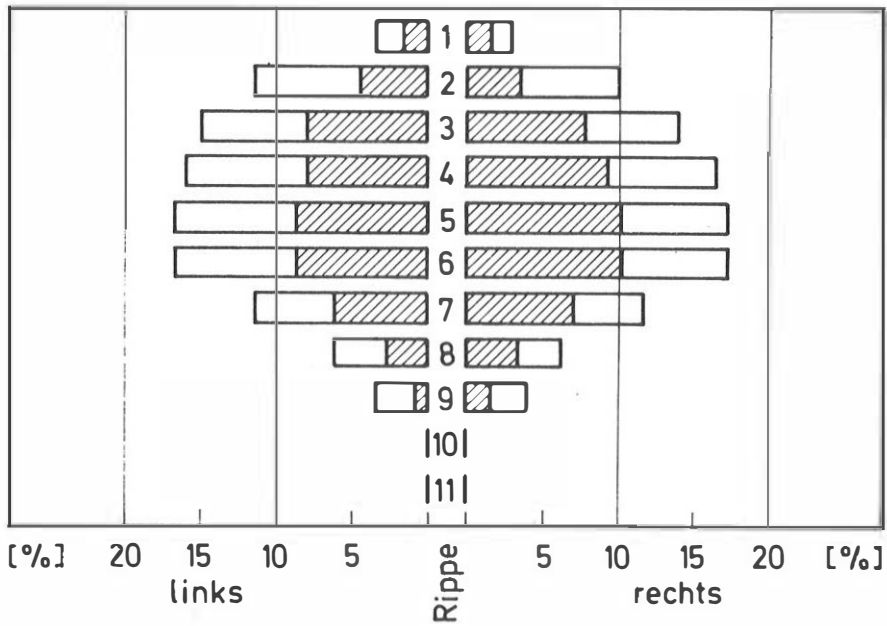


Fig. 1 Verteilung der Stoßmittelpunkte über den Brustkorb

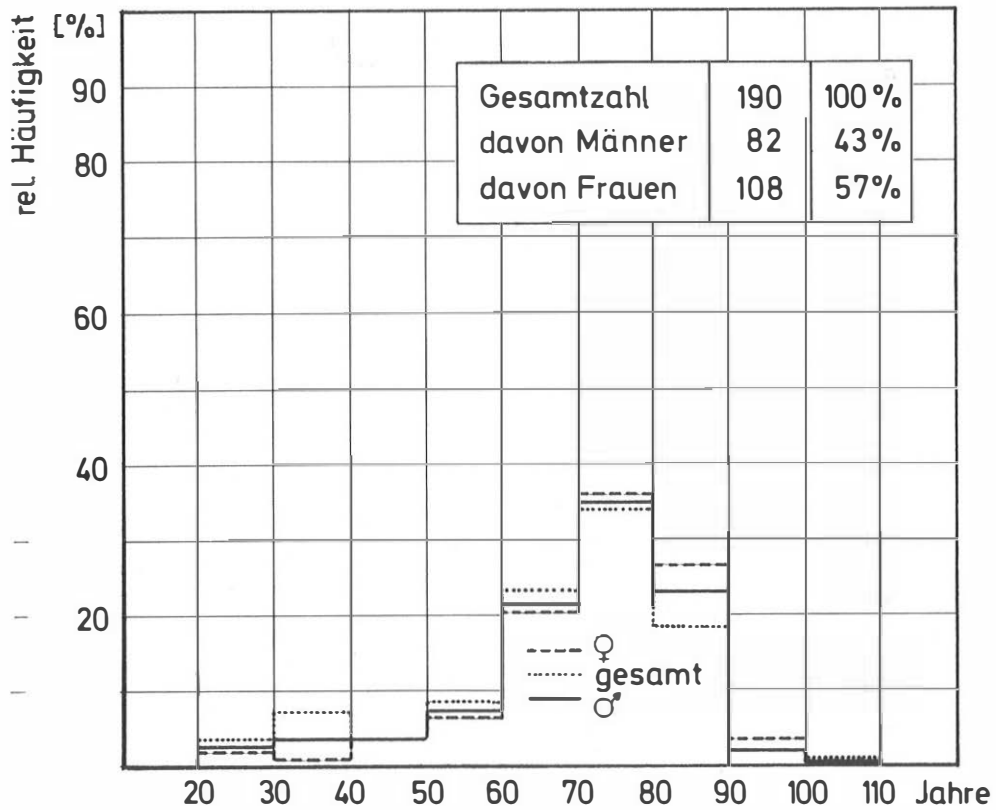


Fig. 2 Altersverteilung der Versuchspersonen

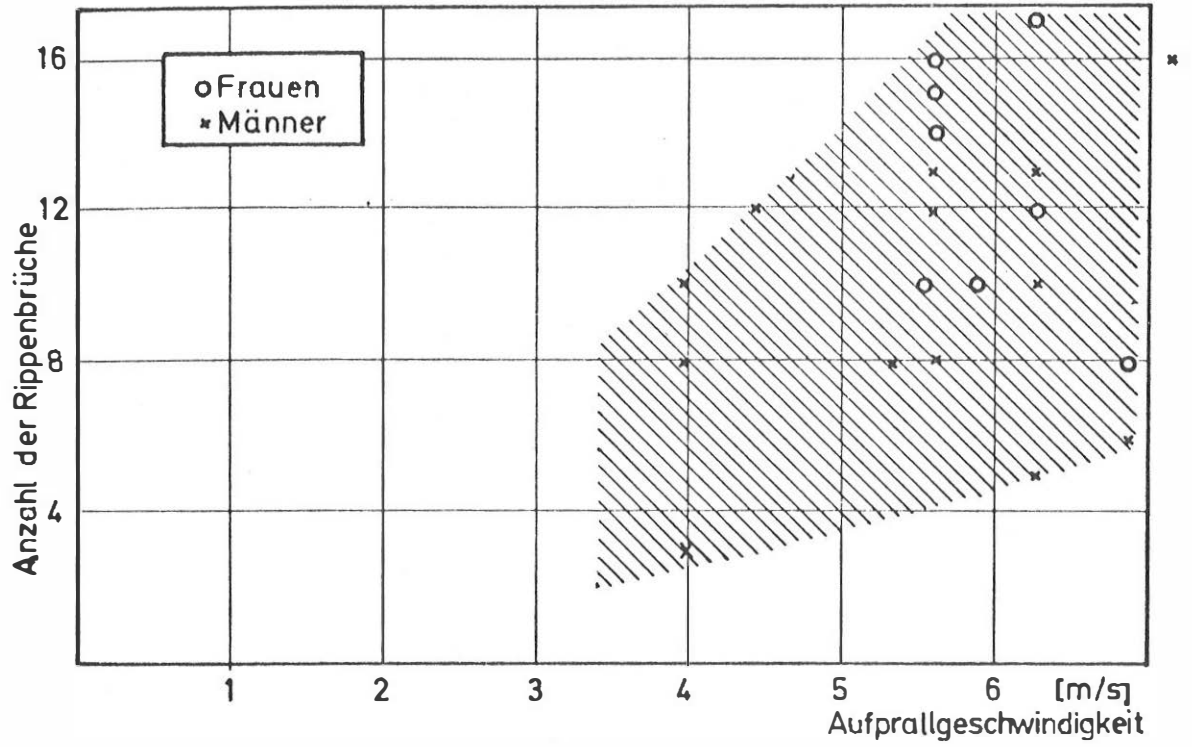


