

Aus dem Pathologischen Institut der Universität Rostock
(Direktor: Professor Dr. HERMANN LOESCHKE).

**Hohe, bisher noch wenig bekannte Druckstoßwirkungen
von Explosionen.**
(Experimentelle Studie.)

Von
W. SCHUBERT.

Mit 3 Textabbildungen.

(Eingegangen am 19. März 1954.)

Begriffe wie Luft- und Wasserstoß sind erst während des 2. Weltkrieges eingeführt worden. In Hinzufügung des „Erdstoßes“ wurde in einer eigenen Mitteilung in mehr umfassendem Sinne und auch den Folgeerscheinungen mehr gerecht werdend, von *Druckstoß* gesprochen, der in allen Fällen das physikalisch wichtige Moment darstellt. Unsere Kenntnisse in diesen heutzutage wichtigen Fragen dürften, obwohl schon mehrfach Untersuchungen des In- und Auslandes durchgeführt wurden, immer noch nicht erschöpft sein. Was meines Erachtens bekannt ist, sind relativ schwache Druckstoßwirkungen und solche mittleren Grades, wie sie sich insbesondere im 2. Weltkriege bei der sog. Luftstoßwirkung mit Lungenblutungen, Schleimhautblutungen im Nasen-Rachenraum und Lungenrissen ergaben, die die Entstehung von Luftembolien ermöglichten. Diese Feststellung findet weiter eine Stütze in damals vertretener Auffassung RÖSSLERs, daß in der arteriellen Luftembolie (des großen Kreislaufes) in erster Linie die Todesursache bei Einwirkung naher Detonationen zu suchen sei. Über den Rahmen dieser erst etwa 10 Jahre zurückliegenden Beobachtungen hinaus wird darzulegen sein, daß es noch weit höhere und gefährlichere Druckstoßwirkungen mit Spontantod gibt, die zu extrem starken Lungenläsionen und multiplen Schädelknochenfrakturen wiederum bei praktisch äußerer Unversehrtheit und ohne daß bedeutsame Luftembolien entstehen, führen. Da sich mit zunehmender Druckhöhe annähernd kontinuierlich eine Verstärkung der Lungenschädigung ergibt, hingegen jedoch mehr sprunghaft erst bei hohen Druckwirkungen Frakturen im Bereich des Gesichtsschädels und der Schädelbasis auftreten, erscheint es gerechtfertigt, die zuletzt genannten Befunde mehr in den Vordergrund zu rücken. Vorstadien hierzu sind Blutungen im Nasen- und Rachenraum und in den Nebenhöhlen, welche bereits von RÖSSLER bekanntgegeben wurden; massive derartige Blutungen haben zur Voraussetzung, daß die Knochenwandungen der lufthaltigen Räume erhalten bleiben. Selbst

am toten Organismus konnte von uns in kaum abgeschwächter Weise der gleiche Befund erhoben werden, was darauf hinweist, daß bereits die von außen einwirkenden Druckkräfte allein beachtliche Blutverschiebungen bewirken. Beziehungen zum Knochensystem und zu hohen Druckstoßwirkungen, bei denen auch Schleuderungen nicht ausgeschlossen sind, ergaben sich aus einer der wenigen derartigen Mitteilungen aus dem I. Weltkriege von HANSEMANN (zit. nach RÖSSLER), der bei mehreren Matrosen nach Schiffsexplosionen Siebbeinfakturen beobachtete. In der Durchsicht des neueren Schrifttums über experimentelle Untersuchungen naher Detonationen deutscher und englischer Forscher sind mir Befunde mit stärkeren Schäden am Gesichtsschädel und Hirnbasis nicht begegnet.

Die Versuchsanordnung war praktisch die gleiche, wie sie schon früher von uns beschrieben wurde. Der konzentrische Druckstoß im geschlossenen Raum läßt Rückschlüsse auf physikalische Gesetzmäßigkeiten eher als der Luftstoß im Freien zu. Da wir es darauf anlegten, höhere Druckwirkungen zu erzeugen, mußte ein sehr stabiler, gasdicht verschließbarer Stahlkessel Verwendung finden, für den entgegenkommenderweise die Universität Rostock die Mittel zur Verfügung stellte und ich den zuständigen Dienststellen meinen Dank aussprechen möchte. Eine Abbildung dieses Gerätes mit näheren technischen Angaben stelle ich Interessenten nach Anforderung gern zu Verfügung. In 4 Untersuchungen ließen sich an Hunden recht eindeutige Befunde erheben, so daß wir auf weitere experimentelle Überprüfungen bei ohnehin klar zutage liegendem Mechanismus verzichteten. Stets sind in besonderem Maße lufthaltige und damit komprimierbare Räume und deren Umgebung gefährdet, ganz gleich, ob es sich dabei um die Lunge oder bei stärkeren Druckstoßwirkungen um pneumatisierte Räume des Knochensystems handelt. Unter Verwendung englischer Messungen treten tödliche Druckwirkungen im allgemeinen erst bei 5 Atmosphären Überdruck und im darüberliegenden Druckbereich auf.

