

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

**Organschäden und KörpERVERLETZUNGEN
durch Druckstoßwirkung von Explosionen *.**

Von

W. SCHUBERT.

Mit 16 Textabbildungen.

(Eingegangen am 6. März 1951.)

Die Druckstoßwirkung von Explosionen ist schon verschiedentlich von deutschen und ausländischen Forschern untersucht worden. Dennoch ist dieses Forschungsgebiet als jung anzusprechen; die ersten experimentellen Untersuchungen reichen kaum länger als 40 Jahre zurück. Noch älteren Beobachtungen fällt heute keine praktische Bedeutung zu. Der erste Weltkrieg hat nur wenig zu unserer derzeitigen Kenntnis über die Druckstoßwirkung von Explosionen beigetragen. Noch 1924 bemühten sich erste Wissenschaftler Frankreichs, den Detonationstod unter Beweis zu stellen. Nach dem Bürgerkrieg in Spanien kamen größer angelegte Untersuchungen in England zur Durchführung, die sich bis in den zweiten Weltkrieg hineinzogen und schon von praktischer Bedeutung waren. 1943 wurden in Deutschland entsprechende und großangelegte Untersuchungen durchgeführt, deren hauptsächliches Ergebnis in der Auffindung der arteriellen *Luftembolie* nach Einwirkung naher Detonationen bestand. Im gleichen Jahr wurde von mir eine bis dahin den Medizinern noch nicht bekannte (bei Fliegerbombeneinschlag mögliche) Druckstoßkomponente, die der *Erdstoßwirkung* aufgefunden und zu KörpERVERLETZUNGEN in Beziehung gesetzt. 1944 wurden die ersten eigenen experimentellen Untersuchungen mit explosiven Gasgemischen im geschlossenen Explosionsraum durchgeführt, wobei Tiere der an der gesamten Körperperipherie angreifenden Druckwirkung ausgesetzt wurden.

Explosionsvorgänge haben während der letzten Jahrzehnte allgemein zunehmend an praktischer Bedeutung gewonnen. Das trifft auch für die Friedenszeit zu. In einigen bedeutsamen Herstellungsverfahren der Industrie können explosive Stoffe, ganz gleich ob es sich hierbei um feste Körper, Flüssigkeiten oder Gase handelt, zur Gefahr werden. Die moderne Technik bedient sich vielfach der Sprengung,

* Herrn Professor Dr. H. LOESCHKE zum 70. Geburtstage in Dankbarkeit zu-
geeignet.

doch sind hierbei Schadensfälle selten. Ganz anders liegen die Verhältnisse in Kriegszeit mit der Verwendung von Sprengkörpern als Verichtungsmittel. Sprenggranaten wirken vor allem durch Splitterwirkung. Fliegerbomben wie allen größeren Sprengkörpern anderer Art kommt durch „Luftstoß“ eine Raumwirkung zu. Die Existenz der Luftstoßverletzung ist heutzutage experimentell gesichert. Inzwischen sind neuartige Sprengkörper auf ganz anderer Energiegrundlage entwickelt und in der Atombombe zusammengefaßt worden. Berichte aus verschiedenen Quellen stimmen darin überein, daß sich vom Zerfallszentrum weg außerordentlich starke Druckwellen ablösen; die Druckstoßwirkung soll räumlich noch die Zone der schädigenden Strahlung übertreffen.

In der Durchführung vorliegender Arbeit bin ich großzügig unterstützt worden. Die Initiative gab der Chirurg Prof. v. SEEMEN mit dem Hinweis, die Ursachen aufzusuchen, die zur Entstehung von Stauchungsfrakturen, insbesondere Fersenbeinbrüchen in unmittelbarer Nähe der Einschlagstelle von Fliegerbomben führen können. Daraus sollte sich meine Dissertation ergeben, die vor allem die sog. Erdstoßwirkung behandelte. Weiterhin schien es erstrebenswert, die Luftstoßwirkung zu untersuchen, die gleichfalls bei Fliegerbombeneinschlägen des öfteren gesehen sein sollte. Diese Untersuchungen sind dann später besonders von Prof. LOESCHKE unterstützt worden, ihm sei wie auch Prof. RÖSSLER für die Überlassung seiner bisher unveröffentlichten Arbeit über „Detonationstod“ gedankt. Weiterhin habe ich dem Chemiker Prof. JANDER und meinen Mitarbeitern Dr. KARWASZ und Fr. Dr. SCHEFFSKY für ihre Beteiligung an den Tierversuchen zu danken.

Das Schrifttum.

Im deutschen Schrifttum liegt bisher noch kein umfassender Bericht über die Druckstoßwirkung von Explosionen vor. Wohl sind Teilvorgänge, wie Luftstoß-, Wasserstoßwirkung beschrieben worden, auch ist man auf Schleuderungen bei Explosionen aufmerksam geworden.

Zu den ältesten Berichten gehören die sog. Lungenstreifschüsse, die schon im vorigen Jahrhundert durch streifende und vorbeifliegende Geschosse hervorgerufen sein sollen. Durch sie entstanden ohne bedeutende äußere Verletzungen Thoraxkontusionen mit inneren Organenschäden, wobei schon von älteren Untersuchern der Streit ging, ob es sich hierbei um direkte Berührung oder um „Luftstoß“ durch Luftverdichtung um das fliegende Geschoß handelte. MACH sollte Ausgang des 19. Jahrhunderts diese letztere Auffassung durch physikalische Untersuchungen stützen. Die einfachen Grundregeln der Ballistik stehen aber durchaus einer solchen Auffassung entgegen. Die Ausbildung von Flugwellen um fliegende Geschosse und deren Energiegehalt ist im

wesentlichen von der Fluggeschwindigkeit abhängig, wie auch schon in der einfachen Formel für kinetische Energie $\frac{1}{2} m v^2$ zu ersehen ist. Schon daraus geht die überragende Bedeutung der Geschwindigkeit hervor. Die Endfluggeschwindigkeit der alten Rundgeschosse kann nur gering gewesen sein und demnach darf mit einer praktisch bedeutsamen Ausbildung von Flugwellen, die sogar zu Organschäden führten, kaum gerechnet werden. Ich halte die ursprüngliche Auffassung der eigentlichen Streifung für gegeben. Auch in neuerer Zeit sind kaum jemals wieder derartige Beobachtungen durch Luftstoß fliegender Geschosse gemacht worden.

In den ersten Jahren unseres Jahrhunderts sind dann die Gaskontusionen bei Einschlag und Detonation von Sprenggranaten beobachtet worden. Auch hierbei waren ohne äußere Körperverletzung durch Thoraxkontusionen Organschäden entstanden.

RUSCA hat als erster die ursächlichen Vorgänge überprüft und glaubte, daß die momentane Expansion der Sprenggase zu diesen Erscheinungen führen könnte. Er beschreibt einige derartige Fälle, doch muß auch hier bei näherer Nachprüfung zweifelhaft erscheinen, ob schon damals diese eigentliche Raumwirkung durch Expansion von Gasen oder Luftstoß vorgelegen habe. Die Geschosse (Balkanfeldzüge) entsprachen kaum denen unserer heutigen mittleren Artillerie, deren Sprengladung kaum mehr als 15 kg Sprengstoff beträgt. Der Großteil der Explosionskraft ging noch für die Zerlegung des schweren Geschossmantels verloren. Hingegen ist die Wucht durch Aufschlag nicht gering einzuschätzen und bei geeigneten Bodenverhältnissen ist eine „Fernwirkung über den Erdboden“ durchaus möglich und den Wehrtechnikern schon längere Zeit bekannt. Für zwei Fälle vermerkt RUSCA, daß die Soldaten am Boden eines Schützengrabens gelegen hätten, als in der Nähe die Sprenggranaten einschlugen und detonierten. Beide hätten sich Thoraxprellungen zugezogen, die eine 6wöchentliche Lazarettbehandlung erforderlich machten; ein dritter wurde durch die Detonation einer Sprenggranate in stehender Körperstellung überrascht, zog sich gleichfalls keine Verletzung zu, war kurze Zeit bewußtlos, konnte aber allein den Verbandplatz erreichen. Dieser Soldat konnte schon nach 2 Wochen entlassen werden.

Diese Beobachtungen RUSCAS gaben den Anlaß, die „traumatische Wirkung der Explosionen“ tierexperimentell zu untersuchen. Seine Veröffentlichung (1914) verdient auch heute noch Interesse, da er die ersten grundlegenden Erkenntnisse mit recht einfachen Verfahren ermittelte. Er setzte Kaninchen in Gruben der Druckstoßwirkung von Dynamitpatronen aus und erhob den anatomischen und histologischen Befund. Er erkennt, daß die Druckwelle nicht über die oberen Luftwege, sondern in direktem Angriff auf den Thorax von außen wirkt. Die Organe werden hierbei überschnell komprimiert und gegeneinander verschoben, was zu Parenchymenschäden, Lungenblutungen u. a. führt. Eine bedeutsame Schädigung des Gehirns wurde für eine größere Zahl von Untersuchungen ausgeschlossen. In der Erklärung der Todesursache spricht RUSCA von einem Schocktod, da bei einem Teil der Tiere selbst die Gesamtheit der Organschäden (Lungeneinrisse,

Lungenblutungen, Darmeinrisse) nicht ausreichte, um den Tod oder den sofortigen Eintritt des Todes zu erklären.

Weiterhin wurden auch Sprengungen unter Wasser durchgeführt, wobei Kaninchen und Fische in einem Netz auf den Grund eines Teiches der Druckwirkung ausgesetzt wurden. Die Verletzungen entsprachen weitgehend denen im halbgeschlossenen Raum (Grube mit einer schweren Steinplatte abgedeckt). Bei den Fischen fanden sich in allen Fällen diffuse und recht stark ausgeprägte Blutungen in der Schwimmblase und hier bevorzugt in der Gefäßhaut. Diese Beobachtung sollte noch später für eigene Untersuchungen über Blutverschiebungen im Moment des Druckstoßes bedeutsam werden.

Der erste Weltkrieg hat nur wenig zu unserer derzeitigen Kenntnis über die Detonationswirkung beigetragen. Auf eine Seitenlinie der Druckstoßwirkung, die mehr ins chirurgische Gebiet fällt, wird noch zum Schluß der Besprechung des Schrifttums zu berichten sein. Sieb- beinfrakturen sind bei Einschlag und Detonation von Sprenggranaten gesehen worden. Später wurden diese lokalen Schädelverletzungen auf Luftstoß bezogen. Es erscheint fraglich, ob diese Deutung richtig ist. Wahrscheinlicher ist, daß es sich hierbei um Schädel-Gesichtsprellungen bei liegender Körperstellung infolge des Hochschlagens des Erdbodens bzw. durch stärkste Erschütterung handelt. In damaliger Zeit galt nicht weniger als auch im letzten Kriege die Soldatenregel, sich beim Nahen eines Geschoßes hinzulegen, um der Splitterwirkung zu entgehen.

1923 kamen bei dem *Oppauer Explosionsunglück „Kontusionspneumonien“* durch HANSER zur Beobachtung. Etwa 8 Tage nach der Explosion traten gehäuft Pneumonien auf.

Die 1924 durchgeführten französischen Untersuchungen stellten die Existenz des Detonationstodes erneut unter Beweis, ergaben sonst aber nichts wesentlich Neues.

Die zu Beginn des ersten Weltkrieges durchgeführten englischen Untersuchungen sollten auch zu praktisch bedeutsamen Ergebnissen führen. Es wurden zum Teil sehr große Sprengladungen im Freien zur Detonation gebracht und hierbei beobachtet, daß Tiere z. B. bei einer Ladung von 4000 kg bis zu 28 m Entfernung vom Explosionsherd getötet wurden. Diese Zone wurde als die sog. Todeszone angesprochen. Nach außen folgte dann eine Zone mit schwerverletzten Tieren, die sehr bald starben; wurden in noch weiterer Entfernung vom Explosionsherd Tiere dem Luftstoß ausgesetzt, so zogen sich diese nur leichte Verletzungen innerer Organe zu, vor allem in Lungenblutungen kenntlich, und erholten sich rasch.

