

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 23 (1950)
Heft: I-II

Artikel: Morphologische Forschung
Autor: Zwicky, F.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-112107>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 20.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Morphologische Forschung

von F. Zwicky.

California Institute of Technology, Pasadena.

(24. X. 1949.)

1. Der Charakter der morphologischen Forschung.

Die morphologische Analyse und Konstruktion beschäftigt sich mit der Totalität der Lösungen vorgegebener Probleme. Sie ist deshalb im wesentlichen Totalitätsforschung.

Morphologisches Denken kann aus verschiedenen Gründen betrieben werden. Dem einen ist es interessantes Spiel, wie etwa in der Mathematik; dem andern ist es absolute Notwendigkeit.

Man war zum Beispiel während des letzten Krieges in Deutschland sehr weit voran in der Erforschung und Konstruktion von Raketen und Strahltriebwerken im allgemeinen. Dieser Vorsprung konnte in Amerika nicht eingeholt werden, indem man einfach anfing über diese oder jene Rakete und diesen oder jenen Triebstoff zu arbeiten. Es musste unbedingt ein Gesamtüberblick über alle Möglichkeiten gewonnen werden, damit diejenigen Geräte und Triebstoffe zur Bearbeitung ausgewählt werden konnten, die militärisch am wirksamsten waren und die doch in der verfügbaren Zeit und den zu mobilisierenden Menschen und Materialien entwickelt und hergestellt werden konnten. So ist denn die morphologische Analyse zum ersten Mal in aller Schärfe auf das Problem der Antriebe durch Rückstoss angewendet worden, mit dem Resultat der schematischen Erfindung *aller* überhaupt möglichen Strahltriebwerke, die durch chemische Reaktionen aktiviert werden¹⁾.

Die morphologische Methode gibt uns die Gewähr, dass nichts Wesentliches vergessen wird. Ihr Grundprinzip ist, dass man zwar nicht alle Lösungen eines gewissen Problems erforschen und konstruktiv verwerten kann oder soll, *dass man aber von allen diesen Lösungen wissen kann*. Mit welchen Lösungen man sich später weiter beschäftigt, ist dann eine Frage der relativen Leistungsfähigkeit derselben mit Bezug auf gewisse Zwecksetzungen.

¹⁾ F. ZWICKY, Aeronautical Engineering Review, 6, 20 (1947).

Wie schon angedeutet kann Morphologie analytisch oder konstruktiv sein. Im letzteren Falle kommt sie einer Systematisierung von Erfindung gleich, soweit solche eben durch rein schematisches Vorgehen überhaupt ersetzt werden kann. Überraschenderweise hat morphologisches Denken als Methode der Erfindung schon beträchtliche Erfolge gezeitigt. Es ist auch sicher, dass ohne solches Denken die Menschen auf allen Gebieten es für Jahrhunderte, ja Jahrtausende oft unterlassen, wichtigste Ideen, Methoden und Geräte aller Art zu entwickeln.

So glauben zum Beispiel viele, dass mit Geräten schwerer als Luft erst geflogen werden konnte, nachdem Verbrennungsmotoren erfunden und konstruierbar waren. Man meint deshalb irrtümlicherweise, dass für die Alten der *künstlich angetriebene Flug* (nicht Segelflug) unmöglich gewesen wäre, weil sie eben technisch nicht weit genug waren, um Motoren zu bauen. Infolge solchen geistigen Schlendrians haben es die Alten wie die Modernen unterlassen, sich mit einem der einfachsten aller Translationsantriebe, dem Aeroresonator zu beschäftigen, wie er etwa in der V-1-Bombe gebraucht und wie er 1943 in Amerika vom Verfasser etwas verspätet, aber unabhängig von den Deutschen auf Grund der morphologischen Analyse entdeckt und konstruiert wurde. Die Ironie der Situation liegt darin, dass die Ägypter oder die Griechen sehr wohl mit einem ventillosen Aeroresonator, mit Holzkohle als Triebstoff und mit einem grossen Brett als Flügel hätten fliegen können.

Eine analoge Sachlage existiert bei den Teleskopen, auf die wir noch in grösseren Einzelheiten zurückkommen werden. Was auf den verschiedenen Gebieten, die mit Mathematik, Physik und Technik nichts zu tun haben, im Laufe der Jahrhunderte verwirtschaftet worden ist, weil Selektivität und nicht Objektivität bei wichtigsten Entscheidungen den Ausschlag gaben, kann wohl nie ermessen werden. Hier liegen ohne Zweifel viele von den grössten Tragödien verborgen. Es ergibt sich daher die Aufgabe, zwar morphologisches Denken zuerst auf physikalische, mathematische und technische Probleme anzuwenden, weil das auf diesen Gebieten am leichtesten gelingt; nachdem aber die neue Methode auf diese Weise einmal systematisch entwickelt sein wird, besteht für jeden verantwortlichen Forscher der Drang, sie mit aller Energie auf Biologie, Medizin und insbesondere Soziologie und diejenigen Probleme des menschlichen Gemeinschaftsproblems anzuwenden, die von jeher zu den grossen Katastrophen im Leben der Menschen und der Völker geführt haben. Auf alle Fälle wird morphologisches Planen mehr und mehr zur Notwendigkeit werden, wenn die Überbevölkerung der Erde weiter fortschreitet wie bis anhin.

