

EINFÜHRUNG IN DIE ELEMENTE DER ANATOMISCHEN PHYSIK DER UNFÄLLE ALS GRUNDLAGE DER UNFALLSCHÜTZENDEN KONSTRUKTION VON FLUGZEUGEN

von Dr. med. habil. Justus SCHNEIDER, Fulda.

(Leitender Luftfahrtmediziner des Deutschen Aero-Clubs)

I. PROBLEM: FUSZSCHUTZ.

Als vor dem Krieg auf der Wasserkuppe noch fleiszig geflogen wurde, kamen in die mir unterstellte chirurgische Klinik eine Reihe von seltenen Unfällen in einer aussergewöhnlichen Zahl. Der erste Unfall, der unsere Aufmerksamkeit erregte, war der Bruch des Sprungbeines (Abb. 1). Auf dem linken Bild sieht man, dass der Fusz auf einem Holm rastete und dass durch den Druck von hinten beim Aufschlag das Sprungbein als ein Gewölbestein des Fuszgewölbes gerissen ist. Die Aufnahme rechts daneben zeigt eine weitgehende Zertrümmerung wie sie bei grösserer Wucht eintritt. Alle Sprungbeinbrüche waren bei einem bestimmten Flugzeugtyp aufgetreten, nämlich bei dem „Zögling“ (Abb. 2). Es hätte nahegelegen, diese und andere noch zu beschreibende Unfälle nach den Regeln der chirurgischen Technik gut zu behandeln und damit zufrieden zu sein. Aber die Häufung gerade des ausserordentlich seltenen Sprungbeinbruches gab uns die Gewissheit, dass es sich hier um eine Sonderheit im Segelflugbetrieb handeln müsse. Wir erinnerten uns daran, dass auch der Unfall eine Krankheit ist, die wie jede Krankheit ihre besondere Vorgeschichte hat. Während nun die üblichen Krankheiten auf dem Gebiet der gestörten Physiologie, also im Grunde auf einem im wesentlichen physiologisch-chemischen Gebiet sich abspielen, ist der Unfall eine Krankheit, deren Grundlagen auf dem Gebiete der Physik zu suchen sind, denn ein Unfall ist ein exquisit physikalischer Vorgang. So gut wie man bei anderen, z. B. den Infektionskrankheiten, die Entstehung und den Hergang der Krankheit entziffern muss, bevor man vorbeugende Massnahmen treffen kann, so gut ist auch bei dieser physikalischen Krankheit des Unfalls die Klärung des eigentlichen Vorganges die absolute Voraussetzung zu einer zielgerechten Verhütung oder Prophylaxe. Betrachten wir den Unfallvorgang (Abb. 3) so erkennen wir auf diesem groben Diagramm, dass entlang der Landestrecke die lebendige Wucht des aufprallenden Flugzeuges = $\frac{m \cdot v^2}{2}$ = p.s in ihren zwei Komponenten, nämlich einer Last entlang einem Weg darstellbar

wird. Da das Produkt aus Kraft mal Weg durch die bei der Landung herrschenden physikalischen Voraussetzungen eindeutig gegeben ist, so ist die Abhängigkeit der maximalen Unfallkraft in umgekehrter Proportion zum Unfallweg ohne weiteres gegeben. Da die Last entlang dem Weg gewöhnlich ungleich ist, lässt sich das natürlich nicht elementar berechnen. Die Integralformeln werden später beim Helm noch vorgeführt. Besonders deutlich werden diese Verhältnisse bei dem sogenannten „Prinzip der fallenden Tasse“. Wenn ich eine Tasse von 100 Gramm Gewicht aus einem Meter Höhe auf einen Stein fallen lasse, so wird sie durch die Aufschlagsenergie zerstört. Wenn dieselbe Tasse aus derselben Höhe auf einen Teppich fällt, wird sie nicht zerstört, obwohl bei dem Aufschlag die gleiche Energie frei geworden ist. So ist es auch mit dem Fusz. Sehen wir uns die Abb. 4 an, so erkennen wir, dass eine solche Steuerungskonstruktion die Verletzung des Sprungbeins geradezu hervorrufen muss.

In dieser Erkenntnis wurden Stembretter angebracht, die sich später in der Segelfliegerei überall durchgesetzt haben. Die Entwicklung dieser Stembretter zur Parallelogramm-Steuerung, die das seitliche Abrutschen verhütet, ist in Abb. 5 dargestellt. Nr. 6 zeigt die Ausführung der Stembretter-Steuerung bei dem SG 38 und bei Abb. 7 kann man genau sehen, wie die Konstruktion schliesslich gemacht worden ist. Das Ergebnis dieser einfachen konstruktiven Abänderung war ein überzeugend günstiges. Nach seiner Einführung wurden nicht nur die Sprungbeinbrüche nicht mehr beobachtet, sondern alle Fuszverletzungen sanken auf 5% des anfänglichen Wertes herunter, wobei als Masszahl diejenige Zahl der Landungen genommen