Diese Feststellungen wurden bei großen wie auch kleineren Sprengladungen und bei verschiedenen Tierarten, Ratten, Kaninchen, Tauben, Affen u. a. gemacht. Die Physik des Luftstoßes wurde eingehend untersucht. Die jeweils auftretenden

Drucke und Druckschwankungen wurden mittels Pieco-Effekt elektrisch gemessen. Die Drucke in unmittelbarer Nähe einer Explosion können bis zu 200 Atmosphären betragen. Mit der Entfernung vom Sprengherd nahmen die Drucke sehr schnell ab. Wichtig war bei diesen Druckmessungen die Unterscheidung in „statischen“ Druck und „reflektierten“ Druck. Der erste bedeutet eine Kompression in sich, wobei ein von ihm eingehüllter Körper von allen Seiten gleichzeitig komprimiert wird; der reflektierte Druck stellt dagegen eine gerichtete Größe dar und greift vor allem an senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung der Druckwelle stehenden Flächen an. Der statische Druck reicht weiter als der reflektierte Druck, so daß in größerer Entfernung vom Sprengherd hauptsächlich der statische Druck zur Einwirkung kommt. Wie sich die Drucke, speziell der statische Druck zur Entfernung verhält, sei an einem Beispiel aufgezeigt. Bei einer Ladung von 56,7 kg beträgt der statische Druck in 4,6 m Entfernung 14 atü, in einer Entfernung von rund 15 m aber nur noch 0,7 atü. Die Einwirkungszeit der Druckwelle bei gegebener kleinerer Ladung ist sehr kurz, sie beträgt nur 6/1000/sec. Größere Sprengkörper haben längere Einwirkungszeiten. Die Druckwelle wird von der Sogwelle gefolgt, die über die längere Zeit von etwa 100/1000/sec einwirkt. Sie kann den Wert einer Atmosphäre nicht überschreiten. Der für die Tiere zur Tötung nötige Druck schwankte zwischen 4,4 und 8,9 atü. Für den Menschen gibt BERNAL mindestens einen Druck von 6 Atmosphären an.

Der anatomische Befund: Nach der Luftstoßeinwirkung sollen äußerlich nie Verletzungen oder Frakturen gesehen worden sein. Die schwergeschädigten Tiere zeichneten sich meist dadurch aus, daß sie vor dem Maul blutigen Schaum aufwiesen. Die Sektion ergab auffallend starke Lungenblutungen, die zu einer regelrechten Konsolidierung der Lunge führten. In diesem Zusammenhang wurde von „roter Hepatisation“ gesprochen. Die Lungen wurden fest, sanken nicht mehr zurück. Es bestanden ausgedehnte subpleurale Blutungen, vorwiegend der Pleura visceralis. Unter der parietalen Pleura wurden auch gelegentlich Blutungen in der Nähe der Rippen gesehen. Die Stärke und Ausdehnung der Lungenblutungen richtet sich nach der Stärke des erlittenen Luftstoßes.

Die stärksten Blutungen in der Lunge fanden sich perihilär um die größeren Bronchien und Gefäße. Besonders die Gefäße sind oft von „zylindermantelförmigen“ Blutungen umgeben. Die caudalen und mittleren Lungenabschnitte wiesen immer stärkere Blutungen auf als die Spitzenpartien. Die Alveolen fanden sich wie ein Schwamm mit Blut vollgesogen. Die Trachea und Bronchien waren von blutigem Schaum ausgefüllt. Einrisse der Pleura oder des Lungengewebes können vor allem an den Unterlappen vorhanden sein. Die Risse folgten etwa dem Rippenverlauf. Das Auftreten eines Pneumo-, häufig eines Hämatothorax wird beobachtet. Rippenfrakturen sollen nicht gesehen worden sein. Das Herz wurde, besonders beim sofortigen Tod, dilatiert gefunden. Es fanden sich unter den Häuten wie im Herzmuskel feine Blutungen. In 40% der Fälle wurden Verletzungen der Bauchorgane beobachtet. Die Leber und Milz waren häufig zerrissen, der Magen und Dickdarm waren geplatzt. Es fanden sich ringförmige, subseröse Blutungen in der Wand des Dick- und Dünndarmes. Hohe Drucke hatten auch Einrisse und Zerreißungen des Trommelfells verursacht. Bei Affen und Kaninchen wurden nie Blutungen im Gehirn oder in den Hirnhäuten gesehen. Um die Spinalwurzeln in Thoraxhöhe wurden Blutungen gefunden.

Weniger schwer geschädigte Tiere waren oft kaum geh- oder stehfähig. Die Atmung war keuchend. Auch hier fand sich manchmal blutiger Schaum vor Nase und Maul. Reizerscheinungen von seiten des Großhirns wurden beobachtet, für die die Autopsie seinerzeit keine Ursache ergab.

An pathologisch-physiologischen Beobachtungen wurde mitgeteilt: Unmittelbar nach dem Luftstoß tritt ein sofortiger Abfall des arteriellen Blutdruckes und

ein langsames Absinken des venösen Blutdruckes auf. Diese Druckschwankungen stehen in Beziehung zur Größe des einwirkenden Druckstoßes. Der Druckabfall kann nicht, wie Durchschneidungsversuche beweisen, auf eine Vaguswirkung zurückgeführt werden. Das Absinken des Venendruckes wurde als teilweise Schockwirkung auf Grund des Lungentraumas angesehen. Der Abfall des arteriellen Blutdruckes wurde sekundär auf die Veränderung im Lungenkreislauf bezogen. Der Zustand des Lungenkreislaufes wurde mit dem nach Lungenembolie verglichen. Der Lungencapillarquerschnitt ist verringert. Die Gefahr der Erhöhung des Pulmonalarteriendruckes und damit des Lungenödems sei gegeben. Die elektrokardiographische Untersuchung ergab keinen Mangel an Koordination des Herzschlages. Eine 60—70%ige Verlangsamung der Pulsfrequenz und eine Verkleinerung der Aufzeichnungen wurde gelegentlich gesehen.

Die ohne äußere Verletzungen sofort getöteten Tiere sterben, wie man annnehmen darf, durch ein undefinierbares Etwas, das bekannt ist als primärer Schock. Einige Tiere dürften durch Erstickung infolge der Verlegung der Bronchien und Trachea durch Blutschaum verlorengehen. Für noch längere Zeit überlebende Tiere wird die Ausbildung eines Lungenödems verantwortlich gemacht. Andere Tiere verbluten sich vor allem aus den Bauchorganen. Ein Gehirntod oder ähnliches wird abgelehnt.

Diese englischen Untersuchungen sollten weitere und wichtige Ergänzungen durch gleichfalls großangelegte und im Auftrage der deutschen Wehrmacht 1943 durchgeführte experimentelle Untersuchungen an Hunden mit Sprengungen im Freien und im Wasser erfahren. RÖSSLE gibt 1947 in einer Arbeit, die an sich die arterielle Luftembolie behandelt, die hauptsächlichen Ergebnisse der anatomischen Befunde und der Art der Untersuchung bekannt. Diese Untersuchungen wurden in strenger Geheimhaltung in zwei unabhängigen Unternehmungen durchgeführt und führten praktisch zu den gleichen Resultaten, wie sich auch die Ergebnisse mit den englischen Untersuchungen weitgehend deckten. An wesentlich Neuem wurde von RÖSSLE und BENZINGER die arterielle Luftembolie hierbei entdeckt. Diese war offensichtlich von den älteren Untersuchern übersehen worden, es besteht aber auch die Möglichkeit, daß die Entstehung der arteriellen Luftembolie durch besonders hohe Druckstoßwirkungen begünstigt wurde, wie ich den gemachten Angaben zufolge entnehmen konnte. Setzt man englische Druckmessungen für gleiche Sprengladungen und Entfernung deutscher Untersuchungen ein, so gelangt man allein für den statischen Druck, um mit Sicherheit einen Hund zu töten, zu 15 Atmosphären. Entsprechend liegen auch die Druckstoße unter Wasser hoch: RUSCA verwendete noch 100 g Dynamit in 4—5 m Entfernung, die deutschen Untersucher über 1 kg bei nur einer Entfernung von 2,7 m. Die arterielle Luftembolie war fast ein regelmäßiger Befund und wurde in etwa 80% der Versuchstiere gefunden. Sie fand sich bevorzugt in Fällen, bei denen gleichzeitig Lungenriss bestanden, also die Beanspruchung des Thorax auf Druck besonders stark gewesen war. Deutlich sichtbar wurde die Luftembolie besonders in den Kranzgefäßen des Herzens, hier in manchen Fällen

das ganze Lumen ausfüllend. Luft wurde weiterhin in der A. basalis der Hirnbasis und auch in selteneren Fällen in den Mesenterialgefäßen gefunden. Auch nach Wasserstoß wurden verhältnismäßig häufig arterielle Luftembolien gesehen.

Für den Wasserstoß ergab sich im großen ganzen der gleiche Befund wie nach Luftstoß, die Lungenblutungen waren in vielen Fällen stark ausgeprägt, andererseits traten aber die Verletzungen der Bauchorgane mehr in den Vordergrund. Blutungen am Magengrund, Zertrümmerung der Leberunterfläche mit Rissen im Zwerchfell, Platzwunden im Dünndarm und am Wurmfortsatz sogar Blutungen am Mastdarm wurden gesehen. Die Entstehung dieser Verletzungen wurden auf die plötzliche Ausdehnung der gashaltigen Innenräume des Körpers zurückgeführt. Es wird damit auch schon das wirksame Prinzip aufgezeigt, das an die Gegenwart von Luft bzw. Gas gebunden ist. Es sind aber nicht die Ausdehnungen der Gase, die zu den genannten Verletzungen führen, sondern die Verletzungen sind umgekehrt die Folge des überaus schnellen Kompressionsvorganges, der zu Prellwirkung und Organverschiebungen mit Zerreißung führt.

Weitere physiologische und histologische Beobachtungen RÖSSLÉ sind mir durch seine Arbeit über „Detonationstod“ bekannt geworden. Er beschreibt, daß er auch dann bei Hunden massive Lungenblutungen gesehen hätte, wenn diese vermutlich durch akuten Herzstillstand durch den Druckstoß *sofort* getötet worden wären. Möglicherweise könne hierbei etwas Blut nachsickern, keineswegs wären aber damit die massiven Lungenblutungen erklärt. Die Bindegewebszerreißungen um die größeren Bronchien und Gefäße wurden durch den sog. Abplatzeffekt erklärt, der auf Trägheitskräfte zurückgeht und insbesondere an den Grenzstellen von Körpern verschiedener Dichte (Schwammgewebe der Lunge einerseits, festere Gewebszüge der Bronchien und Gefäße andererseits) im Moment des Druckstoßes zur Ausbildung kommt. Man stellte sich zudem vor, daß durch Eigenschwingungen, die im Innern des Thorax sich ausbilden könnten, die Capillarendothelien um die Blutsäule herum abplatzten. Aber auch diese Vorstellung konnte seinerzeit noch nicht erklären, weshalb bei den sofort getöteten Tieren der Blutgehalt in der Lunge nach Einwirkung des Druckstoßes wesentlich größer war als physiologischerweise zu erwarten stand. Die Capillaren des Lungenparenchyms wurden von RÖSSLÉ im histologischen Schnitt multipel eingerissen und zerrissen gesehen, ohne daß dabei auch andere Zerreißungen der feineren Gewebeelemente der kollagenen und elastischen Fasern zu finden gewesen wären. Die Bronchien wurden zudem in ihrer Lichtung enggestellt „zusammengestaucht“ gefunden.

Sektionsberichte für den Menschen nach Luftstoß sind von englischen Untersuchern, von RÖSSLÉ, KLOOS und GRÄFF gegeben worden. Ausgang des zweiten Weltkrieges waren RÖSSLÉ gegen 30 Luftstoßtodesfälle bekannt geworden. Die Toten wiesen äußerlich kaum Verletzungen auf, zeigten an den Organen Lungengewebs- und Pleuraeinrisse bei mehrweniger stark ausgeprägten Lungenblutungen. Luftembolien sind

vereinzelt nachgewiesen worden. Im Bauchraum konnten oft nur geringfügige Befunde wie Kapselleinrisse der Leber und subseröse Blutungen gefunden werden.