Wie im besonderen in der Medizin Selektivität eine wichtige und oft erschreckende Rolle gespielt hat und noch spielt, ist vielfach dargestellt worden. Als einer der ersten, die morphologisch dachten, hatte Paracelsus schon Einsichten, die wesentlich auf Jahrhunderte hinaus hätten den Weg weisen sollen. Vor allem begründete er das Heilen auf materieller, sowie auf geistiger Grundlage. Mit der Aufklärung und den Erfolgen der modernen Wissenschaft verlor die Medizin die Perspektive, welche Paracelsus erschaut hatte und beschränkte sich zu ihrem grossen Schaden hauptsächlich auf materielle Heilmittel. Von einem organisch morphologischen Angriff auf das Gesamtproblem der Medizin ist auch heute noch wenig sichtbar. Das Studium der Totalitätsforschung ist deshalb gerade in der Medizin, sowie auch der Biologie äusserst wünschenswert.

Im folgenden soll nicht etwa ein spezielles Problem morphologisch durchgedacht werden, wie es der Verfasser z. B. für Strahltriebwerke getan hat¹⁾. In diesem besonderen Falle waren nämlich alle Voraussetzungen erfüllt, die es gestatteten, die morphologische Analyse lückenlos durchzuführen. Dieselben Voraussetzungen sind aber nicht immer gegeben. Dann ist es nötig, sich zuerst Stützpunkte der Erkenntnis zu schaffen, indem man sich auf bestimmte einzelne Fragen konzentriert. Dieser Fall liegt sicher in der Biologie und Medizin vor, wo eben die menschliche Phantasie nicht hinreicht, um alle wesentlichen Vorgänge des organischen Lebens vorauszusehen und wo zuerst gewisse Einzeleinsichten gewonnen werden müssen, bevor man sich an die Schaffung einer Gesamtperspektive machen kann. Das Vordringen zu Totallösungen über den Weg der Schaffung einzelner vorläufiger Ankerstellen ist auch dann von Vorteil, wenn die Morphologie eines Fragenkomplexes wegen des Auftretens vieler bestimmender Parameter sehr kompliziert wird. Es lohnt sich in diesem Fall in erster Näherung gewisse Parameter auszuschalten und vorerst einen partiellen „morphologischen Kasten“ zu untersuchen. Was wir damit meinen, soll im nächsten Abschnitt am Beispiel der Teleskope näher illustriert werden.

2. Morphologie der Teleskope.

Im wesentlichen sind in der Geschichte der Wissenschaft nur zwei Grundtypen von Teleskopen entwickelt worden, der Refraktor und der Reflektor. Ausgehend von den beiden von GALILEI und NEWTON geschaffenen Grundtypen kleinster Apertur, wurde die letztere in den diesen Forschern folgenden Jahrhunderten immer grösser dimensioniert, bis mit der Ein-Meter-Linse an der Yerkes

Sternwarte und dem Fünf-Meter-Spiegel auf dem Palomar Mountain unter Aufwand von ungeheuren Kosten die Grenze erreicht zu sein scheint. Weiter zu gehen ist wohl für erdgebundene Teleskope von wenig Nutzen, da ohne Ausschaltung der Szintillation der Erdatmosphäre und wegen des damit verbundenen schlechten „Sehens“ mit grösseren Dimensionen der Teleskope wenig gewonnen werden kann. In dem Umstand, dass für Jahrhunderte nur auf Grösse gearbeitet wurde und kein wesentlich neues Prinzip hinzutrat, wittert man schon Selektivität und Verkalkung des Erfindungsgeistes. Um solcher Senilität entgegenzusteuern, stellt sich das morphologische Denken geradeaus die Frage²⁾ nach der

Totalität aller Teleskope.

Eine vernünftige Antwort ist natürlich nur möglich, falls zuerst genau definiert wird, was unter einem Teleskop zu verstehen ist. Wir können zum Beispiel sagen, dass es sich um Instrumente handelt, die elektromagnetische Strahlung, welche von verschiedenen Gegenständen ausgesandt wird, auffangen und so verarbeiten, dass die Analyse der erhaltenen Resultate zu gewissen Einsichten über die Natur der besagten Gegenstände führt. Unter dieser sehr allgemeinen Definition wäre aber eine morphologische Analyse der Totalität aller entsprechenden Teleskope heute kaum möglich. Man kennt zum Beispiel nicht einmal die Wirkungen äusserst harter kurzwelliger Strahlen auf verschiedenartige Substanzen. Aus diesem Grunde könnte man auf alle Fälle nicht vernünftigermassen die wesentlichen, ein Kurzwellenteleoskop bestimmenden Parameter aufzeigen und dessen Leistungsfähigkeit berechnen. Hier muss also noch Vorarbeit geleistet werden. Andererseits können im Prinzip die physikalisch-chemischen Wirkungen des sichtbaren Lichtes als bekannt angesehen werden. Wir beschränken uns hier deshalb auf die Frage nach der Totalität aller Teleskope, welche sichtbares Licht auffangen.