Druckstoß I. Versuchstier ein 6 kg schwerer Dackelbastard. Nach starkem Druckstoß die Körperdecke kaum verletzt, mit Ausnahme von Ohrmuscheleinrisse, keine Fraktur der Extremitäten. Aus dem linken nach oben liegenden Ohr quillt immer wieder flüssiges Blut. Der Rachen und die Nasenlöcher sind blutfrei im Gegensatz zu früheren Untersuchungen mit geringeren Druckwirkungen. Die Nasenbeine sind eingedrückt, Crepitation wird hörbar. Die Augen mit verringertem Turgor liegen tief in den Höhlen, Hornhäute getrübt, nach Abzug des schlaffen Kopffells werden Orbitarandfrakturen festgestellt. Die Abstastung der Extremitäten gibt keinen Anhalt für Frakturen, Rippenfrakturen sind dagegen vorhanden. Die Schläfenmuskulatur ist blaß und ihre Konsistenz eher weich als normal. Die Gelenkverbindung im Atlanto-Occipitalgelenk ist locker, ohne daß eine Zerreißung oder Fraktur festgestellt werden könnte. Die aufgesägte und abgenommene Schädelkalotte ist unauffällig bis auf die blasse Diploe, nirgends eine Fraktur zu erkennen. Blutungen im Subduralspalt des cervicalen Markes

und weiter basale, meningeale Blutungen, feine Rindenprellherde in unteren Stirnhirnwindungen. Die Hirnwindungen der Konvexität nicht auffällig, die Piagefäße sind knapp mittelstark gefüllt. Nach schonender Herausnahme des Gehirns von der Medulla her, wobei auch die Hypophyse aus der Sella ohne weiteres folgt, und sich bereits Schäden im Bereich des Felsenbeins kundtun, fanden sich die in der Abb. 1 dargestellten multiplen Siebbein-Stirnbeinfrakturen, als ob die Siebplatte herausgestanzt worden wäre. Der vordere und an die rechte Stirnhöhle angrenzende Teil des Stirnbeins war gleichfalls in einem Segment von 15 mm Länge und 6 mm Breite größtenteils in die pneumatisierte Höhle hineinverlagert, Blutungen in den Frakturlinien. Von der lateralen Seite der vorderen Stirnbeinfraktur verlängerte sich die Frakturlinie oberhalb des Siebbeins gegen den Canalis

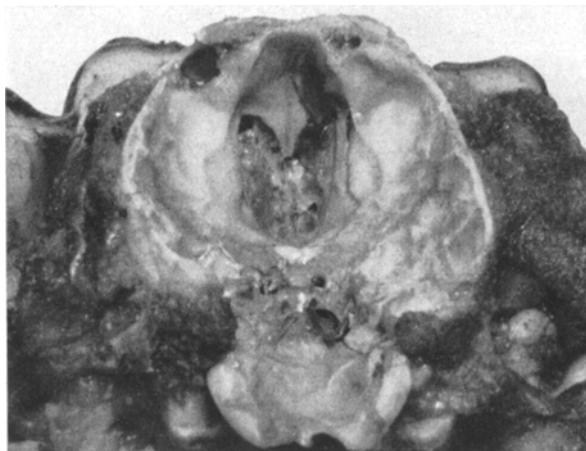


Abb. 1. Heraussprengung des Siebbeins gegen den Nasenraum, Stirnbein-Schädelbasisfraktur re. und multiple Felsenbeinfrakturen bds. (Druckstoß I, Schädel eines Dackels).

fasciculi optici, rechts diesen in der Sella turcica erreichend, und verlief um die Felsenbeinpyramide rechts die hintere Felsenbeinkante heraussprengend. Zudem waren die Felsenbeine weiterhin in mehrere größere Fragmente zerlegt, Frakturlinien verliefen einerseits lateral durch die Fossa subarcuata, andere spalteten die Spitze ab. Auch fanden sich Frakturlinien beiderseits längs der vorderen Felsenbeinkante. Blutungen in den Stirnhöhlen, rechts auch einige Hirnpartikel enthaltend. Die sonst vielfach gesehene Hyperämie der Nasenschleimhäute und Blutungen in den Nebenhöhlen erreichten nicht den Grad früherer Untersuchungen. Hyperämie und Blutungen auch im Mittelohrraum bei praktisch völlig herausgeschlagenem Trommelfell. Das feine häutige Labyrinth erschien makroskopisch unversehrt.

