

Die stumpfe Hirnverletzung im Lichte der anatomischen Physik*.

Von
JUSTUS SCHNEIDER.

Mit 4 Textabbildungen.

(Eingegangen am 13. September 1951.)

Während des Krieges hatte ich neben anderen Aufgaben der systematisch und wissenschaftlich begründeten Prophylaxe von Unfällen (die ebensoviel Opfer fordern, wie die großen Seuchen!) die Aufgabe, Schutzhelme und Sturzhelme zu bauen und deren Brauchbarkeit zu prüfen. So, wie für jegliche Art von medizinischer Prophylaxe die Kenntnis der *genauen Atiologie* das Fundament bilden muß, so ergab sich auch hier als erste Notwendigkeit, das Zustandekommen von stumpfen Hirnverletzungen so genau kennenzulernen, daß daraus bindende Schlüsse für die konstruktive Arbeit gezogen werden konnten. Da nun das Unfallgeschehen ein exquisit *physikalisches* Problem ist, bedeutet das: Die genaue Kenntnis der Kräfte zu erlangen, die bei der stumpfen Hirnverletzung bis zur Bruchgrenze des Schädels wirksam sind. Es ergab sich also die Frage nach den Aufschlagskräften in kg, deren Dauer und Richtung. Die Schwierigkeit der Kraftmessung lag darin, daß der Unfallvorgang sich nur auf eine äußerst kurze Zeitspanne in der Größenordnung von $2,5 \cdot 10^{-3}$ sec erstreckt, und daß diese Kräfte überraschend groß sind. Wenn auch Messungen dieser Art direkt möglich sind, so ist der experimentelle Aufwand dafür so kompliziert, daß andere Methoden gefunden werden mußten, die sich daraus ergaben, daß die Aufschlagskraft als Funktion anderer Größen auftreten kann, die der Messung leichter und womöglich zuverlässiger zugänglich sind. In der folgenden kleinen Formelsammlung bedeuten: m = Masse (hier des Kopfes), v = Geschwindigkeit bei Beginn des Aufschlages, s = Verformungsweg beim statischen Zusammenpressen des Schädels bis zum Auftreten von Fissuren einen η Faktor, der sich aus dem Integral ableitet („Völligkeit“), \mathfrak{R} = Aufschlagskraft.

Berechnung der maximalen Aufschlagskraft aus Masse, Geschwindigkeit vor dem Aufschlag und Verformungsdiagramm des Schädels:

* Nach einem anlässlich der Tagung der deutschen Gesellschaft für Neurochirurgie, Bonn 12. 9. 1950, gehaltenen Vortrag.

I. (Kraft über Weg gleich):

$$\text{Arbeit} = \text{Kraft} \times \text{Weg}$$

$$A = \mathfrak{F} \cdot s, \text{ aber auch}$$

Arbeit = kinetische Energie, also

$$A = \mathfrak{F} \cdot s = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

II. (Kraft über Weg ungleich, wie beim Schädel):

$$A_1 = \int_0^s \mathfrak{F} \cdot ds, \text{ setzt man}$$

$$\frac{\int_0^s \mathfrak{F} \cdot ds}{\mathfrak{F}_{\max} \cdot s} = \eta \text{ so ist}$$

$$A_1 = \mathfrak{F}_{\max} \cdot s \cdot \eta \text{ es ist aber auch}$$

$$A_1 = \frac{m \cdot v^2}{2} \text{ also}$$

$$\mathfrak{F}_{\max} \cdot s \cdot \eta = \frac{m \cdot v^2}{2} \text{ daher}$$

$$\text{maximale Aufschlagskraft } \mathfrak{F}_{\max} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot s \cdot \eta}$$