Über das klinische Verletzungsbild nach Luftstoß berichtete DESAGA. Bis 1944 wären in Deutschland 23, in England 43 solcher Fälle beobachtet und behandelt worden. Anamnestisch gaben die Patienten meist an, eine Sensation wie einen Schlag verspürt zu haben und dann bewußtlos geworden zu sein. In den ersten Stunden nach der Verletzung wurde meist blutig roter Schaum aus Mund und Nase entleert. Manchmal wurde auch massiv Blut ausgehustet. Die Patienten fanden sich ausnahmslos in einem schlechten Kreislaufzustand. Über starke Schmerzen beim Atmen im Brustkorb wurde geklagt. Die Atmung war flach und frequent, es bestand vielfach Atemnot. Rippenbrüche wurden nicht beobachtet. Oft bestand Schmerhaftigkeit im Leib und Bauchdeckenspannung. Hierbei durchgeführte Operationen ergaben meist nur subseröse Kapselblutungen. Das Röntgenbild ergab kennzeichnend durch die Blutungen bedingte Verschattungen in Faustgröße bis zur vollständigen Halbseitenverschattung. Die Prognose wäre im allgemeinen gut gewesen, die Mehrzahl der Patienten hätte schon nach 4—6 Wochen Behandlungsdauer entlassen werden können.

In der Lunge komme es durch Capillarerreißungen und Blutungen zu einer akuten Verminderung des gesamten Capillarquerschnittes. Es entwickle sich das Bild, wie es bei der akuten Lungenembolie bekannt ist. Ein entstehendes Lungenödem sei die Folge der Erhöhung des Blutdruckes in der Pulmonalarterie. Für das Herz konnten eindeutig anoxämische Schäden elektrokardiographisch nachgewiesen werden. Letztere führte DESAGA hauptsächlich auf arterielle Lufteinenschwemmung in die Kranzgefäße zurück.

GRÄFF hat dann 1948 in einer Monographie unter anderem Luftstoßtodesfälle und die Verhältnisse an den Schadensorten beschrieben und recht ausführliche anatomische Berichte gegeben. Auch auf die Verhältnisse an den Schadensorten geht er mit Aufzeichnung der Lageskizze und Angaben von Entfernungen ein, so daß es möglich wird, sich etwa ein Bild von den Vorgängen im Gefahrenmoment zu machen. Ich verweise hier insbesondere auf die Gruppenverletzung des Schadens-HOLSTENHOF und Fall 19 des Kapitels über „Die Leiche bei Tod durch Luftstoß.“

Damit sind die Grundzüge des Schrifttums über Luftstoß wiedergegeben. Es bleibt nun noch gleichsam die zweite Linie oder besser Nebenlinie der allgemeinen Druckstoßwirkung von Explosionen, die Erdstoßwirkung aufzuzeigen, die in der Art ihrer Wirkung schon Vorausläufer hat, die bis in den ersten Weltkrieg zurückreichen.

Der Chirurg MAGNUS hatte 1915 nach einem Seegefecht auf einem kleinen Kreuzer 9 Stauchungsfrakturen des Fersenbeins, zum Teil auch doppelseitige Frakturen, beobachtet. Er ging den Ursachen nach und stellte fest, daß Sprenggranaten die Bordwand durchschlagen und im Inneren des Schiffskörpers zur Detonation gekommen waren. Die Deckplatten waren über den Detonationsstellen aufgebogen worden. Er legte den Mechanismus der Entstehung der Fersenbeinbrüche in folgenden Worten fest: „Die über der Explosionsstelle gelegenen Bodenplatten waren blitzschnell gehoben worden und hatten, ehe die Masse des menschlichen Körpers der Trägheit gehorchend folgen konnte, in typischer Weise Calcaneusfrakturen gesetzt.“

Eine Bestätigung dieses Vorganges wurde einige Jahre später durch ZUR VERTH gegeben. Er vergleicht das Hochschlagen der Deckplatten mit einem starken Schlag

von unten gegen die Füße und stellte Beziehungen her zum Fall aus großer Höhe, wie z. B. nach Seilrissen von Förderkörben in Bergwerken. Nicht nur Fersenbeinbrüche, auch Tibiakopffrakturen und sogar Schädelbasisfrakturen wurden gesehen.

Während der Friedenszeit bis zum zweiten Weltkrieg hören wir dann nichts mehr von derartigen Verletzungen. 1941 berichtet HEIDSIECK über „Fersenbeinbrüche als Explosionsverletzung im Landkrieg“. Vier derartige Frakturen wurden nach dem Einschlag einer Fliegerbombe in unmittelbarer Nähe eines Güterwagens gesehen, in dem dicht gedrängt zwangsevakuerte Personen gestanden hatten. Auf den Mechanismus geht er nicht näher ein.

Um die gleiche Zeit ist man auch in England bei Einschlag und Detonation von Fliegerbomben auf die Entstehung von „Stauchungsfrakturen“ allgemein aufmerksam geworden, wie mir erst kürzlich in einem Referat des Zentralblattes für Chirurgie zugänglich wurde. Der Amerikaner P. D. WILSON beschrieb 50 derartige Fälle, die in die Londoner Lazarette nach deutschen Fliegerangriffen aufgenommen und dort behandelt wurden.

Die Wehrtechnik kennt den Vorgang des Erdstoßes unter der Bezeichnung der „Fernwirkung“, wie ich aus einem wehrtechnischen Monatsheft 1936 entnehmen konnte. Sie wurde im Zusammenhang mit der Gefährdung des Luftschutzraumes durch Dr. Ing. SEPP HEIDINGER, Graz, beschrieben. In unmittelbarer Nähe der Einschlags- und Detonationsstelle von Fliegerbomben kann der Erdboden derart stark erschüttert und herausgehoben werden, daß selbst starke Gemäuer einstürzen und beschädigt werden.

Erdstoßwirkung bei Einschlag und Detonation schwerer Sprengkörper.

1943 hatte Prof. v. SEEMEN anlässlich der Übernahme der Chirurgischen Klinik in Greifswald mehrere Fersenbeinbrüche nach Einschlag und Detonation von Fliegerbomben beobachtet. Er forderte mich auf, den Ursachen nachzugehen. Zunächst seien die eindeutigsten klinischen Fälle aufgezeigt.

Fall 1. E. K., 32 Jahre. Es bestand eine *doppelseitige Stauchungsfraktur* des Calcaneus, die sich K. im Freien stehend bei einem Bombenangriff auf Peenemünde am 18. 8. 43 zugezogen hatte. Äußerlich keine Verletzungen, er war sofort bewußtlos. Es bestanden weder am Tage der Explosion noch in den darauffolgenden Tagen *Lungenblutungen*. Die Röntgenbilder zeigten eine Abflachung des Längsgewölbes beider Fersenbeine, Frakturlinien vor allem im Korpus und im unteren Anteil des Tuber calcanei. Für Stauchungsfraktur typische Dislokation (Abb. 1 und 2).

Fall 2. S., 34 Jahre. *Calcaneusfraktur* rechts, am gleichen Tage wie Fall 1 beim Luftangriff auf Peenemünde zugezogen. Keine Lungenblutungen. Über Vorgänge am Schadensort war nichts zu erfahren. Die Röntgenaufnahme zeigte bei bestehender Abflachung des Längsgewölbes eine Frakturlinie, die vom hinteren Umfang des Tuber calcanei gegen das Korpus verlief und vermutlich das untere Sprunggelenk erreichte.

Fall 3. R., 29 Jahre. *Beidseitige Kompressionsfraktur des Calcaneus.* Doppelseitige Unterschenkelfrakturen. Starke Abflachung des Fußgewölbes, Tiefertreten der Knöchel. Diese Verletzungen waren auf massivem aber hart gefrorenem Erdboden durch den Einschlag einer Sprenggranate in Nordrussland im Winter zustande gekommen. R. wies sonst keine äußeren Verletzungen auf. Er hatte im Moment der Explosion in einem Pferdebunker gestanden, etwa 1 m von einer aus



Abb. 1.

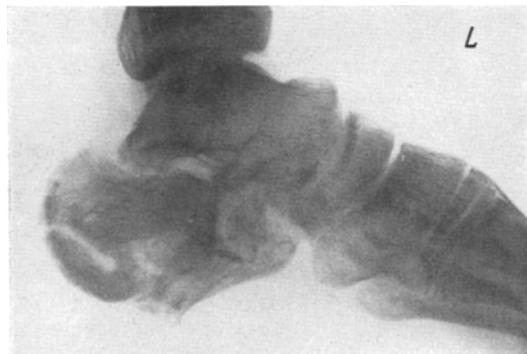


Abb. 2.

Abb. 1 u. 2. Kompressionsfrakturen des Fersenbeins beiderseits nach Fliegerbombeneinschlag durch „Fernwirkung“ über den Erdboden“ bzw. Erdstoß.

Rasenplatten gebildeten Wand. Die Sprenggranate war außen am Fuße der Wand eingeschlagen und zur Detonation gekommen. R. gab an, sofort bewußtlos geworden zu sein. Über 2 Std hätte die Bewußtlosigkeit gedauert. Die Wundheilung seiner Füße zog sich über Jahre hin. Die Röntgenaufnahmen sind mir Ausgang des Krieges verlorengegangen.

Fall 4. W. W., 28 Jahre. Es handelte sich um einen analogen Fall, wie er schon 1941 von HEIDSIECK beschrieben wurde. Der Patient hatte als Wehrmachtsgefangener bei einer Verladung auf dem Bahnhof in Anklam in einem Güterwagen gestanden, als ein Fliegerangriff erfolgt. Eine Fliegerbombe war in die Nähe des Wagens eingeschlagen; er hatte einen starken Schlag gegen die Füße gespürt, war noch aus dem Wagen gesprungen und bemerkte nun erst, daß er mit einem Fuß nicht auftreten konnte. Es hatte sich um einen einfachen Querbruch des Fersen-

beins links gehandelt. Klinisch bestand eine starke Schwellung der Fußwurzel. Die Genese kann nicht ganz eindeutig übersehen werden. Der Patient hatte nicht auf festem Erdboden gestanden, es besteht sowohl die Möglichkeit der fortgeleiteten Erdstoßwirkung als die des Ankippens des Wagens durch Luftstoß. Möglicherweise kann aber auch, wie beim Fall HEIDSIECK, beides eine Rolle gespielt haben.

Auf dem obengenannten Bahnhof in Anklam hatte sich noch ein weiterer Patient eine schwere stumpftraumatische Verletzung eines Fußes zugezogen. Dieser Fall gab zusammen mit Fall 4 den Anlaß, das Bahnhofsgelände auf etwa stattgehabte Erdverschiebungen zu überprüfen. Am Bahnsteig, der mit kleinem Kopf-pflaster ausgelegt war, wurden an verschiedenen Stellen über das ursprüngliche Niveau herausgehobene Flächen beobachtet, die in der Nähe von Fliegerbomben-trichtern lagen und in diese übergingen. Die Hubhöhe betrug etwa 10—15 cm.

Der Schadensfall Wieck-Eldena. Im Frühjahr 1944 ging in der obengenannten Ortschaft, die unmittelbar am Greifswalder Bodden in feuchtem Gelände gelegen ist, vermutlich aus großer Höhe beim Einzelwurf abgeworfen, eine schwere Flieger-bombe unmittelbar vor einem in der bekannten Zickzackform angelegten Splitter-graben nieder, in dem 28 Personen Schutz gesucht hatten.

Der Schadensort wurde wenige Stunden nach der Explosion von mir besichtigt. Es bot sich ein eindrucksvolles Bild, in welcher Weise aus großer Höhe ein-schlagende und zur Detonation kommende Sprengkörper bei relativ feuchtem Untergrund totes wie lebendes Material aus der nächsten Umgebung hoch- und herausschleudern können. Zentnerschwere aus Zement bestehende Seiten- und Deckplatten wie auch hier stehende Personen waren aus der Tiefe zur Peripherie hin herausgeschleudert worden. Der gleichfalls aus Zement bestehende Boden-belag war vielfach eingerissen und offensichtlich gehoben worden. 20 Todesfälle hatten sich ergeben. Die Besichtigung der noch bekleideten Toten ergab vielfach Fuß- und Beinzertrümmerungen aber auch sonstige Prellungen des Kopfes, Arm-frakturen, Lungenblutungen konnten nicht sicher beurteilt werden, da Nasen-blutungen u. a. bestanden. In größerer Entfernung von der Explosionsstelle, schon mehr am Eingange des Splittergrabens, hatten 6 Frauen gestanden. Sie trugen sämtlich schwere Frakturen der unteren Extremität, insbesondere Tibia-kopffrakturen davon. Nachfolgend sei eine Aufstellung von den Einzelfrakturen gegeben. Es bestanden:

Beidseitige Tibiakopffraktur	1
Einseitige Tibiakopffraktur	2
Calcaneusfraktur	1
Taluskopffraktur	1
Unterschenkelfrakturen im unteren Drittel mit groß- teils longitudinal gestellten Fragmenten	4
Unterschenkelfrakturen im oberen Drittel	2

Das dazugehörige Bildmaterial kann in der eigenen Dissertation, Rostock 1949, eingesehen werden. Der größte Teil dieser Frakturen muß als Stauchungsfrakturen angesehen werden, wenn auch für die zuletzt aufgezeigten Unterschenkelfrakturen im oberen Drittel Biegung als Ursache angenommen wird. Es muß offenbleiben, inwieweit diese Frakturen durch tangentiale Schubwirkung über den Erdboden begünstigt werden. Gleichfalls am Eingang des Splittergrabens hatten sich zwei Männer aufgehalten, die sich kennzeichnenderweise keine Frakturen der unteren Extremität, dagegen aber Gesichts- und Stirnprellungen zuzogen. Es ist damals von mir unterlassen worden, diese Personen zu fragen, ob sie sich hingelegt hatten.