Die Muskulatur der Bauchdecke und der Brustwand blutarm, das Peritoneum glatt, im freien Bauchraum vorwiegend rechts eine geringe Blutmenge. Die Milz mit intakter Kapsel, knapp mittelgroß. Das Netz, Mesenterium und die verschiedenen Darmabschnitte ohne Zusammenhangstrennungen, ein größereres subseröses Hämatom über dem Corpuseteil des Magens an der großen Kurvatur. Fleckförmige Schleimhautblutungen des Magens und der übrigen Darmabschnitte, insbesondere des Dickdarms offenbar an Stellen des ursprünglichen Sitzes von Gasblasen. Pankreas unauffällig. Multiple größere Kapsel-Lebergewebeinrisse im Bereich der Pars affixa, während die caudalen Lappenteile weitgehend unversehrt waren.

Es bestand Spannungspneumothorax mit Vorwölbung des Zwerchfells gegen den Bauchraum, die Brustwand entsprechend gewölbt. Eine Reihenfraktur in der Knorpelgrenze der Rippen rechts 4—6, Blutungen wohl mit feineren Muskelrissen in der Intercostalmuskulatur und unter der Pleura parietalis. Weitere Rippensfrakturen paravertebral rechts 3.—6. Rippe, links 3.—7. Rippe. Die Lungen waren stark kollabiert, wiesen starke, multiple pleurale Zerreißungen auf, besonders auch an der medialen Fläche, das Mittelschoß in noch stärkerem Maße zertrümmert als die Spitze und Basis, die festeren Gewebszüge, Gefäße- und Bronchialreste freilegend. Paravertebral noch weiterhin freies Blut in der Gesamtmenge von etwa 30 cm³, in diesem auch Gewebssetzen der Lunge (Abb. 2). Das Herz mit seinen Gefäßen in Verbindung, am rechten Ort, beiderseits kontrahiert (keine Dilatation des rechten Herzens); der Herzbeutel nicht verletzt, wies jedoch wie auch das Epikard besonders über dem linken Vorhof mehrere Blutungen auf. Hämatome der Herzohren. Nahe dem Septum verlief zentral in der linken Herzmuskelatur unter Durchtrennung des Epikards ein 3 cm langer oberflächlicher Riß, wohl einer Rippendruckwirkung entsprechend. Die linke Herzhöhle praktisch leer, rechts nur wenig Cruor. Klappen mit Sehnenfäden zart, das Endokard unauffällig. Im Bereich des Foramen ovale im Vorhofseptum fand sich eine größere Perforation von 1 cm Durchmesser. Der Oesophagus mit blasser Muskulatur, Schleimhaut gut erhalten. Caudal der Schilddrüse im paratrachealen Bindegewebe ein größeres Hämatom. Die Ringknorpel der Trachea unterhalb des Kehlkopfes an mehreren Stellen auch unter Zerreißung der Schleimhaut, gebrochen. Weitere entsprechende Schleimhautläsionen im Bereich des Kehlkopfes und größere Gewebsdurchtrennungen zwischen Ary- und Ringknorpel beiderseits.

Druckstoß II. Eröffnung der Stirnhöhlen durch zwei parallel geführte Sägeschnitte senkrecht zur Längsachse des Schädels. Zu $\frac{3}{4}$ die Stirnhöhle rechts mit Blut und Hirnpartikeln ausgefüllt. Weiterhin darin ein 12 mm langer und 5 mm breiter Knochensplitter, der sich als Aussprengung des vorderen benachbarten Stirnbeines erwies, so daß die Sonde ohne weiteres in den rechten Stirnhirnpol eindrang. Nun erst wurde die Schädelkalotte nach vorsichtigem Sägeschnitt entfernt; sie wies keine Frakturlinien auf, die Diploe blaß. Die Dura locker, ohne Verletzung dem Gehirn aufliegend. Die Hirnwunden der Konvexität mit Ausnahme einer umschriebenen meningealen Blutung über dem Parietalhirn rechts



Abb. 2. Brust- und oberer Bauchraum nach Druckstoß I. Schwere diffuse Lungengewebszerreißungen, Hämotothorax. Leber-Kapselriss im Bereich der Parsaffixa durch das Zwerchfell verdeckt.