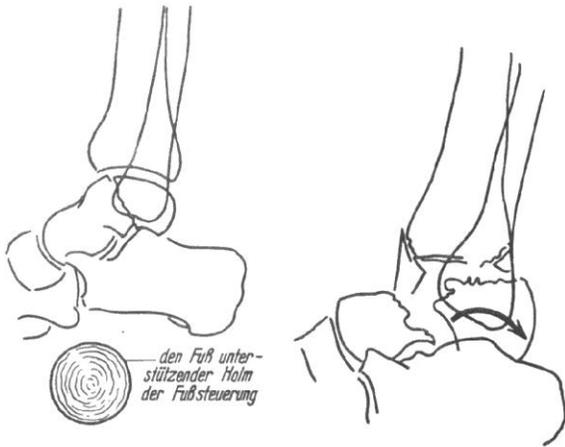


Abb. 1 Talusbruch beim Segelfliegen

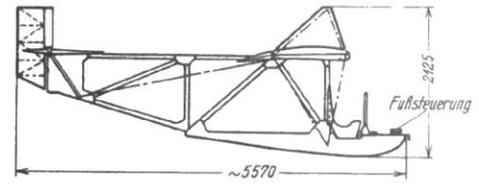


Abb. 2 *Zögling* auf dem es passierte

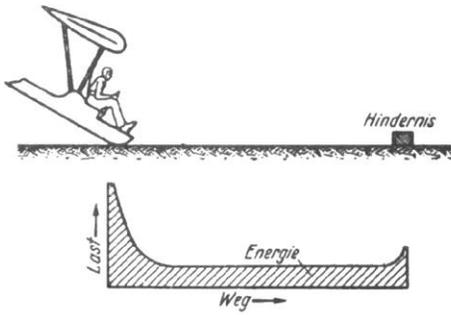


Abb. 3 Dazugehöriges Energiediagramm

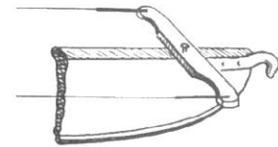


Abb. 4 Die Holmsteuerung als Ursache

Abb. 5 Entwicklung der Stembrettersteuerung

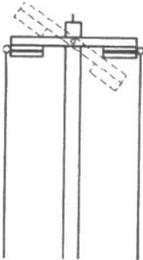


Abb. 6 Endgültige Parallelogrammsteuerung

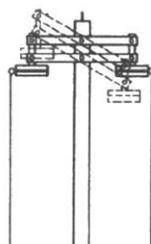
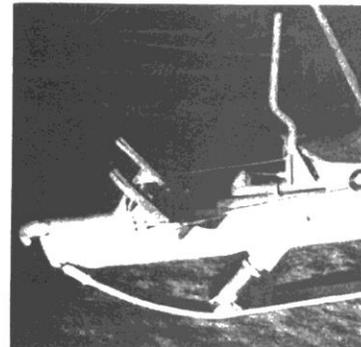


Abb. 7 Dieselbe seitlich



wurde, bei der ein Bruch am Flugzeug entstand, bei denen also auch früher eine erhöhte Unfallzahl zu verzeichnen war.

II. PROBLEM: WIRBELSÄULENSCHUTZ.

Ungefähr ein Jahr später traten zuerst auf dem Flugplatz Hornberg zahlreiche Wirbelverletzungen auf. Da wir diese auf der Wasserkuppe nicht beobachteten, gingen wir der Konstruktion der dort und hier benutzten Flugzeuge im einzelnen nach. Der Wirbelsäulenbruch selber wird dadurch erzeugt, dass bei der Landung die in der Körperlängsachse liegende Komponente der Aufschlagskraft die Wirbelsäule zusammenzupressen bestrebt ist. Sie sehen hier eine Röntgenganzaufnahme eines sitzenden Piloten als schematische Zeichnung (Abb. 8), aufgenommen auf einem Sitz des Raketenflugzeuges Me 163 A. Wo sich der Pfeil befindet war das Ende des Fallschirmpaketes und dort war bei dem bekannten Versuchspiloten Heini Dittmar der Wirbelsäulenbruch aufgetreten. Diese Maschine wurde erst durch die später zu beschreibenden konstruktiven Maßnahmen einsatzfähig, da vorher zu viele Wirbelbrüche aufgetreten waren. Den Schlüssel zu der Situation geben uns die Abb. 9 u. 10. Bild 9 zeigt den Sitz bei dem Gleitflugzeug, das auf dem Hornberg benutzt worden war. Bild 10 zeigt den Sitz bei den Flugzeugen, wie sie auf der Wasserkuppe benutzt wurden. Nur bei dem anscheinend bequemeren Sitz auf Bild 9 traten die Wirbelsäulenbrüche ein, während sie bei dem Sitz auf Abb. 10 unbekannt blieben. Betrachten wir jetzt Abb. 11, so sehen wir, dass bei dem Landestosz, der hier in einem Winkel von 30° gegen die Horizontale angenommen wird, die Energie des Landestosz bezügl. der Wirbelsäule oder ihrem Auflagepunkt, in einen der Sitzoberfläche parallelen Vector P_t und den senkrecht dazu wirkenden Vector P_n aufgespalten wird. Heben Sie nun die Sitzebene und gehen Sie in Gedanken so weit, dass die Sitzebene senkrecht zum Landestosz steht (Abb. 12), so fällt die Tangentialkraft vollständig weg. Sie wird $= 0$, dafür die Normalkraft gleich der gesamten Aufschlagskraft. Unter diesen Umständen bricht die Wirbelsäule zusammen, während sie P_n bei aufgehaltener Landestosz noch ausgehalten hätte. Nehmen wir den konträren nur denkbaren Fall an, dass nämlich die Sitzoberfläche parallel zu dem Landestosz verläuft, (Abb. 13) so würde $P_n = 0$ und P_t gleich dem Landestosz. Der Pilot würde sich am Ende der freien „Rutschbahn“ schwer verletzen. Für jeden Punkt der Sitzoberfläche lässt sich die für die Wirbelsäule gefährliche Kraft P_n konstruieren und Abb. 14 zeigt das Diagramm eines beliebig angenommenen Sitzes. Es ist natürlich klar, dass zwischen all den Möglichkeiten der Sitzebene eine optimale gesucht werden muss und diese fand sich in einer Neigung des Sitzes von ungefähr 9° gegen die Horizontale, wie es nachher bei dem SG 38 (Abb. 15) durchgesetzt und ausgeführt worden ist. Dieses Flugzeug, das in Deutschland als das normale Gleitflugzeug für die Einsitzerschulung gilt, hat eine ganz ausserordentlich niedrige Unfallziffer. Die Fuszbrüche werden durch die Parallelogrammsteuerung auf ein Minimum reduziert und die Wirbelsäulenbrüche treten so selten auf, dass sie praktisch vernachlässigt werden können. Dazu ist natürlich notwendig, dass der Landestosz an sich noch durch eine geeignet vorgespannte Federung der Kufe, wie man sie hier erkennen kann, aufgefangen und eingeebnet wird. Man wird gut tun, diese Federung so stark vorzuspannen, dass sie bei ungefähr 15 g. berechnet auf das ganze Flugzeug, eingefahren ist.