Um eine Vorstellung von der Gewalt zu geben, mit der solche Druck-stöße von unten gegen die Schwerkraft des Körpers zur Einwirkung kommen, kann ich über einige experimentelle Untersuchungen berichten,

die schon bevor die Erdstoßwirkung völlig klargestellt worden war, durchgeführt wurden. Das erste Experiment ging dahin, durch einen Schlag mit einem 5 kg schweren Hammer gegen die Ferse eines Leichenbeines eine Fraktur zu setzen. Solange die Ferse durch einen Schuh oder ein dünnes Brett geschützt wurde, war dies keineswegs möglich. Selbst beim Schlag gegen die blanke Ferse war nur das Heraussprengen

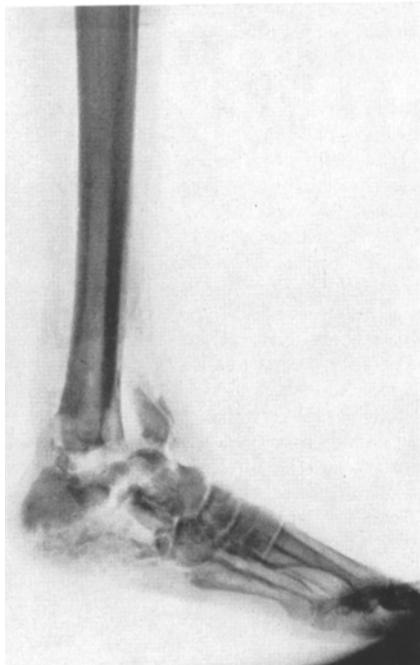


Abb. 3.



Abb. 4.

Abb. 3 u. 4. Zertrümmerung des Calcaneus, der Trochlea tali und Zersprengung der Mal-leolengabel wie auch typische Kompressionsfraktur des Tibiakopfes (Abb. 4) nach starkem Druckstoß von unten gegen die Füße vermittels einer Platte auf die die Beine unter Belastung auf Körpergewicht senkrecht gestellt waren.

eines kleinen Fragmentes mitsamt Weichteilen möglich. Es war erstaunlich, in welcher Weise die in sich federnden Sprunggelenke die Schläge auffingen.

Es ist mir dann später unter Zuhilfenahme von Explosionsgewalt ohne weiteres möglich geworden, künstlich Fersenbeinbrüche als typische Stauchungsfrakturen, schwere wie leichte, zu erzeugen. Der direkte Angriff der Explosionsgase am Fuß selbst ermöglichte solche aber nie. Erst bei indirekter Energieübertragung und Verstärkung durch eine Platte wurde die Erzeugung solcher Frakturen in allen Fällen möglich.

Bei stärksten Druckstoßwirkungen ergaben sich am Leichenmaterial die im Röntgenbilde festgehaltenen Frakturen (Abb. 3 und 4). Einzel-

heiten der Versuchsanordnung können in meiner Dissertation eingesehen werden. Man erkennt, wie insbesondere das Corpus calcanei, zum Teil auch der Talus zerquetscht und die Malleolengabel gesprengt ist. Auf dem anderen Bild erkennt man, wie bei einem anderen in gleicher Weise beanspruchten Bein der Tibiakopf in typischer Weise geborsten ist.

Bei weiter verringertem Druckstoß von unten gegen den auf Körpergewicht belasteten Fuß (das Leichenbein war einer 5 cm starken Holzplatte senkrecht aufgesetzt worden in einer Höhe von 20 cm über dem Erdboden; auf dem Erdboden war ein kleiner Sprengkörper zur Entzündung gebracht worden) ergab sich eine Fraktur der Fußwurzel, wie sie kaum anders auch von MAGNUS nach Schiffsexplosionen gesehen wurde (Abb. 5).

Bei noch weiterer Verringerung der Druckwirkung gegen die Fußsohle ergab sich lediglich ein Querbruch des Fersenbeins, wie er wohl auch noch heutzutage als Rißfraktur angesprochen werden könnte. Letztere Bezeichnung ist aber irreführend; eine solche Fraktur hat mit einem Muskelzug des Triceps surae nichts zu tun (sie kann höchstens einmal Hilfsursache sein). Der Befund soll hier in einem Sägeschnitt wiedergegeben werden (Abb. 6).

Es kam mir bisher darauf an, die Existenz der Erdstoßwirkung und die ihr zugrunde liegende Gewalt aufzuzeigen. Man kann sich nun etwa vorstellen, welch starke Erschütterung und Stoßwirkung von unten gegen die Schwerkraft sich z. B. im klinischen Fall 1 (Kun.) mit beidseitiger und schwerer Stauchungsfraktur des Fersenbeins ergeben haben mag (es bestanden durch Luftstoß keine Lungenblutungen). Es kommt mir nunmehr auch darauf an, eine Vorstellung davon zu geben, was geschehen wäre, wenn dieser Mann nicht auf dem Erdboden gestanden, sondern *gelegen* hätte. Es wird verständlich, daß sich längst nicht in allen Fällen äußere Verletzungen oder Frakturen zu ergeben brauchen,

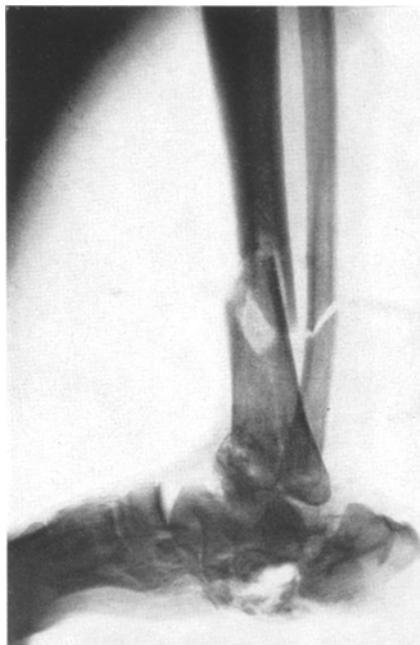


Abb. 5. Kompressionsfrakturen nach Explosionsdruckstoß von unten gegen den Fuß über eine massive Holzplatte (geringerer Druckstoß als bei Abb. 3 und 4).

am ehesten werden sich noch solche des Gesichtes und der Stirn ergeben. Die Fläche, auf die der Druck übertragen wird, ist größer, damit ist die Gefährdung als solche geringer, aber auch die liegende Körperstellung wird zu einer Gefahr, wenn die betroffene Person dicht an den Sprengherd in das Zentrum der Fernwirkung hineinrückt. Noch weiter am Rande des Sprengtrichters wird die Druckwirkung in Schleuderung übergehen.

Prellwirkungen gegen den Thorax sind mir aus eigenen experimentellen Untersuchungen gut bekannt. Ein hervorstechendes Merkmal sind auch hier neben Organ-

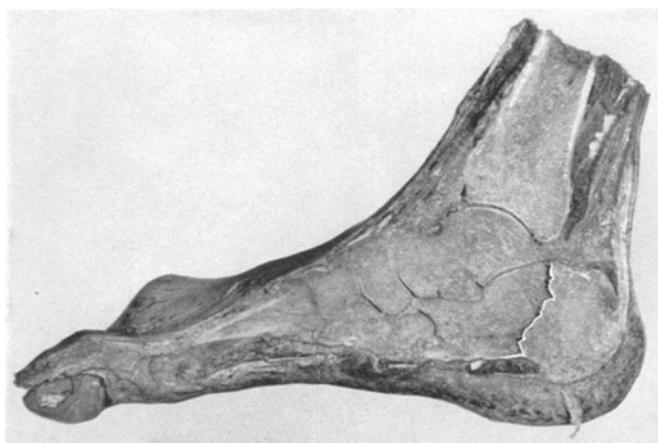


Abb. 6. Ein Querbruch des Fersenbeins entstanden durch Hochschlagen einer Holzplatte durch geringen Explosionsdruckstoß.

zerreibungen Lungenblutungen. Sie sind aber keineswegs so massiv wie nach Luftstoß oder Druckstoß gespannter Gase, auch fehlen hier meist kennzeichnende und noch aufzuzeigende Blutgefäßveränderungen der Lunge.

Zum erstenmal ist mir der anatomische Befund nach starker Prellwirkung gegen Brust und Bauch bei indirekter Einwirkung von Explosionsgewalt in einem Tierversuch an einer ausgewachsenen Katze begegnet. Dieser Versuch wurde 1944 an sich zum Zwecke der Klärung vermeintlicher Luftstoßwirkung durchgeführt, ich weiß aber heute, daß hierbei ausschließlich die Prellwirkung von unten für die Entstehung der aufzuzeigenden Organschäden die Rolle spielte; in diesem Sinne sei auch die Versuchsanordnung unter vereinfachten Verhältnissen wiedergegeben.

Versuchsanordnung. Auf eine Eichenholzplatte wurde nach Betäubung mit einem Schlafmittel eine Katze mit Brust und Bauch nach unten in waagerechte Stellung gelegt. Unter der Holzplatte kam in etwa 15 cm Abstand ein kleiner Sprengkörper zur Entzündung.

Versuchsergebnis. Die Katze wurde schon 3—4 sec nach der Explosion angesessen, es war eine mäßige Schleuderung erfolgt. Stamm und Kopf wiesen keine

äußerlichen Verletzungen auf. Vor den Nasenlöchern fand sich etwas blutiges Sekret. Das Tier war sofort tot. Es zeigte sich auffallende Blässe der Mundschleimhäute. Ein Röntgenbild sei wiedergegeben (Abb. 7). Die Sektion ergab folgendes: Keine Rippenfraktur, aber weitgehende Zerreißungen innerer Organe. Pneumothorax, Lungen kollabiert, in den Unterlappen besonders links starke Gewebszerreißungen, Hämatothorax, zum Teil mit Lungengewebsfetzen durchmischt. Die Pleura hämorrhagisch. Das

Herz klein, fest. Auf Schnitt entleert sich *kein Blut*, die Wirbelsäule scheint in Herzhöhe leicht beschädigt. Im Abdomen freies Blut, von EinrisSEN der Leber und Milz herrührend. Der über dem (starkwandigen) Magen der Katze liegende linke Leberlappen zerquetscht, die Milz weist gleichfalls kleine Einrisse auf. Magen und Darm o. B., die Harn- und Gallenblase noch gefüllt.

Histologisch ergaben sich Blutausritte in die Alveolen, meist derart, daß die Erythrocyten am Rande der Alveolen lagen, dazu fanden sich Bindegewebszerreißungen um die größeren Bronchien und Gefäße, auch hier wieder Blutungen.

Gibt es entsprechende Beobachtungen für den Menschen? Ich selbst habe keine derartigen Fälle beobachtet, glaube aber, daß Verletzungen dieser Art gar nicht so selten vorgekommen sind und möchte in der Besprechung dieser Vorgänge auf einige Fälle und Beobachtungen GRÄFFS in Zusammenfassung eingehen.

Es wurden von mir die hier interessierenden Merkmale der Sektionsbefunde von GRÄFF an 20 seiner Ansicht nach durch Luftstoß getöteten Personen herausgezogen. Diese seien nachfolgend aufgezeigt:

Für 12 Fälle wurde Blutleere des Herzens oder geringe Blutfüllung des Herzens angegeben (ohne Berücksichtigung der Trümmerleichen).

Die Vena cava caudalis zeigte 5mal geringe Blutfüllung oder war fast leer.

Für die Gefäßstämme der A. pulmonalis und Aorta ascendens wird 2mal Blutleere angegeben.

Lungenblutungen bestanden in 14 Fällen.