Fig. 3 Rippenfrakturen, abhängig von der Aufprallgeschwindigkeit

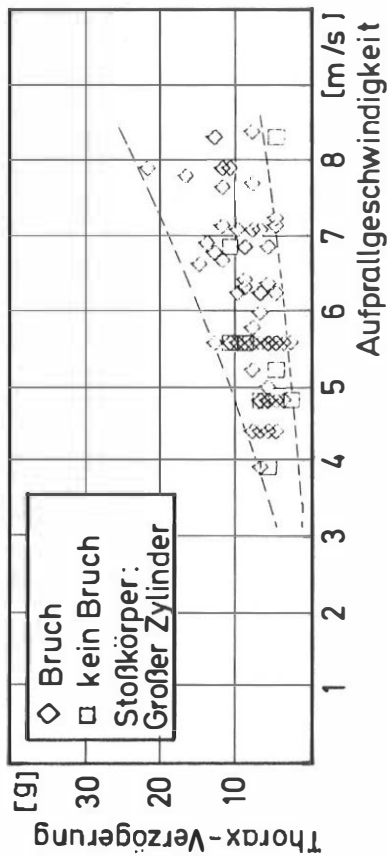


Fig. 4a Thorax-Verzögerungen, großer Zylinder

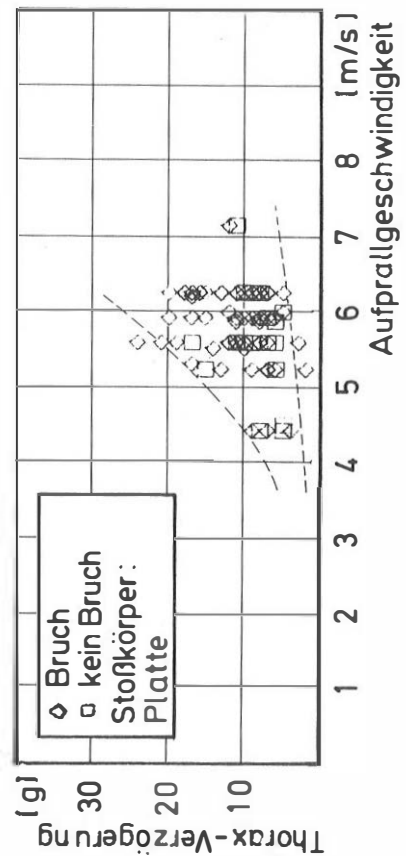


Fig. 4b Thorax-Verzögerungen, Platte