Die Gesamtheit aller Teleskope muss zuerst in einem sogenannten *morphologischen Kasten* geordnet werden. Dieser Kasten ist ein vieldimensionales Gebilde, dessen verschiedene Dimensionen von den das Problem bestimmenden Parametern aufgespannt werden. Jeder Parameter kann im allgemeinen eine diskrete Zahl von verschiedenen Qualitätswerten annehmen. *Der morphologische Kasten ist dann vollkommen, wenn in jedem seiner „Schubfächer“ ein oder kein Teleskop sitzt.* Solange mehrere Lösungen auf ein Fach fallen,

²⁾ Siehe auch F. ZWICKY, The Observatory, **68**, 121 (1948) und Physikalische Blätter **5**, 4 (1949).

sind eben noch nicht alle wesentlichen Parameter aufgezeigt, und es müssen weitere Bestimmungsstücke eingeführt werden. Die wesentlichen Bestimmungsstücke eines Teleskops, wie wir es definiert haben, sind etwa die folgenden.

A = die Natur der Apertur, welche das Licht auffängt.

B = die Art der Transformationen, denen das Licht im Gerät auf dem Weg von der Apertur zur endgültigen Aufzeichnungsstelle unterworfen wird.

C = die Natur der Aufzeichnungsstelle.

D = die Art der Bewegung, die das Teleskop während der Aufzeichnung oder Beobachtungsperiode relativ zum Objekt ausführt.

E = der Standort des Teleskops.

Wir betrachten die Parameter A , B , C usw. als Matrizen mit respektive n_A , n_B , n_C usw. Elementen, die einen morphologischen Kasten mit $n = n_A \times n_B \times n_C \dots$ Schubfächern aufspannen, in jedem von welchen ein Grundtyp eines *einfachen* Teleskops sitzt. Kombinationsteleskope sind dann solche mit nicht einwertigen, sondern mehrwertigen Elementen der Parametermatrizen A , B , $C \dots$. Zum Beispiel ist ein Teleskop mit Linse und vorgesetztem Objektivprisma ein Kombinationsteleskop mit einem zweiwertigen Parameter A_{ik} (Linse plus Prisma). Die Zahl der Kombinationsteleskope steigt mit dem Rang (Mehrwertigkeit) der entsprechenden Parametermatrizen ins Ungeheure, und wir geben uns deshalb vorläufig nur mit den einfachen Teleskopen ab. Aber auch hier müssen wir uns noch Beschränkungen auferlegen, falls wir uns einen endlichen und einigermaßen durchsichtigen morphologischen Kasten konstruieren wollen. Es bestehen nämlich folgende zwei Schwierigkeiten. Einmal besitzen gewisse der in Frage stehenden Parametermatrizen unendlich viele Elemente. Zum Beispiel kann der Ortsparameter E kontinuierlich variierende Werte annehmen. Der Einfachheit halber schreibt man ihm daher zuerst nur etwa zwei Elemente E_1 und E_2 zu, wobei E_1 = Punkt auf der Erdoberfläche und E_2 = Punkt ausserhalb der Erdatmosphäre bedeutet. Der letztere ist etwa durch ein raketengetragenes Teleskop erreichbar. Die zweite Schwierigkeit besteht darin, dass gewisse fundamentale Phänomene, welche die Funktionen eines gegebenen Teleskops bestimmen, eventuell gar noch nicht bekannt sind. In diesem Falle muss man sich damit begnügen, eine gewisse Anzahl von neuen Teleskopen rein prophetisch und schematisch einzuführen. Auf einen der wesentlichsten Schritte der morphologischen Analyse, das heisst auf die Bestimmung der Leistungsfähigkeit aller Teleskope im morphologischen Kasten

muss in diesem Falle wenigstens teilweise verzichtet werden. Diese Leistungsbestimmung ist überhaupt der schwierigste Punkt der ganzen Analyse. Falls nicht eine Universalformel für die Leistung gefunden werden kann, steht man jedenfalls vor einer äusserst langwierigen Angelegenheit. Im Fall der Strahltriebwerke gelang es, durch Aufstellung einer universellen Schubformel die Leistungsbewertung aller in Frage kommenden einfachen Maschinen in kürzester Zeit zu erledigen³⁾. Bei den Teleskopen ist es dem Verfasser vorläufig noch nicht gelungen einen ähnlichen durchschlagenden Erfolg zu erzielen. Es muss daher zuerst in Neuland vorgetastet werden, indem wir einige individuelle Vorstösse in bezug auf die Leistungsfähigkeit verschiedener Teleskope machen. Dabei sollen nur die Parameter A = Apertur und D = Bewegung ins Spiel gesetzt werden.