Der Blutgehalt der Leber war in 8 Fällen gering.

Fälle, bei denen ausdrücklich Blutleere des Herzens, der großen Gefäßstämme und der Pfortader angegeben werden, scheinen mir auch den anderen äußeren Umständen zufolge auf Einwirkung von Erdstoß verdächtig. Man muß berücksichtigen, daß sämtliche Personen im Freien aufgefunden wurden und daß man das Fallen einer Fliegerbombe sehr eindringlich hört. Jedermann wird also in

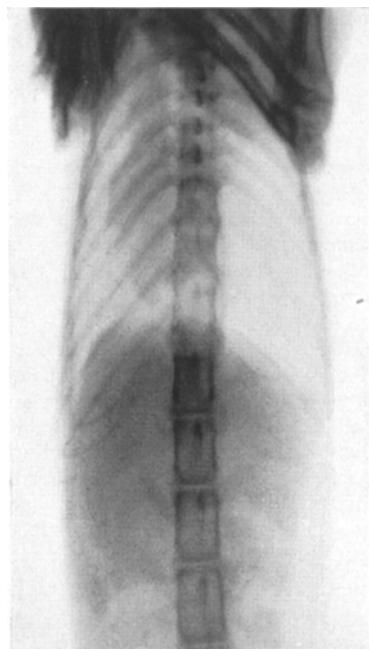


Abb. 7. Röntgenaufnahme vom Rumpf einer Katze, die einer starken Prellwirkung von unten gegen Brust und Bauch bei Bauchlage auf einer Platte durch Explosionsdruckstoß ausgesetzt war.

einem solchen Gefahrenmoment Schutzstellung einnehmen und sich hinlegen. Die Entfernung von der Einschlagstelle war jeweils verschieden und wird für den Schadensfall HOLSTENHOF, bei dem allein 13 Personen getötet wurden, mit mindestens 17 m Entfernung angegeben. Dazu befanden sich die Personen in einem gut 2 m tiefen Graben, der, wie ich einer persönlichen Mitteilung GRÄFFS entnehmen konnte, noch dazu auszementiert war. Letzteres und auch der Umstand der tief gelegenen Grabensohle scheint mir die Möglichkeit einer Fernwirkung über den Erdboden begünstigen zu können, während andererseits ein Grabensystem eher noch gegen einwirkende Luftdruckwellen schützt. Auch der Fall 19 scheint mir in dieser Weise für Erdstoß zu sprechen; ein Soldat wurde tot in einem Geschützgang aufgefunden, 7 m von der Einschlagstelle einer Fliegerbombe entfernt. Hier wird sogar angegeben, daß die 1,3 m hohen Erdwälle beiderseits nach innen zusammengefallen waren trotz einer bestehenden Abstützung durch Pfähle. Das Herz war von normaler Form und beiderseits kräftig zusammengezogen. Im rechten Herzen kein Blut, die linke Kammer leer. Fäulnis als Ursache der Blutleere des Herzens läßt sich für diesen Fall weniger als für die Fälle des oben genannten Schadensfalles HOLSTENHOF ausschließen. Hier fielen Luftembolieproben des Herzens negativ aus. Größere Gasmengen wären hier sicherlich vermerkt worden.

Drei Fälle nach beobachteter Schleuderung werden weiterhin beschrieben, die um so mehr von Interesse sind als auch bei ihnen sehr geringe Blutfüllung des Herzens und die anderen typischen Befunde mit Lungengewebsanrisse und Blutungen angegeben werden. Hier war aber auch ausgeprägter Hämorthorax, in einem Fall Hämatoperitoneum entstanden. Diese Personen waren aus einem alten Bombentrichter, in dem sie Schutz gesucht hatten, durch eine auf den Rand des Trichters einschlagende Fliegerbombe über 30—50 m herausgeschleudert worden. Eine vierte Person, die gleichfalls aber an der entgegengesetzten Seite des Trichters gelegen hatte, wurde nur verschüttet, konnte sich selbst befreien und blutete aus der Nase, außerdem war ein Trommelfell zerrissen.

Es ergeben sich somit verschiedentlich Hinweise dafür, daß während des zweiten Weltkrieges nicht sämtliche derartige und durch Fliegerbombeneinwirkung hervorgerufenen Organschäden auf Luftstoß zu beziehen sind. Es beginnt sich für Schleuderung bei derartigen Anlässen und in geringerem Maße auch für Erdstoßwirkung bei liegender Körperstellung das Merkmal der weitgehenden Blutleere der zentral gelegenen Gefäßabschnitte einschließlich des Herzens abzuzeichnen, während umgekehrt, wie noch aufzuzeigen sein wird, bei Verhältnissen, die weitgehend dem reinen Luftstoß entsprechen, die zentralen Gefäßabschnitte und das Herz bei gleichzeitiger Dilatation besonders rechts gut mit Blut gefüllt sind.

*Die reine Druckstoßwirkung explosibler Gasgemische
im geschlossenen Raum.*

Die Erdstoßwirkung war im wesentlichen im Frühjahr 1944 klar gestellt. Es interessierte weiterhin die Frage der Entstehung von Organschäden durch Luftstoß. Seinerzeit wurde auch in dieser Hinsicht noch vielfach von „Lungenzerreißen“ gesprochen. Die erste entsprechende deutsche Veröffentlichung durch DESAGA ist im Herbst 1944 erfolgt; bis

dahin herrschte in Deutschland auf vorliegendem Gebiet strengste Geheimhaltung, so daß mir jedes pathologisch-anatomische Substrat fehlte. Ich ging daher dazu über, diese Fragen experimentell zu untersuchen.

Untersuchungen, die den natürlichen Verhältnissen entsprachen unter Aufwendung großer Sprengkörper waren nicht möglich. Es erschien daher zweckmäßig mehr weniger statische Druckschwankungen im Sinne hoher Überdrucke zu erzeugen. Solche momentan ausgelöste Überdrucke mußten weitgehend den statischen Drucken bei Fliegerbombeneinwirkungen entsprechen.

Bis dieses Ziel erreicht und eine geeignete Versuchsanordnung gefunden war, mußte eine nicht geringe Vorarbeit geleistet werden. Mit einer in meiner Dissertation beschriebenen Versuchsanordnung glaubte ich mich schon am Ziel, stellte aber späterhin fest, daß hier praktisch nur stärkste Schleuderung und Prellung von unten gegen die Schwerkraft des Tieres eingewirkt hatte. Bei einer weiteren Versuchsreihe wurden Meerschweinchen den hohen Mündungsdrucken vor Gewehrläufen mit Platzpatronen, deren Holzpfropf entfernt war, ausgesetzt. Hier zeigte sich auch, inwieweit stärkste Überdrucke (vor der Gewehrlaufmündung sollen bis zu 80 atü gemessen worden sein) zu lokalen und oberflächlich gelegenen Körperverletzungen führen können. Die beabsichtigte Lungenzerreißung oder Blutung wurde kaum erreicht, wenn die Mündung vor den Unterkiefer gehalten wurde. Auch bei in der Trachea eingebundener Kanüle ergab sich das gleiche Resultat und so schloß ich in ähnlicher Weise, wie es schon früher RUSCA und die Engländer getan hatten, die Möglichkeit aus, daß die Lungenschädigung über die oberen Luftwege zustande kommen könnte.

Schließlich entschloß ich mich nach dem Prinzip des Böllerschusses vorzugehen mit einfachem Acetylen-Luftgemisch, das in einer Gummihülle entwickelt wurde. Aber hier waren die Explosionsdrucke noch recht niedrig und reichten kaum aus, um die Tiere durch Druckstoß zu töten. Eine Verstärkung der Druckwirkung wurde durch den Hinweis des Chemikers Prof. JANDER möglich, den Sauerstoffgehalt im geschlossenen Raum auf das Fünffache zu erhöhen. Die Versuchsanordnung sei in folgender Abb. 8 wiedergegeben und kurz beschrieben.

Zur Herstellung des geschlossenen Raumes fand eine elastische Gummihülle Verwendung, für die sich ein größeres Stück eines alten Autoschlauches (vom Lastwagen) als geeignet erwies. Die eine Seite wurde zunächst luftdicht abgebunden, feinere Undichtigkeiten lassen sich gegebenenfalls mit Paraffin ausgießen. In den so gebildeten Raum werden die Versuchstiere und eine Büchse mit Calcium-Carbid hineingegeben. In die noch offen verbliebene Seite erfolgt dann Einbindung eines Gummischlauches und, parallel dazu geführt, eine doppelte Drahtleitung als Zuleitung für eine elektrische Zündung, die in der Form eines Widerstandsdrähtes, mäßig isoliert, eingebaut wird. Der Gummischlauch hat im Inneren der Hülle in die Büchse mit Calcium-Carbid zu münden, so daß später von außen durch den

Schlauch erstens Wasser zur Entwicklung von Acetylen, zweitens aber auch, einer Sauerstoffbombe entnommen, Sauerstoff in den abgeschlossenen Raum gefüllt werden kann. Die letzten Handhabungen haben schnell zu geschehen, eine genügende Gasfüllung erkennt man an dem Prallwerden der Hülle, nunmehr kann die elektrische Zündung erfolgen.

Dieses Verfahren bringt keine bedeutsame Gefahr, da mit Absprengung fester Körper kaum zu rechnen ist. Die Durchführung hat im Freien zu erfolgen. Es wurde hierbei möglich, die Tiere schon unmittelbar nach dem Druckstoß zu beobachten und in einigen Fällen sehr rasch Sektionen durchzuführen. Nebenverletzungen durch Schleuderung, Fesselung und anderes können nicht zustande kommen. Man hat es mit einem die Körperoberfläche von allen Seiten gleichzeitig treffenden Druckstoß zu tun. Einen Nachteil hat aber auch diese Versuchsanordnung, wenn er auch praktisch nicht ins Gewicht fällt. Die Tiere können kurze Zeit vor dem Druckstoß explosive Gase einatmen und wir kennen nicht die

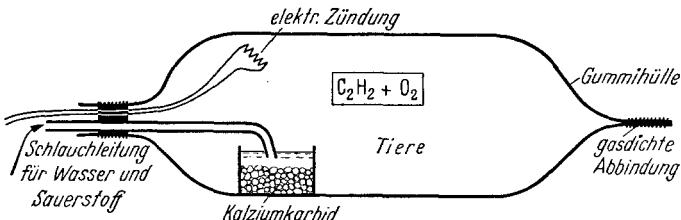


Abb. 8. Geschlossener Explosionsraum zur Erzeugung eines hohen „statischen“ Druckstoßes.

weiteren Auswirkungen in der Explosion. Es hat aber durchaus den Anschein, daß, so wenig die Luftwelle in die oberen Luftwege einzudringen vermag, auch die Entzündung von explosiven Gasen hierselbst kaum zustande kommt. Alle praktischen Befunde sprechen jedenfalls für diese Auffassung. Die Bronchien werden auch nach einem Explosionsdruckstoß im geschlossenen Explosionsraum eng gestellt gesehen, ja selbst beim toten Tier mit abgebundener Trachea und künstlich erhöhtem Alveolardruck können Lungenblutungen mit typischen Gefäßveränderungen entstehen.