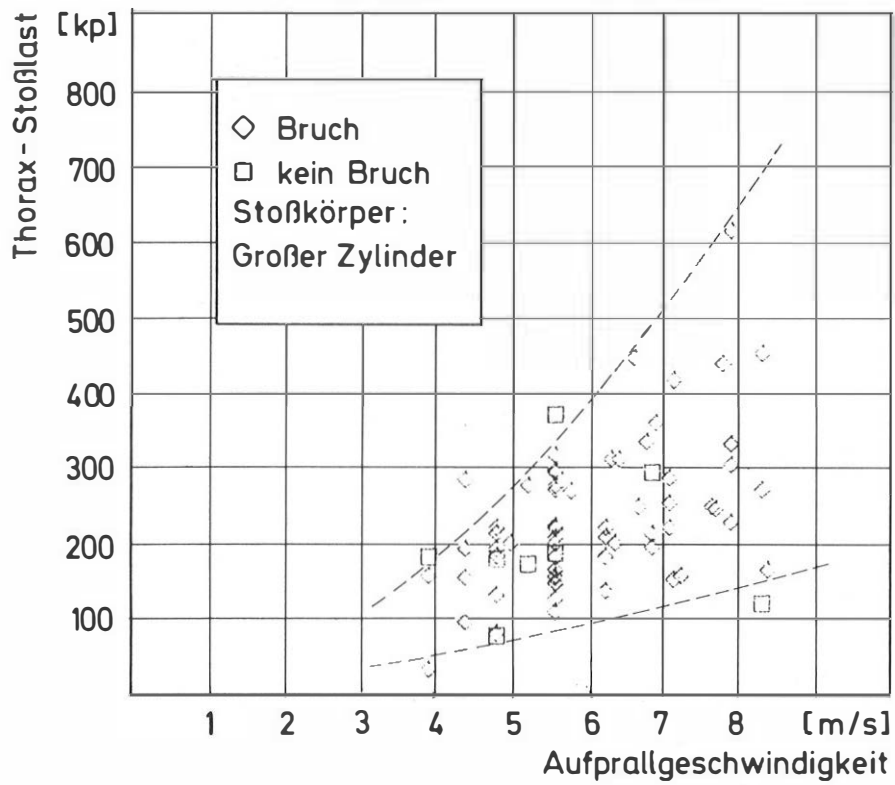


Fig. 4c Thorax-Stoßlast, großer Zylinder

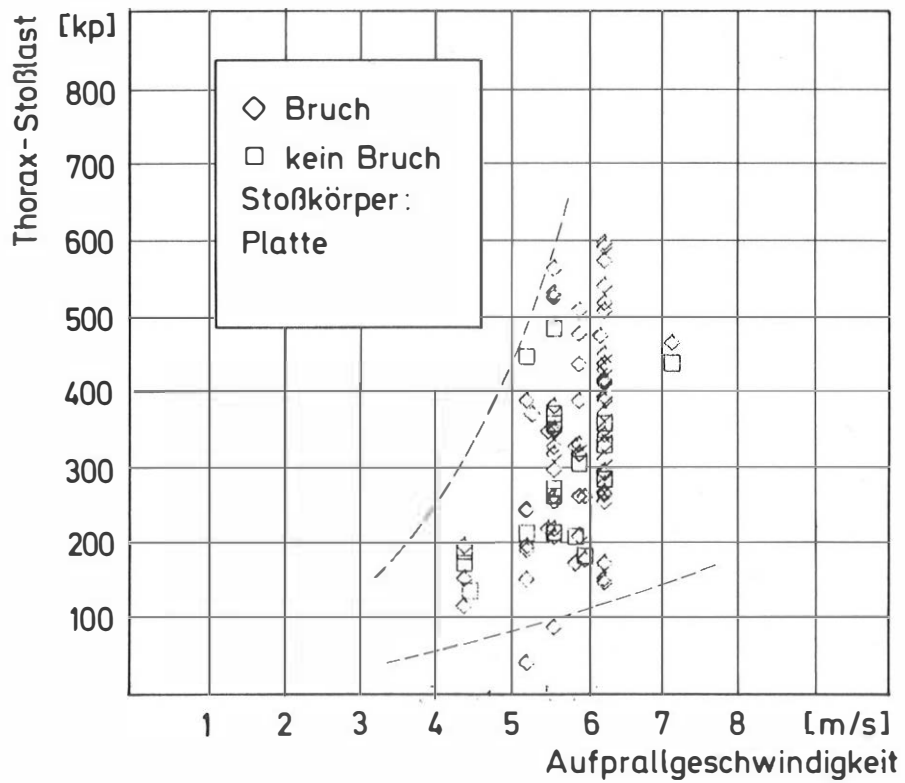


Fig. 4d Thorax-Stoßlast, Platte

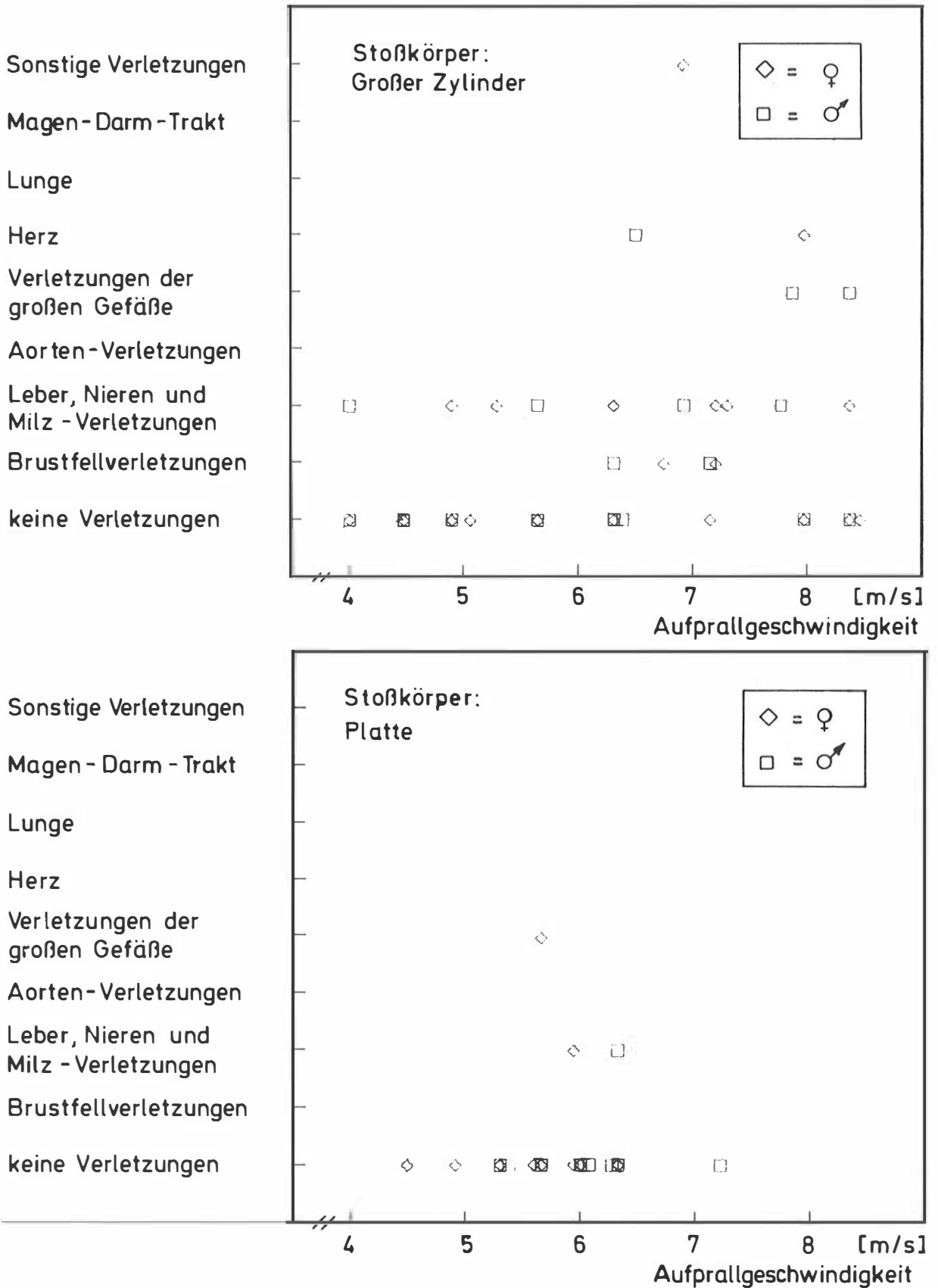


Fig. 5 Organverletzungen bei beiden Stoßkörpern

| Merkmal | Gruppe 1 (x) | Gruppe 2 (O) | Gruppe 3 (□) | Gruppe 4 (Δ) |
|------------------------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| Alter (Durchschnitt) | > 75 (80) | > 60 (55) | > 30 (35) | < 30 (35) |
| Statur Knochenbau, Geschlecht | zierlich, weiblich | normal, weiblich | normal, männlich | kräftig, männlich |
| Ernährungszustand Muskelzustand | stark reduziert | reduziert | normal | adipös |
| Osteoporose | schwere | mittlere | leichte | keine |