Wir betrachten vorerst die möglichen *Relativbewegungen eines Teleskops zum Gegenstand*. Solche Bewegungen sind zwar in einigen Sonderfällen schon von anderen Forschern ausgenutzt, im allgemeinen aber schändlich vernachlässigt worden. Es stellt sich nämlich heraus, dass bei einer einzigen Aufnahme, mit bewegtem Teleskop, bei Punkt- und Linienbildern ebensoviel und oft mehr herauszubringen ist als mit Kinematographie.

Die Relativbewegung des Teleskops zum Objekt kann durch irgendeine Funktion der Zeit $D(t)$ beschrieben werden, wobei D die Amplitude der Achse des Teleskops oder die Lage des „Plattenhalters“ darstellt.

Ruhe, das heisst

$$D = D_0 = \text{Konstante} \quad (1)$$

liefert die bekannten Resultate, nämlich relative Lage und Leuchtkraft der Objekte, erlaubt aber keine Aussagen über Veränderungen derselben, ausser wenn wiederholt (Kinematographie).

Gleichförmige Bewegung, das heisst

$$D = D_0 + V_0 t \quad (2)$$

gibt zusätzlich Auskunft über Geschehnisse der folgenden Art:

a) Variabilität des Standortes des Objektes; quantitative Geschwindigkeitsmessungen sind aber nur möglich, wenn eine absolute Beziehungslinie zur Verfügung steht. Zum Beispiel erscheint ein mit gleichförmiger Geschwindigkeit fliegender Meteor wieder als gerade Linie auf der photographischen Platte, und eine Geschwindigkeitsmessung ist nicht möglich. Dagegen ergibt ein wegen Luftwider-

³⁾ F. ZWICKY, *Helvetica Physica Acta* **21**, 299 (1948).

standes wesentlich verzögerter Meteor eine gekrümmte Linie. Beschleunigung oder Verzögerung eines auf einer Geraden fliegenden Objektes werden deshalb durch die gleichförmige Bewegung des Teleskops sichtbar gemacht.

b) Die Variabilität der Helligkeit des Objektes, eines Sterns zum Beispiel, wird im Prinzip sichtbar, auf einer photographischen Platte praktisch aber nur dann, falls die Periode τ so gross ist, dass

$$\tau V_0 > \delta \quad (3)$$

wobei $\delta \sim 10^{-3}$ cm von der Grössenordnung des Auflösungsvermögens der gebrauchten Emulsion ist. Photozellen und andere Aufzeichnungsapparate mit anderen Werten von δ erlauben die Beobachtung entsprechend verschiedener Perioden τ . Auf alle Fälle lässt sich V_0 immer so wählen, dass ein grosser Bereich von Werten von τ der Beobachtung zugänglich gemacht wird. Es ist somit ohne Zweifel noch sehr viel über regelmässige und unregelmässige Veränderliche zu lernen, falls mit bewegten Teleskopen gearbeitet wird.

c) Die gleichförmige Bewegung trennt die Spuren von verschiedenen Projektilen, die auf der gleichen Bahn fliegen. Es kommt zum Beispiel vor, dass Steuerelemente von Raketen, wie die Graphitrunder beim V-2 sich von einer Rakete loslösen und mit wenig Geschwindigkeitsverlust etwas hinter der Rakete auf wesentlich der gleichen Flugbahn fliegen. Dasselbe kommt bei natürlichen und künstlichen Meteoriten vor, wobei auf einer „ruhenden“ Aufnahme alle Teilchen zur selben Linie auf der Photographie beitragen, so dass auf die Zahl der Teilchen nichts geschlossen werden kann. Ausserordentlich aufschlussreiche Aufnahmen resultieren in diesen Fällen im bewegten Teleskop, durch welches die Bahnen der hintereinander fliegenden Partikel getrennt werden.

Die drei Effekte a), b) und c) können in Kombination benutzt werden, wenn es sich um eine Auswertung der Szintillation der Sterne und um die Auswertung der Konvektion und Turbulenz verschiedener Schichten der Erdatmosphäre handelt. Diese Szintillation besteht in einer momentanen Verschiebung des Sternbildes; oder dasselbe kann auch in mehrere Punkte aufgespalten oder einfach in eine diffuse Scheibe aufgeblasen werden. In allen drei Fällen erscheint bei Ruhaufnahmen auf der Platte einfach ein vergrössertes Bild. Im bewegten Teleskop verursachen die drei eben genannten Phänomene die in der Skizze der Figur 1 mit 1, 2 und 3 bezeichneten Effekte.

Apertur A und Geschwindigkeit V_0 müssen dabei richtig gewählt werden. Wenn A grösser ist als der Durchschnitt der die Szintillation erzeugenden Luftwirbel resultiert eine Überlagerung mehrerer Elementarkurven vom Typus der in Figur 1 gezeichneten, und die Einzeleffekte sind nicht mehr deutlich voneinander zu trennen. Änderung der Apertur erlaubt also wichtige Rückschlüsse auf das Wirbelspektrum der Atmosphäre.