Aus den Quotienten der also gemessenen Aufschlagskraft und der Masse des aufschlagenden Körpers ergibt sich die Beschleunigung, in diesem Falle negative Beschleunigung (künftig hin nur noch „Beschleunigung“ genannt!), die während des Aufschlages maximal eintritt. Drückt man diese Beschleunigung im Vielfachen der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ aus, so ist man in der Lage, die nun eintretenden physikalischen Veränderungen unter den Gesichtswinkel dieser Beschleunigung als einen übergeordneten Begriff zu betrachten. Experimentell wurde in der Weise vorgegangen, daß Kopfpräparate mit definierten steigenden Geschwindigkeiten durch Aufprall auf eine Betonplatte plötzlich auf Null verzögert wurden. Dieser Vorgang wurde solange wiederholt, bis durch fortlaufende Röntgen-Kontrollen und teilweise Sektionen pathologische Veränderungen, in diesem Falle Eintritt von Fissuren, nachgewiesen wurden. Nachdem eine große Zahl von derartigen Versuchen in dem anatomischen Institut in Halle durchgeführt waren, ergab sich, daß der Eintritt von Fissuren sehr konstant bei einer Aufschlagsgeschwindigkeit von fast genau 6 m/sec eintrat. Die Verformungsarbeit blieb dabei konstant und es stellte sich heraus, daß bei dickeren Schädeldecken der Verformungsweg entsprechend kürzer war. Es konnte auch erwiesen werden, daß der Aufschlag der Hirnmasse von hinten auf die auftreffende Kopfstelle die Festigkeit der Schädelkapsel merklich erhöht und daß daher das leere Kopfpräparat eine geringere dynamische Festigkeit hat als gefüllte. Einzelheiten des physikalischen Vorgehens habe ich a. a. O. veröffentlicht¹. In absoluten Zahlen ausgedrückt ergab sich

¹ Verfass. Klin. Wschr. 26, 43 ff. (1948).

folgendes: Bei einer Fallhöhe von 1,80 m (bemerkenswert = ungefähre Traghöhe) und einer korrespondierenden Aufschlagsgeschwindigkeit von 6 m/sec erleidet der Schädel samt seinem Inhalt für die Zeit von etwa $3 \cdot 10^{-3}$ sec eine Beschleunigung von etwas mehr als 500 g. Eingeleitet wird der Beschleunigungsvorgang durch eine stark gedämpfte Schallwelle von sehr kurzer Dauer. Im Vergleich zu ihr, die mit einer Geschwindigkeit der Größenordnung von etwa 1500 m/sec das Hirn durchheilt, ist der Beschleunigungsvorgang relativ langdauernd. Über das Frequenzspektrum dieser Schallwelle, über ihre wirkliche Dauer, ihren Schalldruck und die durch sie hervorgerufenen molekularen Beschleunigungswerte ist mir bislang nichts bekannt geworden. Es ist anzunehmen, daß sie im Sinne der Thixotropie¹ bei der Erklärung der Commotio eine Rolle spielt und bedarf der Erforschung. Hier aber sei nur der Beschleunigungsvorgang im eigentlichen Sinne abgehandelt. Es ergibt sich die Frage, welche physischen Konsequenzen sind zu erwarten, wenn das Hirn samt Schädelkapsel kurzfristig unter eine Beschleunigung von 500 g gerät? Um dem Vorstellungsvermögen entgegenzukommen, sei eine Tabelle von Beschleunigungswerten beigelegt, in der die wichtigsten hier vorkommenden Beschleunigungswerte (59 g und 500 g) in der Nähe vergleichbarer und der Erfahrung zugänglicher Werte aufgesucht werden können (Abb. 1).

Den Hirnschädel kann man physikalisch reduziert als ein Ovaloid von etwa 18 cm Längs- und 10 cm Querausdehnung auffassen (Abb. 2), das eine Reihe von kleineren membranbedeckten Öffnungen (Orbita, Nerven, Gefäßöffnungen usw.) besitzt und das seitlich 10 cm hinter dem Stirnpol eine etwa 3 cm große Öffnung, das Hinterhauptloch, aufweist. Die Wandung dieses Ovaloids ist aus einem recht festen und zugleich elastischen Werkstoff gebildet. Dieses Kopfovaloid ist von Hirn erfüllt, das eine Struktur und eine Textur aufweist. An bestimmten Stellen ist das Hirn von der Schädelkapsel durch unstrukturierten Liquor geschieden. An anderen Stellen, nämlich der „basalen Rinde“ des Stirn- und Schläfenlappens kommt es unmittelbar an die Schädelkapsel heran (Spatz). Außerdem erfüllt der Liquor im Inneren des Hirns die Ventrikel. Hirn und Liquor sind unter gewöhnlichen Umständen gasfrei, haben eine Kompressibilität von etwa 0,005 %/Atm. und eine dem Wasser entsprechende Dichte. Was geschieht nun mit dem Kopf, wenn er plötzlich stoßartig beschleunigt wird, und welches müßten die anatomischen Folgen dieses physikalischen Vorganges im Hirn sein?