unauffällig. Das rechte Frontalhirn ein wenig zusammengesunken. Bei vorsichtiger Lösung des Gehirns von dorsal her wurden sehr ausgedehnte bereits geronnene Blutungen freigelegt, die teils auf der Dura hafteten, andererseits in den Meningen verblieben. Die Basis der Stirnhirne wies multiple feine Rindenprellherde auf. Frakturlinien in der Schädelbasis ließen sich nach Abzug der Dura nicht erkennen, die Felsenbeine intakt. Starke Hyperämie der Schleimhaut bzw. Blutungen im Mittelohrraum, weiterhin Blutungen in den Nasenmuscheln. Der Kehlkopf wies in geringerem Ausmaß als bei Druckstoß I Zerreißungen im Bereich der Bandverbindungen des Cricoid- und Aryknorpels auf. Von den übrigen Befunden wäre noch eine Ruptur im absteigenden Teil der Brustaorta mit beachtlichem Hämorthax zu vermerken.

Besprechung der Ergebnisse. Auch den äußeren Umständen nach hatte es sich beim Druckstoß I um eine stärkere Druckstoßwirkung als beim Druckstoß II gehandelt. In beiden Fällen konnten Knochenfrakturen des Schädelraumes nahezu an gleicher Stelle festgestellt werden. Beide Knochenaussprengungen fanden sich im vorderen Stirnbein in Angrenzung an die pneumatisierte Stirnhöhle rechts. Hirngewebs- und Blutaustritte waren die Folge, im Fall 2 (geringerer Druckstoß) in stärkerem Maße als im Druckstoß I, der zu multiplen Frakturen im Bereich des Gesichtsschädels und der Schädelbasis geführt hatte, so daß gröbere Blutverschiebungen oder auch die Einpressung von Hirnsubstanz weitgehend entfielen. Die Schädelkalotte mit ihrer großen Angriffsfläche war auffälligerweise intakt, die Gehirne nur in verhältnismäßig geringem Maße durch Rindenprellherde bevorzugt der Hirnbasis geschädigt. Weitere nicht zu unterschätzende Läsionen hatten sich bei Druckstoß I wohl infolge Masseverschiebungen mit Nervenwurzelzerreißen ergeben. Auch im geringeren Druckstoß II wird noch die mechanische Beanspruchung der Schädelbasis deutlich in sehr massiven und ausgedehnten Blutungen, ohne daß es hier aber zu Felsenbein- und Schädelbasisfrakturen gekommen war. Die Rippenfrakturen, bisher noch kaum als Vorkommnis bei Explosions- und Detonationswirkung herausgestellt, sind nahezu in sämtlichen Untersuchungen höherer Druckstoßwirkung gefunden worden und nehmen nicht wunder bei der starken Verformung, die der Thorax im Moment des Druckstoßes erleidet. Die starken Lungenläsionen bzw. Zertrümmerungen insbesondere des Mittelgeschosses und im Bereich des Hilus dürften im Moment des Druckstoßes selbst zustande gekommen sein. Die Vielzahl der Gewebszerreißen der Lunge wird praktisch den Blutumlauf spontan unterbrechen. Aussagen über die Herzaktion, die gegebenenfalls noch zur Luftaspiration aus der Lunge führen kann, können nicht gemacht werden. Von den Organen im Bauchraum war am stärksten die Leber mit Zerreißungen im Bereich der Pars affixa betroffen mit der Folge eines geringen Hämatoperitoneums. Auch Kehlkopfblutungen und Gewebszerreißen daselbst, wie auch Schleimhautblutungen im Magen-Darmtrakt lassen weiterhin den Verletzungs-

mechanismus deutlich werden, der ganz allgemein in einer Kompression lufthaltiger Räume besteht. Auf Grund der Beobachtungen bei der Explosion selbst und unter Heranziehung von Berechnungen möchten wir für Druckstoß I mindestens eine Druckhöhe von 30 atü angeben. Noch höhere Druckwirkungen wären technisch möglich und durchführbar. In der Form eines Diagramms (Abb. 3) lassen sich unsere heutigen Kenntnisse der Beziehungen von Druckstoßwirkung zur Druckhöhe wohl am besten allgemeinverständlich vermitteln, ohne daß eine solche Darstellung Anspruch auf Vollständigkeit haben könnte. Bei