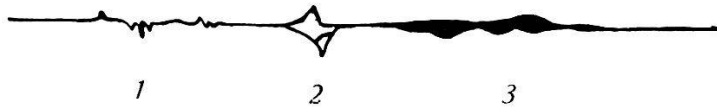


Fig. 1.

Szintillation eines Sterns im gleichförmig bewegten Teleskop.

Ganz besonders interessante Ergebnisse sind zu erwarten, falls die Linie der Figur 1 auch noch spektral zerlegt wird. Überdeckung verschiedener Spektralbereiche kann dabei durch Einschalten von Filtern vermieden werden. Besser noch ist die Beobachtung mit Hilfe einer linienhaft emittierenden Nova oder eines nur Emissionslinien aufweisenden und wesentlich punktförmigen Gasnebels.

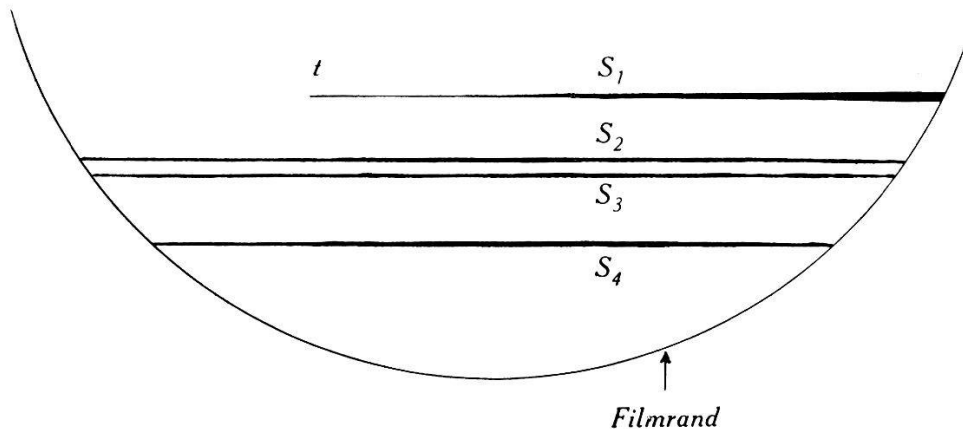


Fig. 2.

Objektivprismaspektrum eines Meteors.

Was Kreisbewegung eines Teleskops liefern kann, sei hier nicht besonders diskutiert. Dagegen sind die einfache Schwingung plus Translation, d. h.

$$D = D_0 \sin \omega t + V_0 t \quad (4)$$

und die gedämpfte Schwingung plus Translation

$$D = D_0 e^{-\alpha t} \sin \omega t + V_0 t \quad (5)$$

besonders wichtig.

Die Bewegung (4) erlaubt bei einem bewegten Objekt wie einem Meteor eine unmittelbare Bestimmung der Geschwindigkeit, und (5) gibt unter allen Umständen die Richtung derselben. In beiden Fällen erscheinen die Bahnen sich folgender Teilchen, wie etwa bei verdampfenden und berstenden Meteoren, getrennt. Spektrale Zerlegung wird in diesem Falle vorteilhafterweise durch Objektivprisma oder Objektivgitter erreicht, indem zur Beobachtung langer Spuren Weitwinkelteleskope unerlässlich sind. Im ruhenden Teleskop mit Objektivprisma photographiert man bei Meteoren etwa Spuren der in Figur 2 angedeuteten Art.

Eine solche Spur ist immer in verschiedene Emissionslinien von Eisen und anderen Elementen aufgelöst und zeigt oft die pulsierende Abdampfung derselben vom sich erhitzenden Meteor. Weiter kommt gelegentlich eine Linie, in der Zeichnung ist es s_1 , erst später auf Intensität als s_2 , s_3 , s_4 usw., was verzögerte Abdampfung des entsprechenden chemischen Elementes bedeuten mag. Dabei ist aber zum Beispiel nicht sicher, dass zur Zeit t zu welcher der Meteor den Punkt P erreichte, wirklich auch das Licht der Spektrallinie s_1 zuerst ausgestrahlt wurde. Die Lebensdauer des angeregten Atoms oder Moleküls kann nämlich zu einer Relaxationszeit Anlass geben. Ein solcher Effekt, wie auch die Abklingung der Strahlung würden im schwingenden Teleskop als eine seitliche Verschiebung, respektive Verbreiterung der Emissionslinien sichtbar, so dass besonders mit künstlichen Meteoren verschiedenster Zusammensetzung viele neuartige Phänomene der Beobachtung zugänglich gemacht werden.

3. Die Morphologie des Fluges.

In der klassischen Mechanik handelt es sich meistens um die Bewegung unveränderlicher Körper entweder im leeren Raum oder durch Luft und Wasser, wobei weder die physikalisch-chemischen Eigenschaften des Geschosses noch diejenigen des Mediums durch die Bewegung verändert werden. Bei den im vorigen erwähnten natürlichen und künstlichen Meteoren liegen aber die Verhältnisse ganz anders. Die Meteore selbst erhitzen sich, schmelzen, verdampfen, oxidieren und ändern während des Fluges ihre Gestalt und Masse.