Als wir in Deutschland im Jahre 1942 die ersten Raketenflugzeuge gebaut hatten, die die 1000 km/h-Grenze überschritten, hatten die vorgetragenen Anschauungen über die Sitzform und die Sitzfederung ihre Feuerprobe zu bestehen. Während im Anfang bei dieser Maschine beinahe jede fünfte Landung von einem Wirbelsäulenbruch gefolgt war, gelang es, durch eine raffinierte Sitzform und Federkonstruktion diese Wirbelsäulenbrüche praktisch vollständig auszuschalten. Es ist z. B. in Wittmundhafen vorgekommen, dass ein Versuchspilot durch Aussetzen des Triebwerkes in einer Raketenmaschine bald nach dem Start auf einem Feld notlandete, wobei der Kufenkasten durch die Wucht des Aufpralles abbrach, die Wirbelsäule des Fliegers aber unbeschädigt blieb! Die Sitzfederung hatte einen Federweg von 7 cm, (eine Völligkeit η von $0 \cdot 8$) und eine Arbeitsaufnahme von 75 mkg. Ihre Federungsebene verlief 10° von der Flugzeughochachse.

Kommen wir jetzt zu anderen Verletzungen, so genügt oft ein Blick auf die Flugzeugkonstruktion, um zu erkennen, dass hier Unfälle beinahe unvermeidlich sind, wie bei dem tschechischen Modell Abb. 16, wo der zwischen Instrumentenbrett und Steuerungspedal einge-

Abb. 8 Seitliche Röntgenaufnahme eines sitzenden Piloten

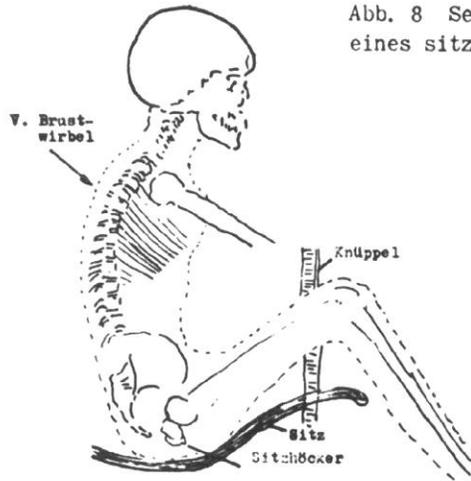
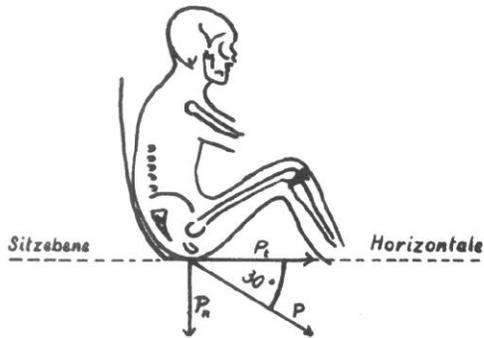


Abb. 9 + 10 Alternative Sitzformen; bei d. gebogenen Sitzform treten Wirbelbrüche auf