Da die Kopfkapsel weder völlig fest ist, wie z. B. annähernd eine Stahlhohlkugel, noch völlig elastisch wie z. B. eine gefüllte Gummiblase, so müssen die beiden Grenzzustände: völlig fest und völlig elastisch,

¹ Hallervorden, Zbl. Neurochir. 1—2, 37 ff.

Arch. f. Psychiatr. u. Z. Neur., Bd. 187.



Abb. 1. Physikalisch - biologische Tabelle der auf den Menschen wirksamen Beschleunigungen. Als Einheit wird die Erdbeschleunigung gewählt: $1 g = 9,81 \text{ m/sec}^2$. Andere in der Wissenschaft bekannte Beschleunigungsgrößen sind als Vergleichsmäßtäbe beigefügt. Maßverhältnis logarithmisch. Die hier interessierenden Werte finden sich zwischen 50 und 500 g. (Aus Verf., „Der Mensch im Schwerkraftfeld“. Umschau in Wissenschaft und Technik 24, 737 [1949].)

zunächst gesondert betrachtet werden. Nehmen wir als erstes Modell des Kopfes eine vollkommen elastische mit Wasser gefüllte Gummiblase (Abb. 3), die in einer Flüssigkeit schwimmt, so sind alle äußeren Kräfte aufgehoben und die Blase ist im Idealzustand eine vollkommene Kugel. Legen wir dieses Modell auf ein Brett, setzen es also unter Erdbeschleunigung von 1 g , so wird das Modell etwa die Form von Abb. 3b annehmen. Bei wachsender Beschleunigung würde sich die Gestalt nach 3c usw. ergeben und schließlich würde das Modell platzen und das Wasser nach unten und seitlich ergießen.

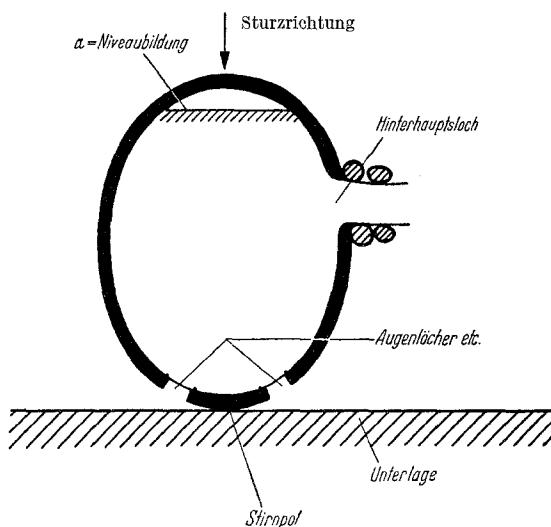


Abb. 2. Aufschlagschema des auf das physikalisch Wichtigste reduzierten Kopfovaloids. Die membranbedeckten Öffnungen sind als „Augenlöcher“ angedeutet. (Klin. Wschr. 26 3/4 [1948].)

Betrachten wir dagegen ein Kopfmodell, das vollkommen starr ist, mit einigen Löchern, die membranös verschlossen sind, so wird sich zwar die starre Hohlkugel voraussetzungsgemäß nicht verformen, aber ihr *Inhalt* würde bei steigender Beschleunigung das Bestreben haben, sich nach Abb. 3 zu verformen, d. h. nach unten sich zu verbreitern (auszulaufen, wenn möglich) und sich oben abzuflachen. Würden wir nun ein solches starres Kopfmodell 77 cm hoch anfertigen und es mit Quecksilber füllen, dann würde sich dieses Riesenmodell wie ein Quecksilberbarometer verhalten, d. h. es würde unter Erdbeschleunigung oben ein Niveau in Höhe von 76 cm gebildet und unten würde eine entsprechende Quecksilbermenge durch die Augenlöcher auslaufen. Bei diesem Modell würde also bei der Erdbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$ sich eine *morphologische Veränderung am Gegenpol* bilden (etwa nach Abb. 2).