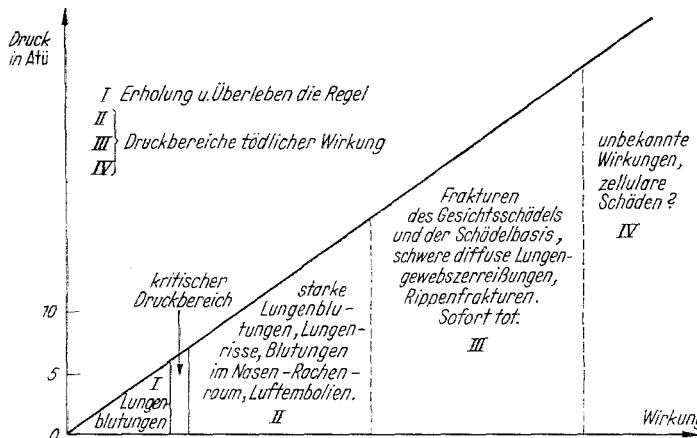


Abb. 3. Druckstoßwirkungen mit anatomischem Befund in Abhängigkeit zur Druckhöhe (in Mitverwertung englischer Druckmessungen).

Drucken, die unterhalb von 5 atü liegen, resultieren mehr oder weniger starke Lungenblutungen, die das Leben im allgemeinen noch nicht gefährden. In einem Druckbereich von 6—7 atü darf dann auf Grund von Erfahrungen englischer Forscher die sog. kritische Zone mit dem Ableben von etwa 50% der Versuchstiere angenommen werden, die dann bereits in den von uns sog. stets den Tod herbeiführenden Druckbereich II mit massiven Lungenblutungen, Blutungen im Nasen-Rachenraum, mehr oder weniger vereinzelten Lungenrissen und damit auch Luftembolien aus der Lunge überführt. Das Ergebnis unserer neueren Untersuchungen besteht nur darin, zu diesen bereits bekannten Befunden eine Ergänzung für noch höhere Druckstöße zu geben, wobei wir eine scharfe Grenze in der Druckhöhe nicht angeben können. In Abschätzung treten wohl ab 15—20 atü, je nach Eigenschaft des Skeletsystems, Größe der pneumatisierten Höhlen usw., nun zu den graduell noch verstärkten Lungengewebsschäden Frakturen im Gesichtsschädel und der Schädelbasis, vor allem in ersterem gegebenenfalls multipel auf. Ein bisher für Explosionsvorgänge nicht bekannter Frakturmechanismus läßt sich hieraus für den konzentrisch wirkenden Druckstoß ableiten.

Der Druckstoß pflanzt sich im praktisch inkompressiblen Gehirn fort und zerstört von innen heraus dünne, an den Nasenraum bzw. die Stirnhöhlen grenzende Knochenlamellen. Diese Frakturen an der Grenze von Gehirn-Gesichtsschädel verdienen eine besondere Herausstellung, weil sie im allgemeinen immer erst bei *hohen* Druckwirkungen in Erscheinung treten, ohne daß umschriebene Gewalteinwirkungen eine Rolle spielen. Wir halten uns somit für berechtigt, den bisher bekannten und in Abb. 3 wiedergegebenen ersten beiden Druckbereichen nun noch einen dritten hinzuzufügen, der durch die Entstehung der genannten Frakturen im Gesichtsschädel und der Schädelbasis gekennzeichnet ist. Auch diese Art der Verletzung wird sich bei noch höheren Druckwirkungen mit der Kompression sämtlicher pneumatisierter Räume des Knochensystems erschöpfen müssen. Es verbliebe dann physikalisch praktisch keine weitere Möglichkeit der Volumenverminderung des Organismus im Druckstoß. Welche weiteren Schäden bei diesen noch höheren Drucken eintreten, entzieht sich zur Zeit noch unserer Kenntnis. Wahrscheinlich dürften ~~... und~~ Fellschädigungen in Erscheinung treten.

Zusammenfassung.

Den bisherigen Kenntnissen der Druckwirkung von Explosionen wird ein weiterer Bereich höherer Drucke mit der Entstehung von Frakturen des Gesichtsschädels und der Schädelbasis hinzugefügt. Der Mechanismus derartiger Frakturen — dem der Lungenschädigung analog — wird dargelegt.

Literatur.

DESAGA, H.: Klin. Wschr. 1944, 297, dort auch Auszüge englischer Arbeiten. — RÖSSLER, R.: Virchows Arch. 314, 511 (1947) und Detonationstod (pathol.-anat. Untersuchungen) als Manuskript vorgelegen. — SCHUBERT, W.: Virchows Arch. 321, 495 (1952); 325, 57 (1954).

Dr. W. SCHUBERT, Rostock, Hermannstr. 17.