Abb. 12 I. Grenzfall steile Sitzlage $P_t = 0$

Abb. 11 Kräfteanalyse horizontale Sitzanlage

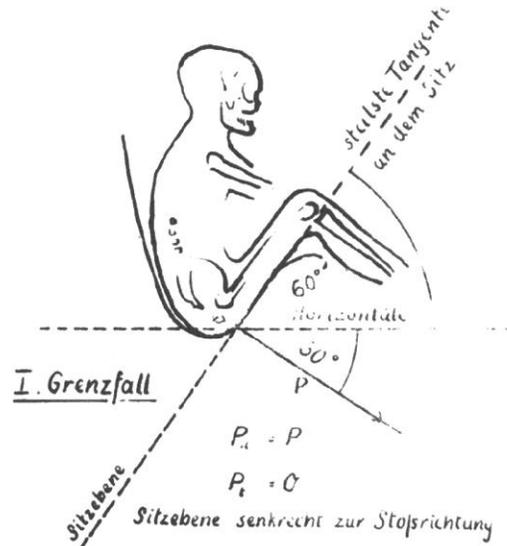


$$P_t = \sqrt{P^2 - P_n^2}$$

$$P_n = \sqrt{P^2 - P_t^2}$$

Beispiel:

Neigung der Sitzebene zur Horizontalen: 0°



I. Grenzfall

$$P_n = P$$

$$P_t = 0$$

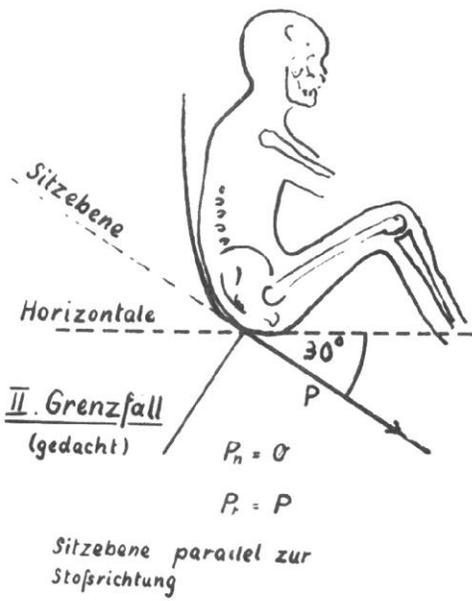
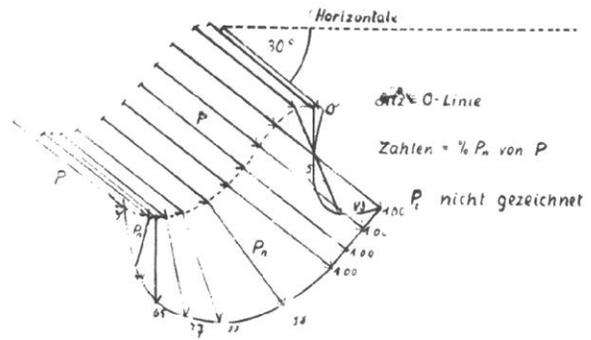


Abb. 13 II. Grenzfall $P_n = 0$



P_n als Funktion einer bestimmten Sitzform,
für die gleiche Last an 13 Punkten des Sitzes
dargestellt

Abb. 14 P_n bei bestimmtem Sitz

Abb. 15 Fertige Konstruktion bei SG 38

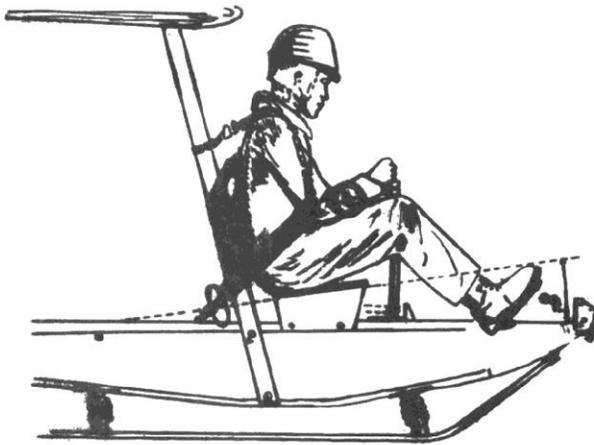
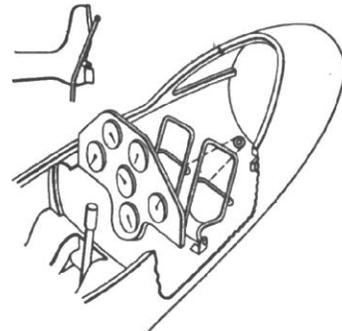


Abb. 16 Leicht vermeidbare
Unfallquelle bei DOHA II



klemmte Fusz bei jeder schiefen Landung brechen muszte.

Ziemlich einfach liegen auch die Verhältnisse zur Verhütung von Milz-, Leber- und Nierentrupturen, die dadurch zustande kamen, dass bei nur mittengehaltener Begurtung eine seitliche Kraft auftritt, die den Körper zusammenzwingt und diese Verletzungen hervorrufen. Bei dem oben gezeigten SG 38 und allen späteren Modellen ist daher die Begurtung hinter dem Piloten gespreizt angebracht (Abb. 17).