Fig. 6 Beeinflussungsgrößen

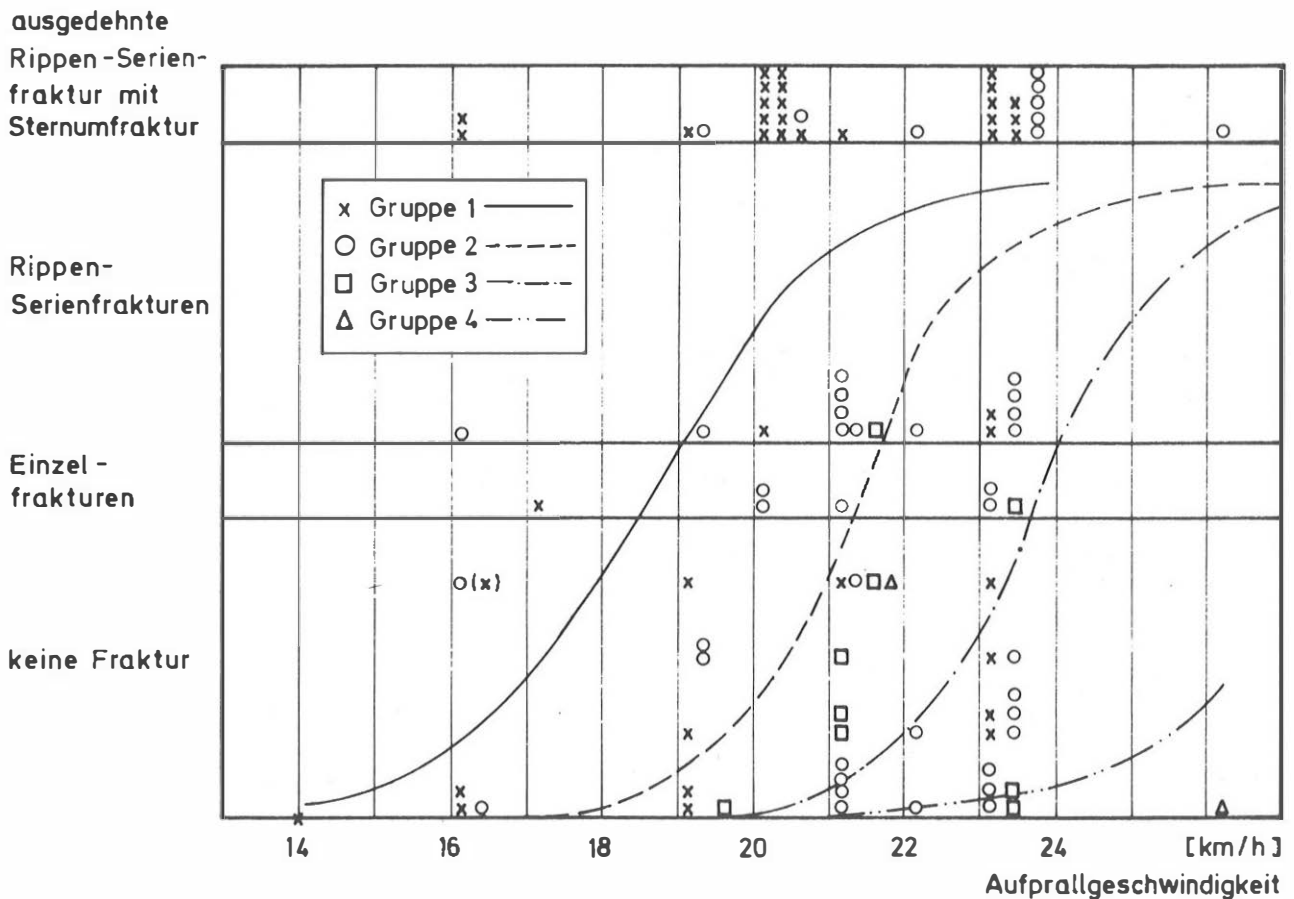


Fig. 7 Rippenfrakturen in Abhängigkeit von Beeinflussungsgrößen und Aufprallgeschwindigkeit