Es ist zunächst noch über einige ältere Untersuchungen zu berichten, die schon im Jahre 1944 durchgeführt wurden, und vor allem den Zweck hatten, die Vorgänge im Brustraum im Moment des Druckstoßes zu überprüfen. Auch war seinerzeit noch nicht sicher, daß der Kompression allein größte und nahezu ausschließliche Bedeutung für die Entstehung der Organschäden zukommt. Wesentlich war es, die Art der Thoraxverformung festzustellen. An die Stelle der lufthaltigen Lunge wurde ein massiver und an sich inkompressibler Wachsausguß nach Tötung des Tieres gesetzt. Von der kranialen Appertur her wurden dann die beiden Lungen am Hilus durchschnitten und entfernt. Die so frei werdenden Pleurahöhlen wurden in einem Fall mit flüssigem Wachs, in einem anderen Fall mit Paraffin ausgegossen. Die in dieser Weise veränderten Tiere wurden einem Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum ausgesetzt. Die Art der Veränderung des Wachsausgusses durch den Druckstoß kann aus einem Bilde ersehen werden (Abb. 9). Im Gegensatz zu

einem Kontrolltier, das sich gleichfalls im Explosionsraum befunden hatte, wurden hier keine größeren Verletzungen der Leber gefunden. Der Wachsausguß zeigte den Rippenverläufen entsprechend Impressionen, die im Bereich des Rippenbogens besonders stark ausgebildet waren. Auch abscherende Kräfte durch Zug in caudaler Richtung waren in den unteren Abschnitten im Bereich des Rippenbogens zur Einwirkung



Abb. 9. Junge Katze mit Wachsausguß des Lungenraumes nach Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum.

gekommen, wie deutlich an Abschilferungen und andersartigen Verfärbungen des Wachses zu erkennen war. Beim Paraffinausguß wurde die Umbiegung nach dorsal, der ventralen und in der Mittellinie gelegenen Kanten der Ausgüsse besonders deutlich. Es zeichnete sich mit diesen Veränderungen sowohl eine Abflachung des Thorax in sagittaler Richtung als auch eine Flankenkompression und Einengung der gesamten unteren Brustappertur ab. In diesem Fall hat der Wachs- bzw. Paraffinblock die Leber gegen Druckstoß geschützt. Die leicht komprimierbaren gashaltigen Räume des Abdomens (Darmgase) waren überaus schnell zusammengeschlagen worden, wodurch sich auch Zugkräfte bis zur vorderen Brustwand ergaben. Eine weitere Vorstellung

von der Verformung des Thorax im Moment des Druckstoßes bekam ich durch einen anderen Versuch an einer jungen Katze, die sich bekanntlich durch einen weichen leicht verformbaren Brustkorb auszeichnet. Auch dieses Tier wurde einem Druckstoß im Explosionsraum ausgesetzt. Es ergab sich ein in querer Richtung durch beide Lungenunterlappen hindurchlaufender Riß, der vor allem das Parenchym betraf und die mehr zentral gelegenen und festeren Gewebszüge der Bronchien und Gefäße freilegte. Eine derartige Gewebsdurchtrennung läßt sich nur durch außerordentlich starke Quetschung und vermutlich auch durch Zugwirkung nach unten gerichteter Kräfte erklären. Mir scheint, daß in ihren Grundzügen die Thoraxverformung schon durch die normalen Atemexkursionen vorgezeichnet ist und daß, zumal bei schrägem Rippenverlauf, der Thorax extrem im Sinne des Exspiriums beansprucht wird unter gleichzeitiger mehr weniger unphysiologischer Flankenkompression. Aber auch auf einen anderen Vorgang bin ich bei diesem Versuch aufmerksam geworden. Die histologische Untersuchung der Lunge ergab, daß die Lungenblutungen bei dieser Katze mit weichem Thorax nur recht gering ausgebildet waren. Die Alveolen waren im Schnitt kaum flächenhaft von Erythrocyten besetzt und fanden sich meist nur am Rande. Deutlich waren vor allem Zerreißungen des Gewebes um die Bronchien und größeren Gefäße, während sich auch die noch näher zu beschreibenden anderen Gefäßveränderungen mit Weitstellung der Lichtung und anderes nicht fanden. Statt dieser Lungenblutung war aber auch bei diesem Tier Blut aus dem Gefäßsystem diesmal aber in den Bauchraum durch Leberanrisse und Zerreißungen ausgebrochen. Entsprechend wurden im Bauchraum mehrere Kubikzentimeter freien dünnflüssigen Blutes gefunden.

Die Kenntnis von dieser Thoraxverformung und weitere schon oben beschriebene Beobachtungen anderer Untersucher über ausgesprochen starke Lungenblutungen auch beim sofort durch Druckstoß getötetem Tier, dazu die Beobachtung RUSCAS mit stets gesehenen diffusen Blutungen in der Gefäßhaut der Schwimmblase von Fischen machten die Annahme wahrscheinlich, daß der Druckstoß selbst dazu geeignet wäre, durch momentane *Blutverschiebungen* entsprechende Läsionen und Blutaustritte zu erzeugen.

Zur weiteren Prüfung dieses Vorganges habe ich zunächst einfache Versuche durchgeführt, indem lediglich durch Schlagwirkung eine Thoraxkompression in sagittaler Richtung und auch nur begrenzt über wenige Zentimeter bei Meerschweinchen durchgeführt wurde. Die Zügelung des Schläges wurde durch ein zwischen geschaltetes und ausgehöhltes Brett erreicht („gezügelter Hammerschlag“). Es sind an 15 derartige Versuche durchgeführt worden. Sie legten dar, daß derartige Blutverschiebungen in der Tat bestehen. Im Mittelpunkt dieses Vorganges steht das Herz mit seiner exponierten Lage zwischen vorderer Brustwand und Wirbelsäule im Mediastinalraum mehr weniger fixiert. Bei stärkster Schlagwirkung,

etwa den Brustraum in sagittaler Richtung auf die Hälfte einengend, fanden sich die Herzohren geplatzt, einige große Gefäßstämme abgerissen. Es bestand ein Hämatothorax. Die Lungen waren weich aber nicht besonders blutreich, Abplatzeffekte um die größeren Bronchien und Gefäße zeigend. Das Herz war klein, enthielt kein Blut und war kontrahiert. Bei geringerer Schlagwirkung war der anatomische Befund und das Verhalten des Tieres verschieden. Oft riß die V. cava zwischen Herz und Leber ein. Dann entstand ein Hämatothorax und das Tier lebte bald ab. Die Lungenblutungen waren hierbei gering ausgebildet. Blieb die untere Hohlvene intakt, dann waren die Lungenblutungen verstärkt. Späterhin sind dann auch noch Unterbindungen einer Lungenhälfte unter Vermeidung von Blutverlusten durchgeführt worden. Auch hierbei zeigte sich, daß der an das Gefäßsystem frei angeschlossene Lungenteil nach Schlagbeanspruchung stärkere Lungenblutungen aufwies. Nach der Schlagbeanspruchung fand sich Bradykardie mit allmäßlicher Steigerung der Frequenz. Das linke Herz schlug weitgehend leer, während sich infolge der Lungenläsionen das Blut im rechten Herzen staute. Auf Luftembolien wurde geprüft, solche aber nicht gefunden, da vermutlich die Tiere auch nach Einwirkung der Narkose nur wenig „vital“ reagierten.

Weitere Nachprüfungen sind später für umfassende Druckstoßwirkungen im geschlossenen Explosionsraum erfolgt. Es wurden nicht nur die bekannten Lungenblutungen, sondern auch andere eindeutige Veränderungen an den Lungengefäßen gefunden, die uns heute den Vorgang der Blutverschiebung in die Lunge hinein als gesichert gelten lassen können. Nachfolgend sei ein derartiges Experiment aufgezeigt, wie es am hiesigen Institut zur Durchführung kam. Es zeigt im übrigen recht klar die Eigenart der Organschädigung durch reine Druckstoßwirkung auf.

Versuchsanordnung. Oben beschriebener Explosionsraum mit 4 lebenden und 1 toten Meerschweinchen, dessen Intratrachealdruck auf 15 mm Hg unter Abbindung der Trachea und nach vorsichtiger Tötung erhöht worden war.

Versuchsergebnis. Nach Zersprengung der Hülle liegen die Tiere auf dem Rücken und machen überaus schnelle zuckende Bein- und Körperbewegungen. Drei Tiere zeigten sofort frisches Blut vor der Nase. Innerhalb eines Zeitraumes von $1\frac{1}{2}$ bis zu $1\frac{1}{2}$ min lebten sämtliche Tiere ab.

Tier 1. Äußerlich keine Besonderheiten, Fell wenig angesengt. Das Tier zeigt kein Blut vor der Nase. Die Sektion erfolgt unter Wasser, um die Luftembolieprobe durchführen zu können. Beim Anschneiden des Bauchfells entweichen mehrere große Blasen Luft. Die Leber ist wenig angerissen. Stellenweise ringförmige Blutungen in die Darmwand des Coecum und des Dünndarms. Hoch am Magenfundus eine gut abgegrenzte kreisrunde 10pfennigstückgroße Hämorrhagie. Zwerchfell unverletzt. Pneumothorax. Massive Blutcoagula zwischen Zwerchfell und Unterlappen. Beide Unterlappen sind im Bereich des Lig. pulmonale eingerissen. Auch der Mittellappen ist in Hilusnähe rechts eingerissen. Die Eröffnung des rechten Herzens (unter Wasser) ergibt keine Luft, bei der Eröffnung des linken Herzens steigen wenige feine Gasperlen hoch. Die großen Gefäße werden unverletzt gefunden. Der Ausbruch von Blut ist offensichtlich aus hilusnahen Gefäßen erfolgt. Die Lungenblutungen sind nicht ganz so stark ausgeprägt wie bei den anderen lebend in den Explosionsraum hineingegebenen Versuchstieren. Ein eindeutiger Nachweis bestehender Luftembolie des Gehirns kann nicht erbracht werden.

Tier 2. Die Sektion erfolgt gleichfalls unter Wasser. In den Nasenlöchern blutiges Sekret. Pneumoperitoneum. Multiple Leberrupturen, hauptsächlich des linken und Mittellappens. Die rechten Lappenanteile erscheinen unverletzt. Einriß am Fundus des Magens mit Austritt von Ingesta. Blutungen in die Darmwand des Coecum. Zwerchfell unverletzt. Pneumothorax, Emphysem des vorderen Mediastinum. Im rechten Herzen keine Luft, aus dem linken Herzen entweichen eindeutig feinere Luftbläschen. Massive Blutcoagula im dorsalen Mediastinum. Die großen Gefäßstämme sind nicht angerissen. Die Lunge ist voluminös, sieht blaurot aus, fühlt sich derb, fest an (rote Hepatisation). Ein Nachweis von Luft im Gehirn oder in den Hirnhäuten gelingt nicht.

Tier 3. Reichlich Blut um Nase und Maul. Schon etwa $1/2$ min nach der Explosion wurde durch Einschnitt des Thorax das Herz sichtbar gemacht, um das Verhalten des Herzens zu überprüfen. Das Herz war auffallend groß mit besonders deutlich ausgebildeter Dilatation rechts. Die Kontraktionen des Herzens waren zu diesem Zeitpunkt träge und langsam. Größere Blutungen im Pleuraraum waren nicht vorhanden, die Lungen waren ausgesprochen stark blutig infiltriert. Die Herzaktion kam innerhalb $1/2$ min (nach Eröffnung des Thorax) zum Stillstand. Auf mechanischen Reiz des Herzmuskels erneut einige Kontraktionen. Man hatte den Eindruck, daß das rechte Herz vor allem gegen den erhöhten Widerstand im kleinen Kreislauf versagte. Etwa 3 min später konnte aus dem rechten Herzen ein großes Blutoagulum entfernt werden, das sich weit gegen die A. pulmonalis erstreckte. Im Abdomen wurden die gleichen Organschäden und sonstige Veränderungen gesehen, wie sie schon oben beschrieben wurden.

Tier 4. Das Tier war tot in den Explosionsraum mit Erhöhung des Intratrachealdruckes auf 15 mm Hg hineingegeben worden. Die Tötung war unter Vermeidung von Blutungen und ohne auf den Thorax Druck auszuüben durch Einstich einer Kanüle in die Gegend der Medulla oblongata unter Einspritzung eines Betäubungsmittels erfolgt. *Im Herzen kann keine Luft nachgewiesen werden.* Lungenblutungen sind, wenn auch nicht so massiv wie bei den anderen Versuchstieren, doch deutlich vorhanden. Im Bauchraum Darmruptur, Austritt von Ingesta, sonst die üblichen Befunde.

Tier 5. Blut vor Nase und Maul, die gleichen Befunde wie schon oben beschrieben. Es soll die „Undichtigkeit“ der Lunge so rasch wie möglich nach dem Druckstoß geprüft werden. Trotz Erhöhung des Intratrachealdruckes auf 80 mm Hg und mehr tritt keine Luft durch die nunmehr eröffneten Herzkammern aus. Statt dessen perlt schließlich im Hilusnähe, offensichtlich aus einem größeren Bronchus, Luft hoch. Die Trachea und die Bronchien finden sich weitgehend mit Blut und großenteils mit Blutgerinnseln verlegt. Die Lunge ist derb infiltriert, im Zustand der „roten Hepatisation“.