III. PROBLEM: KOPFSCHUTZ.

Ein sehr wichtiges Problem stellt der Schutz des Kopfes dar. Mit Recht gilt ein Schädelbruch als eine sehr gefährliche und in vielen Fällen tödliche Verletzung. Der Schädelbruch tritt in mehreren Grundformen auf, von deren eine Form der Lochbruch ist, wie man ihn auf Abb 18 in der schematischen Zeichnung gut sehen kann. Als nun die Piloten mit Helmen ausgestattet wurden und einer der Piloten zu diesem Zwecke einmal einen normalen Stahlhelm trug trat bei ihm ein Schädelbruch auf, wie er bislang noch nicht beobachtet war, nämlich der Kranzbruch des Schädels, wie ich ihn damals benannte. Die Abb. 19 und 20 zeigen die entstandenen Röntgen-Aufnahmen. Auf Abb. 21 kann man den Mechanismus gut erkennen. Die Schädelkapsel wird plötzlich mitsamt dem umgebenden starren Helm angehalten, während der darunterliegende Gesichtsschädel mit der ihm innewohnenden Wucht $m \cdot \frac{v^2}{2}$ unter der Schädelkapsel

abgerissen wird. Die dadurch entstandene ringförmige Fraktur um den ganzen Schädel wirkt stets tödlich. Nicht zuletzt die Beobachtung dieser Schädelbrüche hat mich 1938 zu der Erkenntnis geführt, dass die Verhütung der Unfälle davon ausgehen muss, dass man sogenannte "Leitverletzungen" beobachten muss. Das sind typisch vorkommende Verletzungen, deren Mechanismus experimentell und rechnerisch durchforscht werden kann. Wenn ein Schädel aufschlägt, so wird, physikalisch gesehen, ein in Bewegung befindlicher Körper über einen Bremsweg angehalten und erleidet eine kurzfristige negative Beschleunigung. Es kommt darauf an, diesen Bremsweg zu kennen und ihn dann zu verwerten. Im Falle des Schädels wurden die zum Zerbrechen eines Schädels notwendigen Energien nach Weg und Kraft in Form eines Diagramms aufgenommen, wie Sie auf Abbildung 22 sehen. Unterwirft man dieses Diagramm einer geeigneten Rechnung (Abb. 23), so ist es möglich, auf grund der physikalischen Unfalldaten, d.h. aus der Masse des aufschlagenden Teiles, aus der Geschwindigkeit beim Aufschlagsbeginn und aus dem zur Verfügung stehenden Federweg die tatsächliche maximale Aufschlagskraft und die beim Aufschlag herrschende Stoszbeschleunigung mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen. Diese Aufschlagskraft ist ihrerseits der Schlüssel dazu, die Federungskräfte richtig zu dimensionieren. Dieses Verfahren würde auch bei den oben genannten Verletzungen strikte durchgeführt, aber seine Darstellung ist bei einer Sturzhelmkonstruktion besonders einleuchtend. Während der Arbeiten über einen günstigen Sturzhelmbauch der Krieg aus und es erhob sich die zusätzliche Forderung, zu einer möglichst hohen Unfallsicherheit auch noch eine möglichst hohe Beschuszfestigkeit zu gesellen. Infolgedessen wurde ein einschaliger Stahlhelm konstruiert, der ein aus Schaumgummi bestimmter Verformungsfestigkeit bestehendes Innenfutter aufwies. Die physikalischen Daten dieses Innenfutters und des Schädels finden Sie auf Abb. 24 vor, auf dem die aufnehmbaren Energien aufgetragen sind. Der Helm hatte fertig die Gestalt, wie ihn Abb. 25 zeigt. Er wurde noch kurz vor Kriegsende in einigen Verbänden eingeführt und erfüllte die Ansprüche, die wir von ihm erhofften. Es sind mir Fälle bekannt geworden, bei denen bei einer Bauchlandung der Pilot mit dem Helm so fest gegen die Panzerglasscheibe stiesz, dass diese einen Sprung bekam, der Pilot selbst aber kam mit einer Hirnerschütterung davon. Gegen Unfälle würde ein Helm aus geeignetem Leichtmetall, der neben dem Futter eine arbeitsaufnehmende Doppelwand besitzt, noch weit höhere Aufschlagsgeschwindigkeiten unschädlich vernichten können. Seine grundsätzliche Konstruktion zeigt Abb. 26, während Abb. 27 eine Darstellung der ersten Konstruktionszeichnungen praktisch vermittelt. Natürlich kann man von einem Sturzhelm keine Wunder erwarten. Oberhalb gewisser Geschwindigkeiten, die pro Aufschlag verzögert werden, gibt er keinen wirksamen Schutz, doch ist es wichtig zu wissen, dass zahlreiche, in dem anatomischen Institut einer Universität vorgenommenen Experimente ergeben haben, dass ein richtig gefütterter, starrer einschaliger Helm etwa die doppelte und ein gut konstruierter doppel-