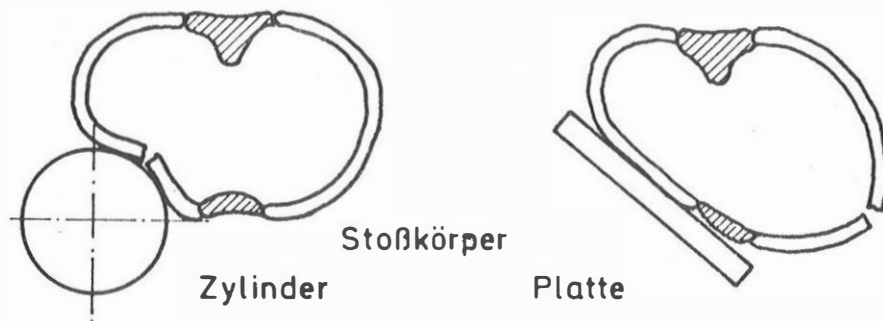


Fig. 8 Bruchort der Rippen bei seitlichem Aufprall mit beiden Stoßkörpern

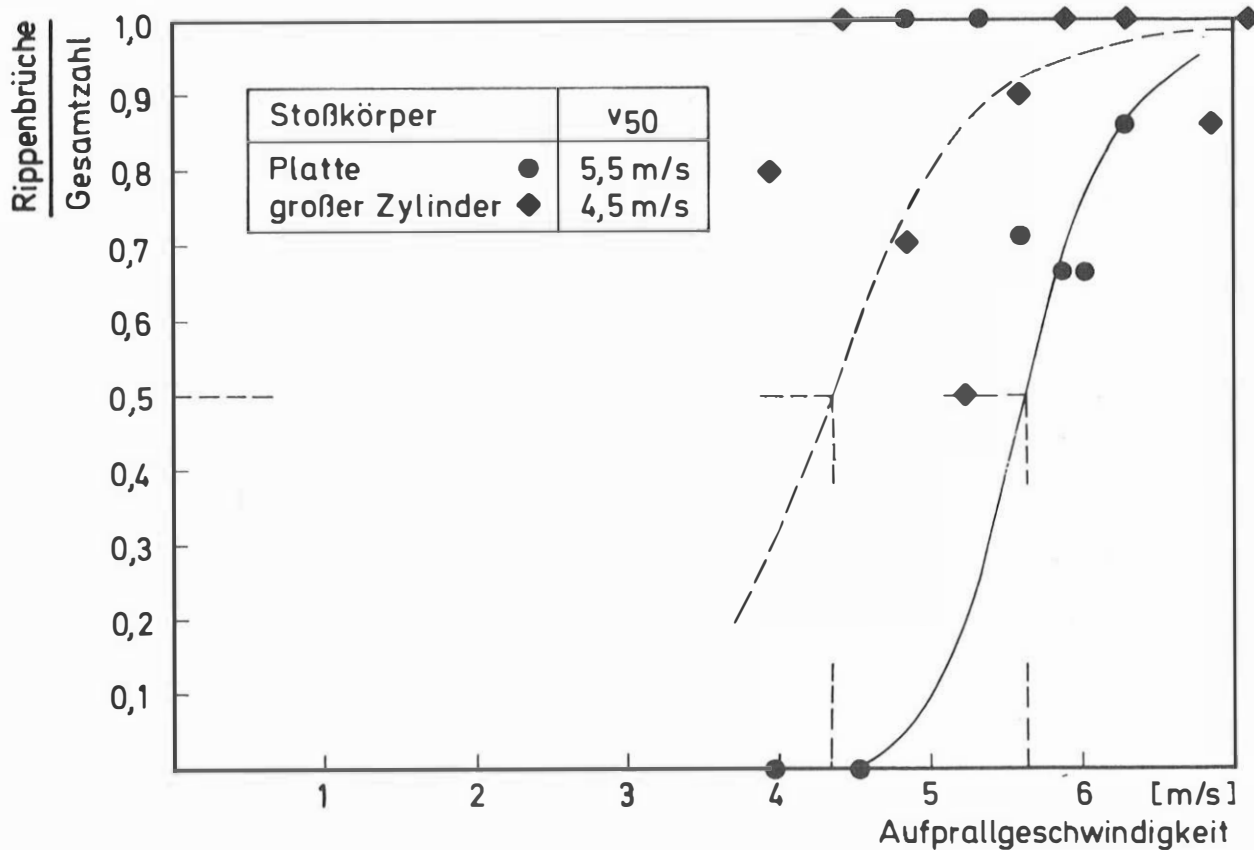