Wir schlagen vor, die Bewegung eines Körpers, der seine physikalisch-chemische Identität verändert, als *Ultraflug* zu bezeichnen.

Mit dem Einschluss des Ultrafluges wird die Mannigfaltigkeit der Bewegungen ausserordentlich bereichert, auch wenn wir uns auf einfachste Körper beschränken und den Flug von komplizierteren mechanischen Systemen weglassen.

Die Morphologie des Fluges einfachster Körper hat sich etwa mit dem folgenden charakteristischen Matrizenschema zu beschäftigen.

A = Geometriematrize des Projektils, wobei als deren Elemente

$$(A_1, A_2, A_3, \dots, A_a)$$

eine Zahl typischer geometrischer Anfangsformen des fliegenden Körpers gewählt werden können.

B = Materiematrize des Projektils, welche mindestens die Elemente

$$(B_1, B_2, B_3)$$

enthält, die den festen, flüssigen und gasförmigen Zustand der Materie bezeichnen. Beim Ultraflug ist es natürlich wesentlich, dass die Elemente B_k weiter präzisiert werden, insbesondere durch Angabe der vorliegenden chemischen Zusammensetzung.

Als dritte Matrize muss das Medium eingeführt werden, in dem die Bewegung stattfindet. Diese Matrize C hat die Elemente

$$(C_1, C_2, C_3, \dots, C_c)$$

die etwa respektive für Vakuum, Vakuum plus elektromagnetische oder korpuskulare Strahlung, Gas, Flüssigkeit und Festkörper bezeichnend sind. Dabei müssen die Elemente C mindestens in eine Anzahl typischer Unterfälle zerlegt werden. So ist zum Beispiel bei einem Gas als Medium wesentlich, ob der bewegte Körper grösser oder kleiner ist als die freie Weglänge (Boltzmann'sche oder Smoluchowski's Statistik).

Jede Kombination (A_k, B_l, C_m) dreier beliebiger Elemente der Matrizen A, B und C ergibt eine Serie typischer Bewegungszustände, die als Funktion der Vorwärtsgeschwindigkeit untersucht werden müssen. Dabei können in gewissen Fällen noch das äussere elektromagnetische Feld und das Schwerfeld als unabhängige bestimmende Veränderliche hinzukommen.

Im „morphologischen Kasten“ $[A, B, C]$ ist eine sehr grosse Anzahl von Bewegungszuständen schematisch dargestellt, von denen nur wenige in allen Einzelheiten untersucht worden sind. Eine geistige Wanderung durch den morphologischen Kasten der Bewegungen sollte deshalb für diejenigen Forscher fruchtbar sein, die auf der Suche nach neuen Problemen der physikalischen Mechanik sind.

Steht zum Beispiel das Element A_1 der Matrize A für „Kugel“, dann bedeutet die Kombination $A_1 B_1 C_k$ den Flug einer festen Kugel durch ein beliebiges Medium k . Systematisch vorgehend,

kann man mit k die ganze Stufenleiter vom Vakuum bis zum dichtesten Körper durchlaufen. Unter den Erscheinungen, denen man dabei begegnet, mögen etwa die folgenden erwähnt werden.

$A_1 B_1 C_1$ = Flug der festen Kugel durch den leeren Raum. Die Bahn und der zeitliche Ablauf der Bewegung sind durch die klassische oder eventuell die relativistische Mechanik bestimmt.

$A_i B_1 C_2$ = Flug eines festen Körpers durch einen strahlungserfüllten Raum. Das „Geschoss“ kann sich dabei asymmetrisch erhitzen, es kann sich aufladen, und es kann schmelzen oder verdampfen. Die Vorgänge an kolloidalen Teilchen in Strahlungsfeldern, einschliessend die Brown'sche Bewegung, sind nur teilweise untersucht. Jedenfalls sind sie von Wichtigkeit in der Astronomie, wo sie besonders für die Theorie der Staubwolken, die sich um einzelne Sterne sowie um Sternschwärme lagern, eine Rolle spielen.

$A_i B_i C_3$ = Flug eines festen Körpers durch einen mit Korpuskularstrahlung erfüllten Raum. Diese Strahlung kann sich aus Elementarteilchen, wie aus Atomen, Ionen und Molekülen zusammensetzen. Bei Zerstäubung von festen Stoffen in Entladungsröhren, bei der Bewegung von Meteoriten in höchsten Schichten der Erdatmosphäre und durch die Korona der Sonne ergeben sich dabei interessanteste Erscheinungen. Wenn wie das gewöhnlich der Fall sein wird, der Raum im Durchschnitt elektrisch neutral ist, die positiven und negativen Teilchen aber nicht die gleiche Geschwindigkeitsverteilung besitzen (Elektronen und die leichteren Teilchen werden im allgemeinen die schnellsten sein) resultiert notwendigerweise eine elektrische Aufladung der festen Teilchen und die Bildung von Langmuir'schen Ionen Plasmas um dieselben. An der Oberfläche von Sonden in elektrischen Entladungen sind solche Plasmaformationen direkt beobachtet und untersucht worden. Aber auch die Staubteilchen im interstellaren Raum, sowie grössere Körper wie die Sterne und die Planeten müssen sich aufladen und mit Plasmas umgeben, in denen das Auftreten von bedeutenden elektrischen Potentialdifferenzen zu erwarten ist. Die Versuche mit künstlichen von der Erde abgeworfenen Meteoriten zielen gerade darauf hin, diese Frage wenigstens für die Erde und den Mond aufzuklären.