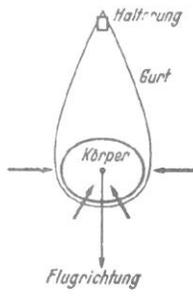


Abb. 17 Gefährdung von Niere und Milz durch mittengehaltenen Gurt

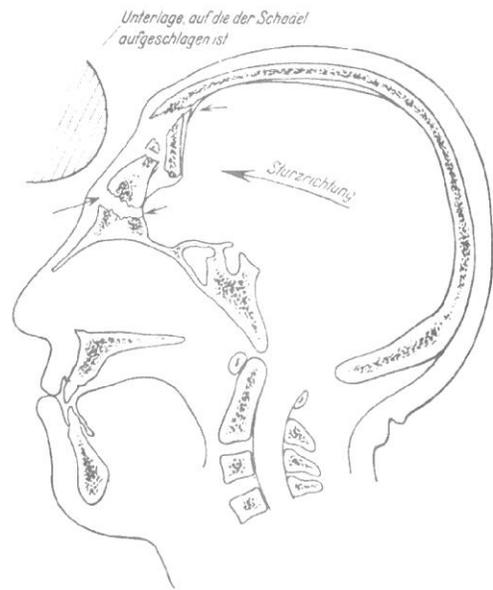


Abb. 18 Lochbruch im Schema

Abb. 19 Kranzbruch von vorn (stets tödlich); bei d. geraden nicht

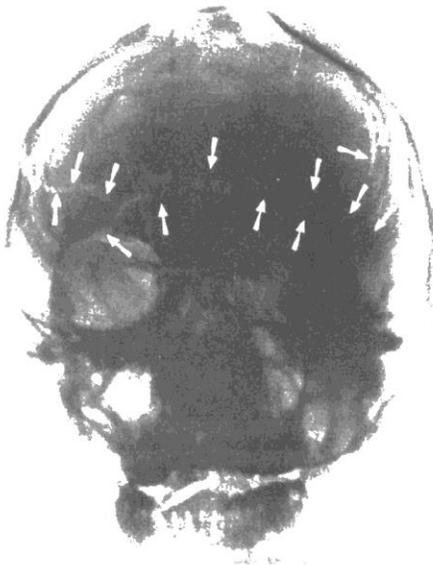
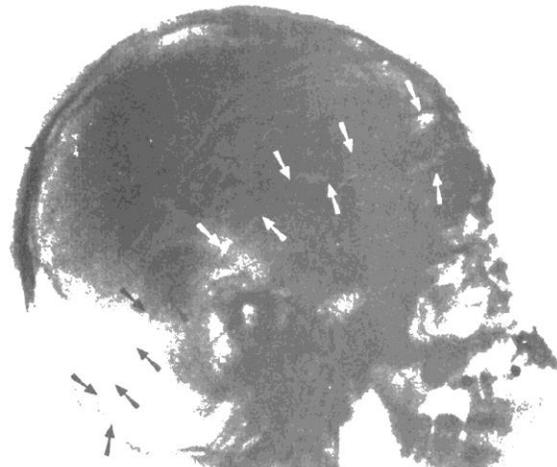


Abb. 20 Kranzbruch seitlich



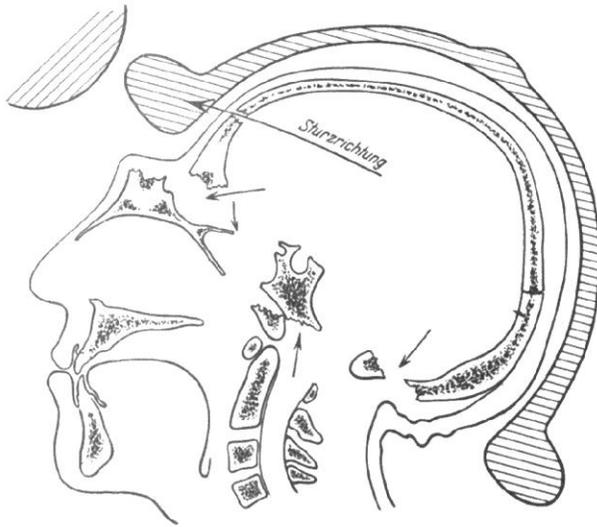


Abb. 21 Kranzbruch Schema

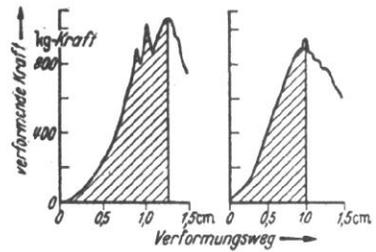


Abb. 22 Arbeitsdiagramm des Schädels

Abb. 23 Physikalische Analyse (hier wird offenbar, dass d. Unfall ein Beschleunigungsproblem ist)

Berechnung d. max. Aufschlagskraft
aus Masse, Geschwindigkeit vor d. Aufschlag u. Verformungsdiagramm

Kraft über Weg gleich:

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

$$A = \bar{\alpha} \cdot s$$

Arbeit = kinetische Energie

$$\bar{\alpha} \cdot s = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

II Kraft über Weg ungleich:

$$A_1 = \int_0^s \alpha \cdot ds$$

$$\frac{\int_0^s \alpha \cdot ds}{\alpha_{max} \cdot s} = \eta$$

$$A_1 = \alpha_{max} \cdot s \cdot \eta$$

$$A_1 = \alpha_{max} \cdot s \cdot \eta = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

$$\alpha_{max} = \frac{m \cdot v^2}{2 \cdot s \cdot \eta}$$

Abb. 24 Analyse des gepolsterten Einschalenhelmes

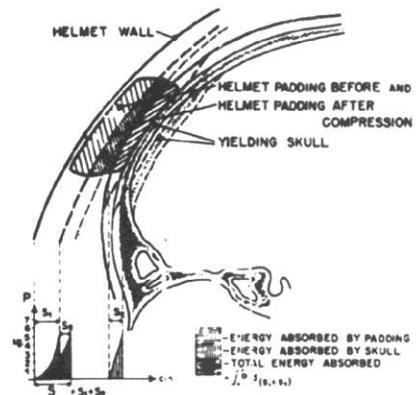




Abb. 25 Ausführung des Einschalenhelmes (Luftwaffenstahlhelm)

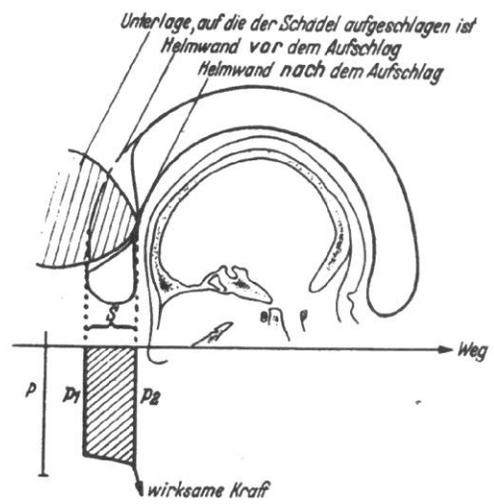


Abb. 26 Analyse des Doppelhelmes

Abb. 27 Konstruktion des Doppelhelmes

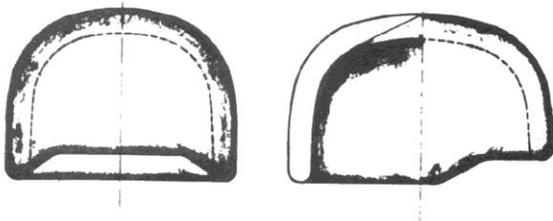
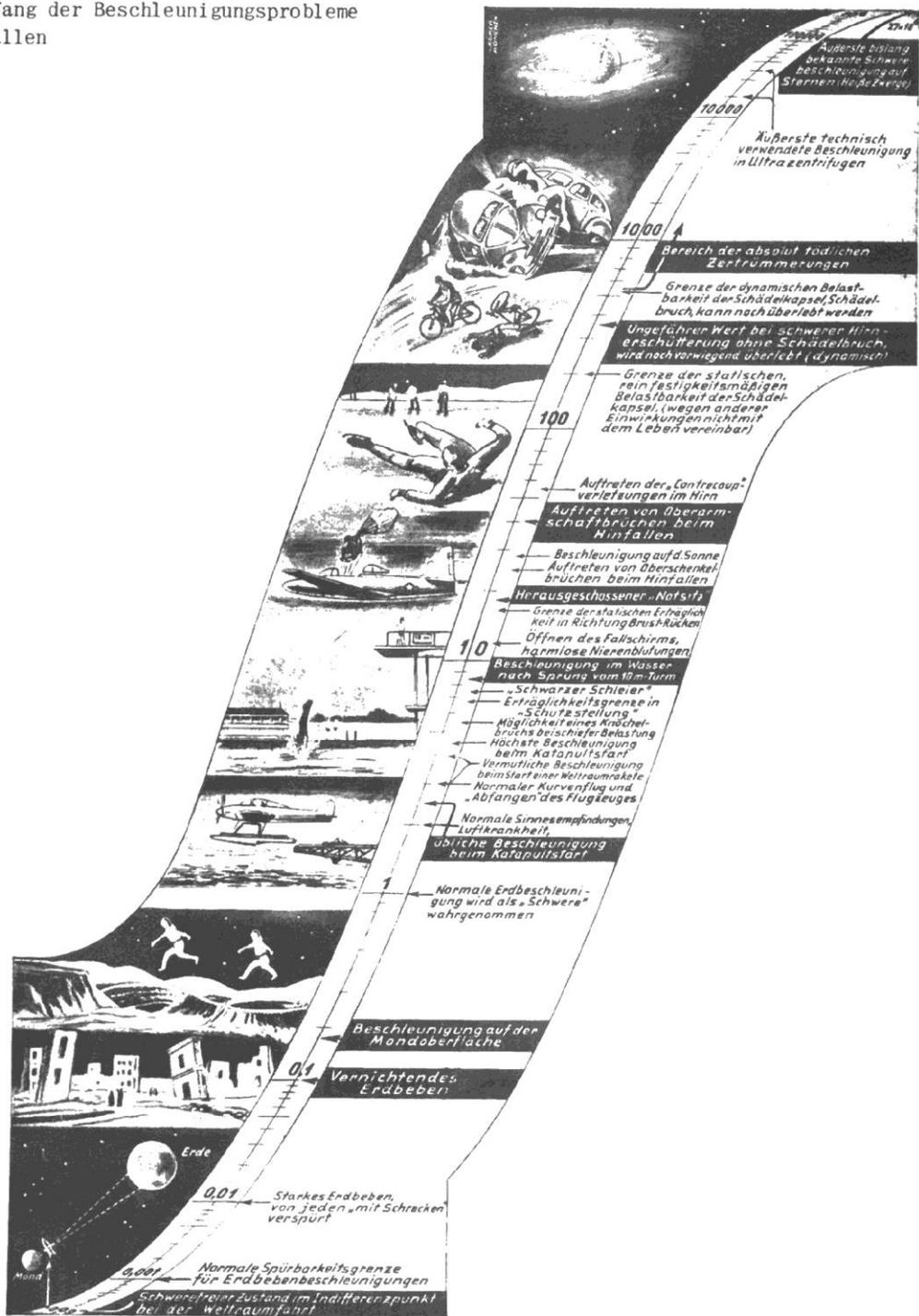