Der menschliche Kopf gleicht nun dem Beispiel des starren Modells nahezu, obwohl er eine gewisse Verformbarkeit hat und daher seine Verformung beim Aufschlag schon meßbar der Verformung nach Abb. 3 zu strebt. Damit nun bei dem Beispiel der Quecksilberfüllung des Kopfmodells ein Vakuum und ein Niveau am Gegenpol entsteht, muß der Bodendruck des Quecksilbers am Auflagepunkt gerade eine Atm. sein. Dieser Bodendruck p berechnet sich nach der Gleichung $h \cdot \varrho \cdot g = p$ (h = Höhe, ϱ = Dichte, g = Beschleunigung), im Gegensatz zu dem gedachten mit Quecksilber gefüllten Modell. Ist aber beim wirklichen Schädel die Höhe nur 18 cm und die Dichte nicht 13 g/cm^3 sondern nur etwa 1 g/cm^3 , so ergibt sich also die Frage: Wie groß müßte die Beschleunigung unter diesen Umständen sein, damit am aufschlagenden

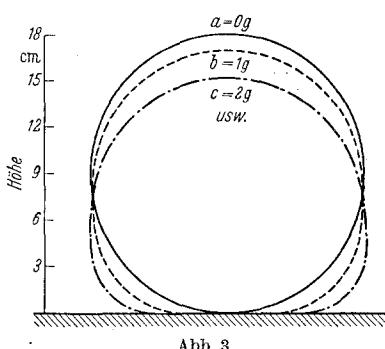


Abb. 3.

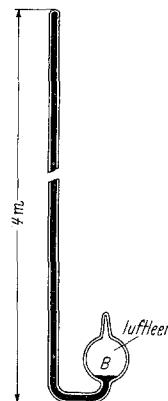


Abb. 4.

Abb. 3. Verhalten einer von einer vollkommen elastischen Membran umgebenen Flüssigkeitskugel, die unter steigenden Beschleunigungen auf einer Unterlage ruht. (Klin. Wschr. 43, 3/4 [1948].)

Abb. 4. Demonstration der Zerrißfestigkeit eines Wasserfadens. Das Wasser ist durch Ausköchen im Vakuum luftfrei gemacht. (Aus R. W. POHL, Einführung in die Mechanik 6. Aufl., 125. Berlin 1942.)

Pol ein Druck von einer Atm., am Gegenpol also gerade ein TORICELLI-sches Vakuum entstehen könnte? Für 17 cm Niveau-Höhe errechnet sich nach der obigen Formel: Beschleunigung $b = 59 \text{ g}$. Dabei sei vom Wasserdampfdruck im Vakuum wegen der Geringfügigkeit abgesehen. Wenn also die Beschleunigung des Kopfinhaltes mindestens 59 g beträgt, dann erhält der *Gegenpol* seine physikalische und morphologische Charakteristik dadurch, daß dort eine Niveaubildung eintritt. Aus meinen a. a. O. veröffentlichten Messungen (siehe Fußnote Seite 354) ergibt sich aber, daß die Beschleunigung beim Eintritt einer Fissur nicht 59 g sondern fast das Zehnfache beträgt! Bei dieser Beschleunigung wirkt sich aber die vis a tergo des aufschlagenden Hirns als ein momentaner Druck von etwa 8 Atm. aus, was u. a. zur Folge hat, daß die Fraktur der Schädelkapsel ohne Inhalt bei recht merklich gerin-

gerer Arbeitsaufnahme eintritt als beim Aufschlag des hirnerfüllten Kopfes. Die vis a tergo des plötzlich abgebremsten Gehirns verfestigt gewissermaßen von hinten den Aufschlagsort, solange die Beschleunigung anhält. 59 g werden schon erreicht bei einer Fallhöhe zwischen $20-30\text{ cm}$, also bei einer Aufschlagsgeschwindigkeit von etwa $2,2\text{ m/sec}$. Dieser Wert steht in Übereinstimmung mit den klinischen Beobachtungen. Betrachtet man aber den Beschleunigungswert von 500 g , bei dem die Fissuren in der Schädelkapsel sich zu bilden beginnen, so läßt sich unschwer berechnen, daß die zu einer Niveaubildung gehörende Höhe h des Kopfinhaltes nur etwa 3 cm zu betragen braucht. Schon ein kleiner Kopf würde also bei entsprechender Beschleunigung Contrecoup-Herde aufweisen müssen. Tatsächlich hat PETERS bei seinen Kaninchenversuchen, wobei er das kleine Kaninchenhirn mit einem schweren Pendel beschleunigte, schon Contrecoup-Herde gefunden. Im Rahmen der vorgetragenen Theorie ist eins seiner Versuchsergebnisse besonders wichtig: Der Contrecoup-Herd trat nur auf, wenn der Kopf des Kaninchens *nicht* festgeschnallt war. Das heißt: Wenn eine *wirkliche Beschleunigung* eintreten konnte. Ließ man das Pendel auf dem festgeschnallten Kaninchenkopf fallen, dann traten zwar Aufschlagszertrümmerungen auf, aber keine Contrecoup-Herde. Da nun auch bei einem Schlag auf den festgeschnallten Kopf die oben erwähnte initiale Schallwelle auftritt, der Contrecoup aber fehlt, kann man daraus den Schluß ziehen, daß die Schallwelle (die man auch als Druckwelle auffassen kann) nicht, oder wenigstens nicht allein die Ursache der Contreherde sein kann. Die *Beschleunigung* ist dazu unerlässlich. *Keine Contrecoup-Verletzung ohne Beschleunigung!* Physikalisch gesehen kann ein Contrecoup-Herd bei gedeckten Hirnverletzungen, die zu einer Schädelfissur führen, schon 3 cm oberhalb des Aufschlagsortes beginnen. Welches sind nun die physikalischen Ursachen der anscheinend regellosen, in ihren Grundzügen aber doch bekannten Anordnung der Prellungsherde innerhalb des Hirns?