Fig. 9 Formeinfluß und Belastungsgrenze

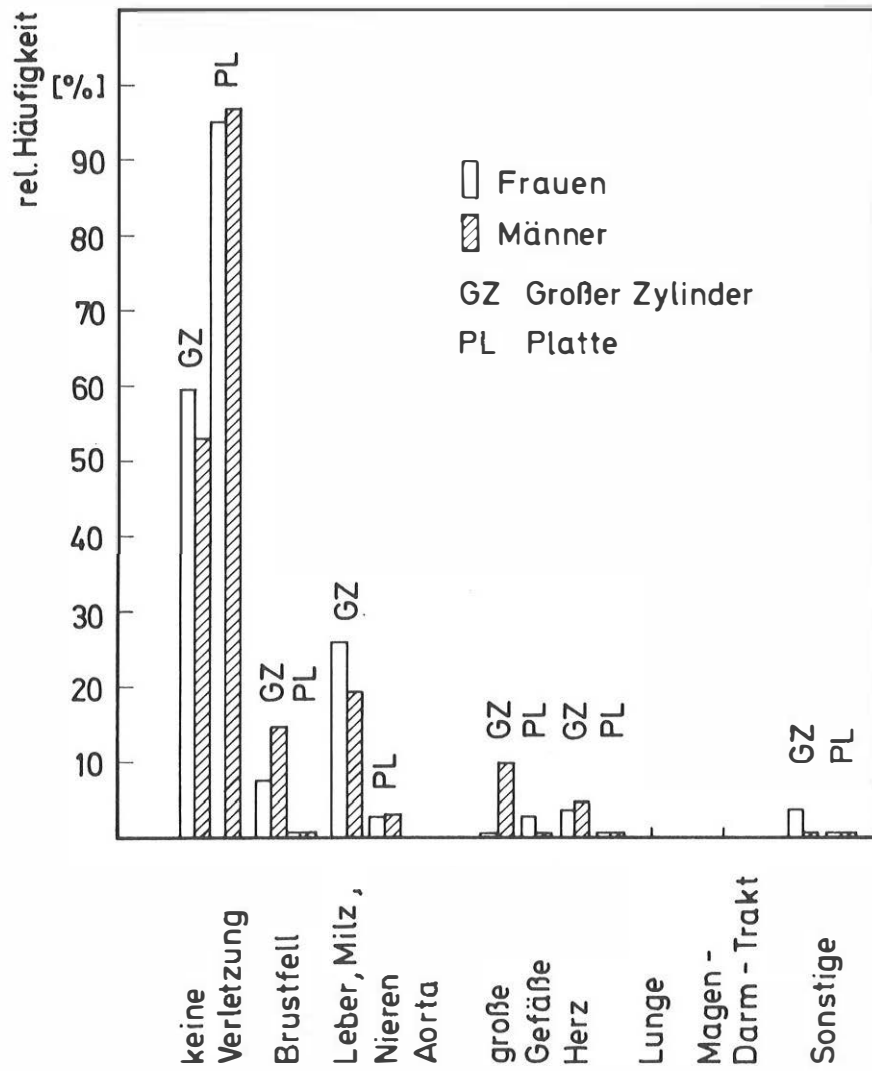


Fig. 10 Formeinfluß auf Organverletzungen