Abb. 28 Umfang der Beschleunigungsprobleme bei den Unfällen



schaliger Helm etwa die dreifache Aufschlagsgeschwindigkeit noch erträglich macht, die beim Sturz eines ungeschützten Schädels auf eine ebene Betonplatte gerade ausgehalten werden kann. Die absolute Grenze beim Schädelbruch für den ungeschützten Kopf liegt erstaunlich niedrig. Ein Aufschlag mit rund 10 km/std. gegen eine Betonwand ruft mit Sicherheit einen Schädelbruch hervor! Man braucht aber nicht den Mut zu verlieren, da es bei Flugzeugunfällen in den seltensten Fällen um einen Aufprall gegen eine Wand handelt, fast immer liegen zahlreiche einander folgende Aufschläge vor; wenn nun die Verzögerung pro Aufschlag unterhalb der gefährlichen Grenzen bleibt, können auch Trümmerlandungen aus hohen Geschwindigkeiten noch gut ablaufen, wie bei der Landung jenes Fliegers, der beim Sturzflug zu spät abging, mit 400 km/std. in Erdbertührung kam und deshalb lebend davon kam, weil die Landebahn im ganzen 800 m lang war, von denen unterwegs ein grosser Teil der Maschine verloren ging. Die Durchrechnung nach den oben gegebenen Formeln erweist, dass in günstigen Fällen die Verzögerung beim Aufschlag nirgendwo tödliche Werte erreichen musste. Immer kommt es bildlich gesprochen darauf an, dass „die Verpackung“ zerstört wird, damit „der Inhalt“ heil bleibt!

Überblicken wir das ganze Gebiet der Unfälle, so ist das Wichtigste die Erkenntnis, dass der Unfall die Folge einer Beschleunigung ist. Die Werte dieser Beschleunigungen, die bei Unfällen auftreten, gemessen an den sonst den Fliegern bekannten Beschleunigungen, sind ganz unerwartet hoch. Betrachten wir zu diesem Zweck noch die Abb. 28, so findet man hier alle bisher bekannten Werte und vergleichsweise sonstige aus der Naturwissenschaft und Technik bekannte Beschleunigungen in ein logarithmisches Schema eingezeichnet. Die Unfallwerte stemmen fast alle aus eigenen Forschungen, einige aber, z.B. der Wert für die an der Wirbelsäule noch erträglichen Beschleunigungen (18 g) wurde auch von anderen Forschern, dieser z.B. von Ruff festgestellt, und es fand sich eine beide Forscher beruhigende Übereinstimmung der Ergebnisse.

Am meisten in Erstaunen versetzen uns wohl die Beschleunigungen bei den Schadelverletzungen. Ein Schadelbruch bedarf zu seiner Entstehung einer Beschleunigung von beinahe 500 g, das entspricht der 18fachen Beschleunigung von der Sonnenoberfläche! Das macht es auch verständlich, weswegen anscheinend sehr kurze Federwege in Helmen noch so eine grosse Wirksamkeit haben. Bei einer Verdoppelung des Federweges z.B. wurde nämlich eine Halbierung der maximalen Beschleunigung eintreten.

Möge die Forschung an diesen Dingen nicht vorübergehen, sondern stets den unbeirrbaren Weg einer genauen wissenschaftlichen Analyse gehen, über den allein der Weg zu einer sinn-gemässen und auch wirksamen Unfallvorbeugung gegangen werden kann.

Mit Bewunderung erkennen wir, mit welcher Anpassungsbreite der menschliche Organismus vom Schöpfer ausgestattet wurde. Auch das hier Analytierte bietet nur einen kleinen Einblick weiter in das Rätsel des Lebens, dessen Erscheinungsformen wir Menschen in nimmermüder Arbeit aufzudecken bemüht sind. All unser Mühen aber haftet an der Oberfläche: Den Kern des Lebensgeheimnisses werden wir niemals enthüllen. Das aber, was unser Geist einsieht und erkennt, das sind wir verpflichtet, zum Heil unserer Mitmenschen auch anzuwenden.