Der histologische Befund von Lunge und Herz. Im Gesamtbild zeigen sich außerordentlich starke Lungenblutungen. In einigen Alveolen findet sich Ödem, einzelne und Gruppen von Alveolen noch lufthaltig. Die Blutungen treten unmittelbar an die Gefäße heran. Diese sind in Ringform von Ödemsubstanz umgeben, welche auch Luftbläschen und einige Erythrocyten führen kann. Das Ödem ist zwischen die Gefäßwandung und der weit abgedrängten Gefäßscheide eingelagert. Die Bronchien treten im Gesamtbilde zurück, sind eng gestellt, zusammengestaucht und haben vielfach keine erkennbare Lichtung. Ganz im Gegensatz dazu finden sich äußerst weitgestellte größere wie kleinere Gefäße, Arterien und Venen mit relativ dünn ausgezogener und vielfach



Abb. 10.

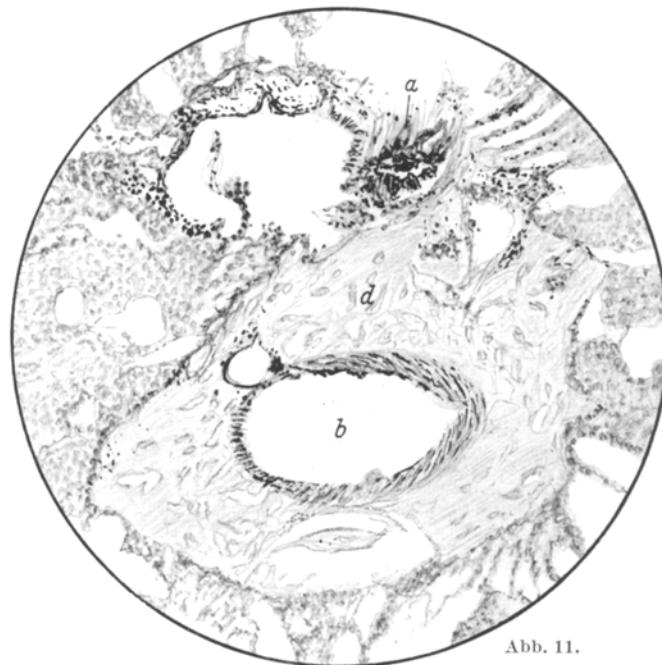


Abb. 11.

Abb. 10 u. 11. Lunge vom Meerschweinchen nach Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum. Ausgedehnte Lungenblutungen neben weitgestellten und zum Teil angerissenen Gefäßen. Bronchien „zusammengestaucht“ (a), Arterien (b), Vene (c). Ödem um die Gefäße (d).

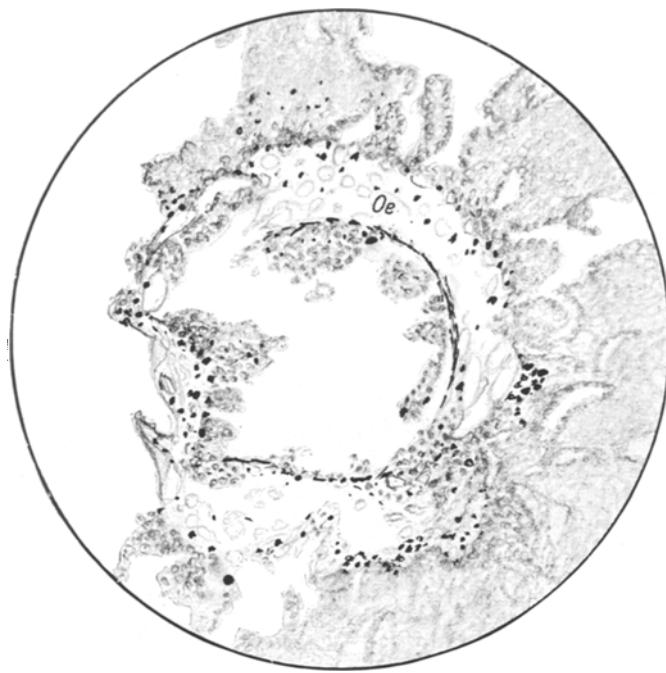


Abb. 12. Lungenvene vom Meerschweinchen nach Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum. Gefäßwand ausgezogen und mehrfach geplatzt. Außen Ödem angelagert. In der Umgebung Gewebszerreibungen und massive Blutungen.

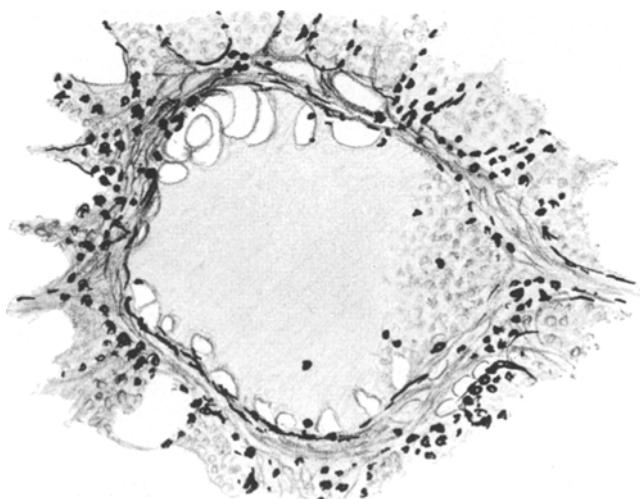


Abb. 13. Kleine Lungenvene nach Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum. Die Lichtung enthält Ödem, Blut und Luftblasen.

geplatzter Wandung. Die Blutfüllung ist häufig unvollständig; in Venen kann man des öfteren Ödem und meist der Wandung angelagert auch Luftbläschen finden. Gleichartige nicht ganz so stark ausgeprägte Veränderungen finden sich auch in den Oberlappen. Um größere Bronchien können sich Zerreißungseffekte finden. Ganz besonders stark sind Gewebszerreißenungen und auch Blutaustritte an größeren Venen zu erkennen, die geradezu inmitten von Gewebslöchern liegen. Auch hier

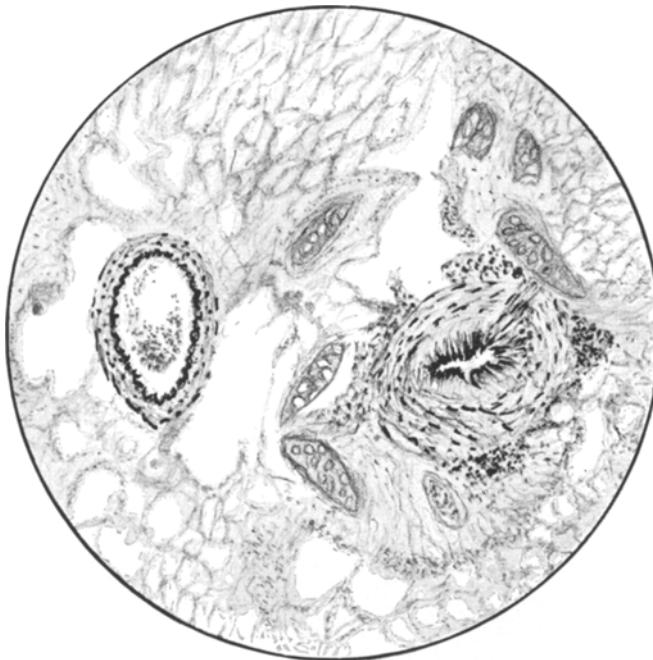


Abb. 14. Lunge vom Meerschweinchen nach „gezügeltem Hammerschlag“. Geringe Blutungen, Zerreißungen zwischen Bronchus und Gefäß.

wieder Ödemsubstanz der mehrfach zerrissenen Venenwand angelagert (Abb. 12).

Um die Eigenart des Explosionsdruckstoßes herauszustellen, werden zwei weitere Zeichnungen der Gewebsverhältnisse von Lunge und Herz vom Meerschweinchen nach „gezügeltem Hammerschlag“ dargetan (Abb. 14 und 16).

Tier 4. Auch bei dem tot in den Explosionsraum hineingegebenen Meerschweinchen fanden sich an umschriebener Stelle (entgegen der Erhöhung des Alveolardruckes) mehr in Pleuranähe als zentral gelegen recht massive Blutungen etwa $\frac{1}{5}$ der gesamten Schnittfläche der Lappen einnehmend. Die Venen vielfach weitgestellt, Blut oder meist Ödem und auch Luftbläschen enthaltend.

Das Herz der Tiere zeigt großteils recht kompakte wenig zerklüftete Muskellagen. Subepikardial gelegene Gefäße treten deutlich hervor

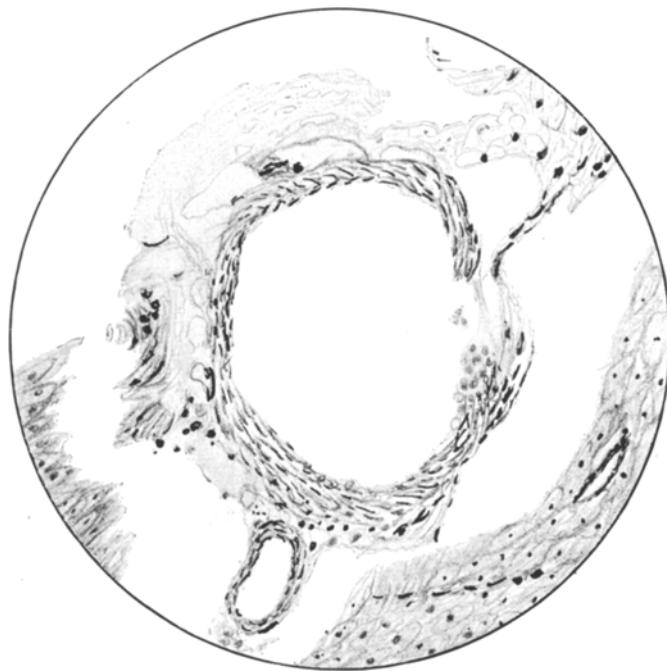


Abb. 15. Subepikardiales Herzgefäß nach Druckstoß im geschlossenen Explosionsraum vom Meerschweinchen.

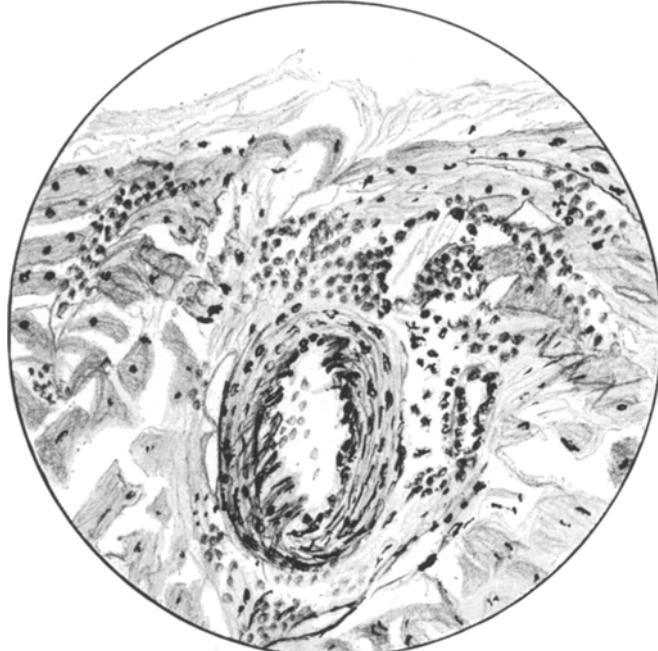


Abb. 16. Subepikardiales Herzgefäß nach „gezügeltem Hammerschlag“ gegen den Thorax eines Meerschweinchens.

mit Weitstellung der Lichtung und Ausziehung der Wandung. Viele der Gefäße sind geplatzt. Meist findet sich keine Blutfüllung. Die unter dem Epikard verlaufenden Gefäße können auch aus der Umgebung unter Abhebung des Epikards und Zerreißung der Bindegewebsscheide und stellenweise der Muskulatur herausgeplatzt sein. Es ergaben sich also auch für die Gefäße des Herzens fast gleichartige Verhältnisse wie bei den Lungengefäßen (Abb. 15).

Bei anderen Tieren nach Einwirkung schwächerer Druckstöße wurden an den Lungen nur lokale Blutungen in dem ventralen Teil der Unterlappen gefunden, die dem Herzen anlagen. Die Tiere überlebten mit teils röchelnder erschwerter Atmung, um sich nach einigen Stunden zu erholen.

In einem Fall hatte der Druckstoß über längere Zeit auf einen Hund und ein Meerschweinchen eingewirkt. Die starkwandige Gummihülle war nicht geplatzt. Hierbei fanden sich ohne wesentliche andere Organschäden nur starke Blut- und Plasmaaustritte in der Lunge. Pneumoperitoneum wurde bei beiden Tieren bei der Sektion unter Wasser gesehen.