$A_i B_i C_4$ = Flug eines festen Körpers durch ein Gas. Hier treten gleichzeitig zwei Arten von Effekten auf. Einmal werden durch die Bewegung des Projektils die verschiedenen Teile des Gases in Bewegungen versetzt, die als ideale, laminare und turbulente Strömungen, sowie als stosswellenartige Vorgänge wesentlich durch die jeweiligen Werte der Reynolds'schen Zahl $R = D u \rho / \mu$ und der Mach'schen Zahl $M = u/c$ bestimmt sind, wobei D und u die Grösse

und die Geschwindigkeit des festen Körpers bezeichnen, während ρ , μ und c die Dichte, der Reibungskoeffizient und die Schallgeschwindigkeit des Mediums bedeuten. Im Gebiet dieser Strömungsvorgänge ist ungeheure Arbeit geleistet worden. Dagegen sind die damit untrennbar verbundenen Eigenschaften des Ultrafluges fast gar nicht untersucht worden. Da die Reibungsleistung $L = W u$ (W = Widerstand) in Wärme, plastische Deformation, Verschleiss und Aufheizen des fliegenden Körpers sowie Aufheizen, Anregung, Dissoziation und Ionisation des Gases, wie auch allgemeiner Abstrahlung aufgebraucht wird, stehen wir hier einem grossen Komplex von Erscheinungen gegenüber, der in seinen Elementen vorteilhaft an natürlichen und künstlichen Meteoren untersucht werden kann.

Die propulsive Leistung L muss natürlich auch bei kleinsten Geschwindigkeiten, falls diese konstant ist, als Wärme abgeführt werden, teilweise etwa durch das Übergangsstadium der turbulenten Bewegung. Das gibt aber anfänglich zu keinen wesentlichen inneren Veränderungen der betrachteten Materie Anlass. Bei grösseren Geschwindigkeiten, die umso geringer sein können, je kleiner die Wärmekapazität, die Schmelzwärme, die Verdampfungswärme usw., setzen bleibende Veränderungen ein. Bei schnell fliegenden Raketen ergeben sich daraus bereits ernsthafte Probleme bezüglich der Festigkeit der Geräte, auch wenn diese im ungeheizten Zustande aerodynamisch stark genug sind. Die beim Zurücktauchen der V-2 beobachteten „Luftzerleger“ liefern ein Beispiel.

Bei Teilchen aus Eisen und Geschwindigkeiten von einigen Kilometern pro Sekunde tritt Schmelzen, Verdampfen und Verbrennung ein. Je nach der Beschaffenheit der Geschosse beginnt der Ultraflug, das heisst die physikalisch-chemische Veränderung früher oder später. Die charakteristische kritische Geschwindigkeit ist zum Beispiel relativ klein bei Blei, das niedrigen Schmelzpunkt mit kleiner spezifischer Wärme verbindet. Andererseits können bleibende Veränderungen am fliegenden Teilchen auch dann früh einsetzen, wenn seine Oxydierbarkeit trotz hohen Schmelz- und Siedepunktes gross ist. Die resultierenden Vorgänge sind fast immer periodisch, da Erhitzung durch Reibung, Schmelzen, Verdampfen und zeitweilige Abkühlung wiederholt aufeinanderfolgen.

Bei schnellen, natürlichen Meteoren wird gewöhnlich nur eine halbe Periode photographiert, die etwa der Strecke vom Eintauchen bis zum Austritt aus der Atmosphäre entspricht. Bei Meteoren mittlerer Geschwindigkeit sind oft drei bis vier Perioden beobachtbar. Nur bei den langsamsten Meteoren kommen bis Dutzende von Pulsationen auf die in der Erdatmosphäre liegende Bahn. Bei künst-

lichen Meteoren sind alle diese Erscheinungen viel leichter zu beobachten, da die Geschwindigkeiten kleiner sind und man das Material derselben sowie die Höhe in der man sie abschießt und damit die Luftdichte nach Belieben variieren kann. Die Pulsationseffekte sind besonders deutlich am Ende der Spuren der mit Hilfe von Hohlladungen beschleunigten festen Teilchen zu beobachten⁴).