In diesem Zusammenhang muß an eine wenig bekannte Eigenschaft der Flüssigkeiten erinnert werden: nämlich an ihre Schwerzerreißlichkeit. Entgegen dem Augenschein haben nämlich Flüssigkeiten eine hohe Zerreißfestigkeit (Wasser etwa $0,3\text{ kg/mm}^2$). Einzelheiten über die physikalische Gesetzmäßigkeit möge man der physikalischen Fachliteratur entnehmen. Beigefügt sei bloß als Abb. 4 eine Darstellung aus Pohls Lehrbuch der Physik. Notwendig zu wissen ist, daß die Festigkeit eines Flüssigkeitsfadens in Abhängigkeit steht 1. von der Haftung der Flüssigkeit an den Rohrwänden, 2. von einer Taillenbildung im Flüssigkeitsfaden und 3. von dem Gasgehalt der Flüssigkeit. Die Textur des Hirns kann man unter diesen Gesichtspunkten auch auffassen als eine Ansammlung von mikroskopisch kleinen Flüssigkeitsröhren, eben den Zellen. In diesen Röhren sind aber die genannten 3 Bedingungen der

Haftung an der Zellwand, der Einschnürung des Fadens und des Gasgehalts in sehr variablem Ausmaß wirksam. Insbesondere ist der Unterschied deutlich zwischen den liquorerfüllten, also unstrukturierten Räumen und dem eigentlichen Hirn sowie zwischen dem Hirn und den Gefäßen. Bei den oben beschriebenen negativen Drücken, die im Bereich der Contrecoup-Verletzungen kurzfristig auftreten müssen, finden kurzfristige Ausgasungen statt, an deren Stelle sich die Zerreißfestigkeit der Flüssigkeitsfäden verändern wird. Da die mikroskopischen Flüssigkeitsröhren der Zellen in ihren Querschnitten durchaus ungleich sind, so ist es klar, daß der physikalische Ort einer im Bereich der möglichen Contrecoup-Verletzungen eintretenden Hirnzerreißen von mehreren Faktoren maßgebend beeinflußt wird. Es ist z. B. wahrscheinlich, daß die frühzeitig auftretenden Zerreißungen in gut durchblutenden Furchen und die dort beobachteten Blutaustritte damit zusammenhängen, daß das Blut als besonders gasreiche Flüssigkeit schon Zerreißungen zuläßt, die in gasarmen Gebieten erst bei höherem Vakuum wahrscheinlich werden. Im ganzen kann man sagen, daß die physikalischen Voraussetzungen für Hirnzerreißen bei hohen Beschleunigungen weithin im Gehirn gegeben sind, ja soweitgehend, daß die unmittelbaren Wirkungen am Aufschlagsort sich damit ohne deutliche Grenze vermengen können.

Trotzdem sind die Lokalisationen der gedeckten Hirnverletzungen in der Nähe des Tentoriumrandes und in der Gegend des Hirnstamms bei schwerer Gewalteinwirkung wohl begründet. Man muß sich vor Augen halten, daß die kurzfristige Beschleunigung eine phantastische Höhe erreicht. Um ein augenfälliges Bild zu gebrauchen ist sie 18 mal höher als auf der Sonnenoberfläche! Wie in dem Quecksilberversuch aber dargelegt wurde, muß unter dem Beschleunigungszustand eine entsprechende Flüssigkeitsmenge, die der Niveau-Bildung am Contre-Herd entspricht, an anderen Stellen austreten. Dieser Austrittsvorgang ist, wie der ganze Unfallvorgang auf einige tausendstel Sekunde beschränkt und bedeutet ein Vor- und Zurückfahren der Hirnmasse.