Für die Entstehung vorstehender Organschäden haben wir folgende Vorstellung gewonnen. Entscheidend ist der Druckstoß, die Sogkräfte spielen keine bedeutsame Rolle. Bauchraum und Thorax werden gleichzeitig und stark komprimiert; Voraussetzung für diese Kompression ist der Luft- bzw. Gasgehalt der Körperhöhlen. Der Thorax wird im Sinne extrem verstärkten Exspirium unter gleichzeitiger Flankenkompression eingeengt. Er stellt sich bedingt durch seine Elastizitätskräfte gegeng über den anderen Körperpartien als Unterdruckraum dar. Alle Vorgänge spielen sich überaus schnell ab und können damit zur Zerreißung von Organen besonders an Grenzstellen von Körpern verschiedener Dichte führen. Prellwirkungen und Quetschungen treten auf, wie z. B. an ringförmigen Darmblutungen, an Leberverletzungen und Pleuraeintrissen deutlich. Die ausgeprägten Lungenblutungen bei sofort getötetem Tier entstehen durch Blutverschiebungen im Moment des Druckstoßes selbst. Aus dem linken Herzen kann Blut über die klappenlosen Lungenvenen die Lunge erreichen. Auch das Hineinwerfen von Blut über die Pulmonalarterie ist wahrscheinlich. Soweit die Druckstöße nicht außerordentlich kurz sind, kann es auch in der Körperperipherie zu Blutverschiebungen in die mehr geschützt liegenden zentralgelegenen Körperpartien kommen. Das Blutreservoir der Leber begünstigt durch ihre Auspressung unter Beibehaltung der physiologischen Richtung auf das Herz im Moment des Druckstoßes indirekt die Entstehung von Lungenblutungen, indem die Blutfüllung der unteren Hohlvene und des rechten Herzens im Druckstoß verstärkt wird.

*Die Entstehung von arteriellen Luftembolien
nach Druckstoßeinwirkung.*

Es wurde bisher die Auffassung vertreten, daß arterielle Luftembolien nach Einwirkung von Explosionen auf Einpressungsvorgängen beruhen. Durch das plötzliche Heraufschnellen des Alveolardruckes sollte Luft mehr auf dem Wege der Diffusion als über angerissene Gefäße in das Gefäßsystem eingepreßt werden können. Dieser Vorgang müßte sich im Moment der Kompression selbst abspielen. Es ist dargelegt worden, daß ein solcher Vorgang nicht möglich ist, da im gleichen Augenblick stärkste Lungenblutungen unter der Voraussetzung von Blutverschiebungen in Richtung auf den relativen Unterdruckraum der Lunge zu stehen kommen. Es ergibt sich aber umgekehrt aus den eigenen Beobachtungen, daß im Anschluß an den Druckstoß, also in der Dekompression, mehrere Umstände zusammentreffen, die den Einbruch von Alveolarluft ins Gefäßsystem begünstigen. Sie seien der Bedeutung nach aufgezählt:

1. Es besteht nach Auspressung zumindest des linken Vorhofs und der größeren Stämme der Lungengefäßen hier selbst ein Mangel an Blut.
2. Es bestehen multiple und bedeutsame Lungengefäßzerreißenungen insbesondere an den Lungengefäßen.
3. Es treten vermehrt Widerstände im kleinen Kreislauf durch vielfache Capillarzerreißenungen auf, die den Zufluß zum linken Herzen behindern (Blutstauung vor dem rechten Herzen).
4. Der Thorax wird in der Dekompression wieder weitgestellt bei gleichzeitig mehr weniger asphyktischen Zuständen.
5. Es findet sich ein Zuviel an Substanz, Luft und Blut in den Alveolen. Ein nicht geringer Teil der Bronchien und Bronchiolen ist durch Blut oder Blutschaum verlegt oder schlecht durchgängig.

Es handelt sich also bei derartigen Vorkommnissen nicht um eine Einpressung, die ja auch zu einer extremen Engstellung des Thorax führen würde, sondern um eine Aspiration von Luft ins Gefäßsystem in der Dekompression und zeitlich später. Die arterielle Luftembolie nach Explosionen stellt also eine Sonderform der klinisch schon bekannten und bedeutsamen *Aspirationsluftembolie* aus der Lunge dar. Über unsere neuere Erfahrung auf diesem Gebiet ist bereits in einer Arbeit berichtet worden¹.

Die Todesursache.

Die Druckwirkung der Explosionen kann verschiedenartig am Organismus angreifen. Entsprechend ist keine einheitliche Todesursache

gegeben. Weitgehend unklar war bisher der reine Detonationstod. Er wurde hauptsächlich als Schocktod („undefinierbares Etwas“) aufgefaßt. RÖSSELE vermutete für sofort bei nahen Detonationen getöteten Hunden, daß es sich um einen primären Herzschlag handelte. Diese Auffassung kann weiterhin durch eigene Beobachtungen für den geschlossenen Explosionsraum gestützt und ergänzt werden. Hier ist die Druckwirkung an der Körperperipherie noch umfassender. Nicht nur das Herz, sondern der Kreislauf insgesamt erleidet schwerste Schädigungen. Zwei Gefahrenmomente sind gegeben: es kann zu einem augenblicklichen Kreislaufstopp durch abnorme und unphysiologische Blutverschiebungen kommen, die sogar die ursprüngliche Stromrichtung des Blutes umkehren, wie das z. B. in den dem linken Herzen vorgesetzten Lungenvenen der Fall ist. Die Leber wird im Moment des Druckstoßes ausgequetscht wie nach Röntgenkontrastfüllung dargestellt werden konnte. Eine geringere gleichartige Wirkung für Detonationen im Freien ist wahrscheinlich. Die andere Gefährdung liegt in multiplen Läsionen, die gleichfalls bevorzugt das Gefäßsystem betreffen. Die Lungengefäße platzen von innen heraus einschließlich die Capillaren. Herzgefäße platzen. Aber auch grobmechanische Verletzungen an den Grenzschichten und Verschiebungsstellen werden gesetzt, da durch die überaus schnelle Stoßwirkung die Elastizitätsgrenze der Gewebe durch Trägheitseffekt überschritten wird. Pleuraeinrisse, Hämatothorax, Zerreißungen um die festeren Röhrensysteme von Bronchien und größeren Gefäßen der Lunge, Leberkapseleinrisse und Parenchymquetschungen mit Austritt von Blut in die Bauchhöhle, Pneumothorax können nicht unwesentlich mit zum sofortigen Ableben des Tieres beitragen. Überlebt das Tier, so bilden eine weitere Gefahr die Spätfolgen, wie das Auftreten einer arteriellen Luftembolie, die sekundäre Erhöhung der Widerstände im kleinen Kreislauf mit der Entstehung eines Lungenödems, Verlegung der Trachea und Bronchien durch Blutschaum. Am Herzen muß sich sehr bald ein Mißverhältnis zwischen Beanspruchung beim Daniederliegen des Kreislaufes und mangelnde Blutzufuhr mit Sauerstoff und Nährstoffen bemerkbar machen.

Verletzungen nach Schleuderungen bei Explosionen nehmen etwa eine Mittelstellung zwischen der oben beschriebenen umfassenden Druckstoßwirkung und Thoraxprellungen ein. Auch hier kann sich ein Herz-Kreislaufversagen bei schwerer Organschädigung von Lunge und Herz ergeben. Solche Schleuderungen können sowohl in unmittelbarer Nähe der Explosionsstelle bei stehender Körperstellung zustande kommen als auch indirekt über den Erdboden bei liegender Körperstellung. Im ersten Fall sind auch Abrisse und Zerstückelungen des Organismus durch die Expansivgewalt der Sprenggase möglich.

Zusammenfassung.

Sprengkörper und Explosionen aller Art wirken durch Druckstoß.

Nach Einschlag und Detonation von Fliegerbomben kamen Stauungsfakturen der unteren Extremität durch Erdstoß zur Beobachtung. Auch Schleuderung aus liegender Körperstellung mit Entstehung von Organschäden durch fortgeleitete Druckwirkung über den Erdboden ist möglich.

Die reine Druckstoßwirkung explosibler Gase im geschlossenen Raum wurde einer eingehenden Prüfung unterzogen. Als hauptsächliches Merkmal fanden sich beim sofort getöteten Tier oder sobald es kurz darauf verstarb, massive Blutungen in der Lunge unter weitgehender Konsolidierung, daneben bestanden Pneumoperitoneum, Pneumothorax, Blutungen in den Bauchraum und in die Pleurahöhle und Leberzerreißen und beim Meerschweinchen Magen- und Darmmeinrisse. Histologisch ergaben sich Veränderungen an den Lungengefäßen mit Weitstellung der Lichtung und vielfachen Platzungs- und Zerreißungseffekten, insbesondere an den Lungenvenen. Ähnliche Befunde konnten auch an den subepikardial verlaufenden Herzgefäßen erhoben werden.

Die physiologische Deutung für diese Läsionen an den Gefäßen geht dahin, daß im Moment des Druckstoßes selbst sich Blutverschiebungen in Richtung auf Unterdruckräume ergeben, die sich vor allem unter dem Schutz des knöchernen Thorax ausbilden. Daneben kommt es auch zu rein mechanischen Überdehnungen und Quetschungen der Gewebe durch den Druckstoß, die z. B. zu Pleuraanrisse und Leberzerreißen führen.

Der Thorax wird im Moment des Druckstoßes verformt im Sinne extrem verstärkten Exspiriums unter gleichzeitiger Flankenkompression.

Arterielle Luftembolien kamen zur Beobachtung. Sie kommen nicht durch Einpressung von Alveolarluft, sondern unmittelbar im Anschluß auf den Druckstoß in der Dekompression durch Ansaugungskräfte aus dem linken Herzen über angerissenen Lungenvenen zustande.

Die Todesursache wird in erster Linie auf einen momentanen Stopp des Blutumlaufes und auf eine Primärschädigung des Herzens zurückgeführt.

Literatur.

ANGENHEISTER: Z. Geophysik 1927. — BOKARIUS, N.: Vjschr. gerichtl. Med. 1911, 308. — BÜCHNER-KLOOS: Virchows Arch. 311 (1943). — DESAGA, HANS: Klin. Wschr. 1944, 297. — FAHR, E.: Virchows Arch. 314, 499. — FELIX, W.: Zbl. Chir. 1947, 609. — FELIX, WILLI, u. HERMANN LOESCHKE: 1. Arbeit: Bruns' Beitr. 179, 321 (1950). 2. Arbeit: Bruns' Beitr. 179, 357 (1950). — GEIL, CHRISTIAN: Vjschr. gerichtl. Med. 1899. — GRÄFF, SIEGFRIED: Tod im Luftangriff. Monographie. Nölke 1948. — HEIDINGER, SEPP: Wehrtechn. Mh. 1936. —

HEIDSIECK: Dtsch. Mil. Arzt 5 (1940). — HOFFHEINZ: Die Luft- und Fettembolie. In Neue Deutsche Chirurgie, Bd. 55. 1933. — KAESELITZ: Zbl. Chir. 1948, 866. — LOESCHKE, HERMANN: Z. inn. Med. 1950, H. 19/20, 631. — MAGNUS, G.: Dtsch. Z. Chir. 1915. — NOLTE: Vjschr. gerichtl. Med. 1911, 301. — POLAK and ADAMS: U.S. nav. med. Bull. 30, 165 (1932). — RÖSSLER, R.: Virchows Arch. 313 (1944); 314, 511 (1947); 315, 461 (1948) — Der Detonationstod (pathologisch-anatomische Untersuchungen). Als Manuskript vorgelegen. — RUSCA, FRANZESCHINO: Dtsch. Z. Chir. 132 (1914). — SCHUBERT, WERNER: Stauchungsfrakturen und Schädigung innerer Organe durch Erdstoß bzw. Fernwirkung von Explosionen. Inaug.-Diss. Rostock 1949. — STETTBACHER: Die Schieß- und Sprengstoffe. Monographie. Leipzig 1934. — ZUR VERTH: Zbl. Chir. 1919. — WEICHELT: Handbuch der gewerblichen Sprengtechnik. Monographie. Halle a. S.: Carl Marhold 1949. — WILSON, P. D.: Ann. Surg. 113, 915 (1941) (in einem Zbl. der Chir. als Ref. vorgelegen). — ZUCKERMAN: Zit. nach DESAGA, s. oben.