Wenn aber am Tentoriumschlitz und am Hinterhauptloch der Querschnitt stark eingeengt ist, muß die relative Verschiebung der Hirnteilchen gegeneinander und gegen den einengenden und relativ stillstehenden Rand an dieser Engstelle am größten sein. Demgegenüber spielt die Verteilung des Aufschlagsdruckes, wie sie ANZELIUS¹ für eine geschlossene Kugel vorführt, eine weniger auffällige Rolle.

Auf die Verhältnisse am kindlichen Hirnschädel will ich hier nicht näher eingehen. Sie sollen einem besonderen Vortrag vorbehalten bleiben. Nur so viel sei hier mitgeteilt: Physikalisch gesehen ist das Problem

¹ Halmar Sjövall, The genesis of skull and brain injuries, Kopenhagen.

beim Säuglingsschädel wegen seiner Nachgiebigkeit ein so völlig anderes, daß die Entstehung eines Contrecoup-Herdes in den Bereich der Unwahrscheinlichkeit rückt. Modellversuche haben das gleiche bewiesen und eine Umfrage bei den deutschen Pathologen hatte das Ergebnis, daß unter den Berichterstattern nicht einer eine Contrecoup-Verletzung bei dem Säuglingsschädel beobachtet hat.

Die gefundenen Ergebnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen.

1. Die stumpfe Hirnverletzung ist im wesentlichen ein hydrodynamischer Vorgang.
2. Während einer Zeitdauer von einigen tausendstel Sekunden entsteht ein Beschleunigungsfeld von dem mehr als 500fachen der Erdbeschleunigung oder dem etwa 18fachen der Sonnenbeschleunigung.
3. Eingeleitet wird der Beschleunigungszustand durch eine das Hirn durchheilende Schallwelle, deren Physik noch nicht näher analysiert wurde.
4. Während des Beschleunigungsvorganges entsteht am Gegenpol ein Vakuum, wobei das Gehirn ein Niveau zu bilden bestrebt ist. Daher die medianen Einebnungen, die Zerreißungen der Gyri und andere Erscheinungen. Das ist die Contrecoup-Verletzung.
5. Zerreißungen können auch an anderen Orten des Gehirns entstehen, weil schon nach 3 cm Schichthöhe am Aufschlagspunkt der Druck von 1 atü. überschritten werden kann. Der Ort der Zerreißungen ist bestimmt durch die Zerreißfestigkeit der Flüssigkeit im Hirngewebe, das unter anderen auch als Häufung von Mikro-Flüssigkeitsfäden aufzufassen ist.
6. Während der kurzzeitigen Beschleunigung kommt es infolge der Trägheitskräfte zu einem kurzzeitigen Fließen, zu einer relativen Bewegung der Hirnmasse gegenüber den unbewegten Teilen, z. B. am Hinterhauptsloch. Durch diese Relativbewegungen werden bei sehr hohen Beschleunigungen besonders am Hirnstamm und am Tentorium Zerreißungen mit Blutungen erzeugt.
7. Während des Aufschlags wird auf der hirnwärtigen Seite der Aufschlagsfläche ein kurzzeitiger Druck erzeugt, der eine Höhe von etwa 8 atü. erreicht. Er führt zu Zerreißungen, Blut- und Liquoraustritten und erhöht die Stoßfestigkeit des aufschlagenden Teils der Schädelkapsel.
8. Das Fehlen der Contrecoup-Verletzung bei Säuglingen ist dadurch bedingt, daß das kindliche Hirn nicht auf Zerreißung beansprucht werden kann.

So schließt sich der Ring der Beweisführungen völlig dicht. Die Ursache dieser Studien war eine Aufgabe der Unfallverhütung (Helmforschung). Sie konnte nur auf Grund der genauen physikalisch-anatomischen Analyse gelöst werden. Es ist notwendig, daß man der Unfallforschung auf dem adäquaten Weg der Aufhellung der physikalischen Ätiologie eine sichere Grundlage gibt. Sie ist die unerlässliche Voraussetzung einer konsequenten Unfallverhütung und damit geeignet, durch richtige und physikalisch begründete Verhütungsmaßnahmen zur Verminderung der Unfälle beizutragen.

Dr. med. habil. J. SCHNEIDER, Fulda, Marienstr. 11.