Zusätzlich zu den Vorgängen im „Geschoss“ kann auch das umliegende Medium wesentliche Veränderungen erfahren. Einmal werden die verschiedenen Freiheitsgrade der Gasmoleküle angeregt, und zwar kann das sehr ungleichmässig geschehen, indem deren Translation, Rotation oder inneren Schwingungen einzeln auf „hohe Temperatur“ kommen und erst später Gleichverteilung der Energie über verschiedene Freiheitsgrade zustande kommt. Weiter können die Moleküle dissoziiert, oder deren Elektronen in höhere Anregungszustände versetzt und zur Abstrahlung von spezifischen Emissionslinien angeregt werden. Wenn es sich um Moleküle von der Grössenordnung 10^{-22} Gramm handelt, genügt eine Relativgeschwindigkeit von einigen Kilometern pro Sekunde, um eine relative kinetische Energie von der Grössenordnung 10^{-11} erg, das heisst einiger Elektronenvolt zu erzeugen, was zur Dissoziation von vielen Gasen und zur Abstrahlung von Emissionslinien im Bereich des sichtbaren Lichtes genügt.

Die im vorigen besprochenen Erscheinungen werden aber noch dadurch ausserordentlich kompliziert, dass neben der Relativgeschwindigkeit der aufprallenden Moleküle zum fliegenden Teilchen, das letztere infolge seiner Vorgeschichte schon stark aufgeheizt ist und deswegen schon an sich imstande ist oder wenigstens mithilft, die umliegenden Moleküle des Aussenmediums anzuregen oder zu dissoziieren.

Die eben besprochenen Fälle von Ultraflug gehören trotz ihrer Kompliziertheit noch zu den einfachsten. Alle schematischen Kombinationen, welche die Matrizenelemente B_2 , B_3 enthalten, das ist, sich auf flüssige und gasförmige Projektile beziehen, führen zu äusserst verwickelten Verhältnissen. Die ersteren sind etwa bei Zerstäubungen aller Art und bei Einspritzen von Brenn- und Triebstoffen in Motoren verschiedenster Konstruktion von Wichtigkeit, während gasförmige Projektile als Gasstrahlen bei allerlei Auspuffen auftreten und besonders in der Astrophysik eine grosse Rolle spielen.

Andererseits kann der morphologische Bewegungstypus die Elemente C_5 und C_6 enthalten, was den Flug durch ein flüssiges oder festes Medium darstellt. Die Mechanik und die Physik des Fluges

⁴) The Scientific Monthly **56**, 10 (1948), Photographien von Dr. POULTER.

von gasförmigen, flüssigen und festen Projektilen durch ein festes Medium, zum Beispiel einen Einkristall, gehört zweifellos zu den verwickeltsten Problemen der exakten Wissenschaften. Bevor man daran gehen kann, die Gesetze solcher Bewegungen zu untersuchen, müssen auf alle Fälle zuerst die Gesetze der plastischen Verformung und insbesondere der *plastischen Wellen* experimentell erforscht werden⁵⁾.

4. Schlussbemerkungen.

Aus dem Vorhergehenden ist es klar, dass die morphologische Analyse grösserer Probleme schon an sich beträchtliche Ausmasse annehmen kann. Das entsprechende Studium der Strahltriebwerke und deren Leistungsbewertung erforderte die Zeit mehrerer Forscher während eines halben Jahrzehnts. Der Zeitbedarf für die Konstruktion der tatsächlichen Prototypen kann auf zwanzig Jahre geschätzt werden. Wenn es sich um mehrere Probleme handelt, kann ein einzelner Forscher nur in grossen Zügen skizzieren, wie man bei der morphologischen Analyse vorgehen muss. Dies hoffen wir für die möglichen Typen von Teleskopen und die Typen von Bewegungen einfacher Körper getan zu haben.

Es verbleibt noch, auf einige Probleme hinzuweisen, deren prinzipielle Lösung sicher durch morphologisches Denken bedeutend gefördert werden kann. Einige dieser Probleme sind die folgenden.

α) Die Morphologie der chemischen Triebstoffe für alle Arten von Strahltriebwerken, einschliessend Vakuumraketen, Aeromaschinen, Hydromaschinen und Terramaschinen.

β) Die Umgrenzung und Erforschung der *Metachemie*. Der Verfasser schlägt diese Bezeichnung vor als Sammelbegriff für Probleme, die sich auf die *Stabilisierung von langlebigen angeregten Atomen und Molekülen in makroskopischer Dichte und Menge* beziehen. Verbindungen, die in der gewöhnlichen Chemie keinen Platz haben, wie solche der Edelgase gehören ebenfalls hierher. Weiter beschäftigt sich die Metachemie mit der Stabilisierung von einatomigem Wasserstoff, mit einer möglichen Neutronensubstanz und mit unterkühlten Gasen und Flüssigkeiten, die bei geeigneter Anregung, zum Beispiel bei Keimbildung, explosiv kondensieren.

Es sei nur angedeutet, dass Metachemie in folgenden Gebieten eine grosse Rolle zu spielen verspricht.

⁵⁾ Siehe TH. VON KÁRMÁN und P. DUWEZ, Internationaler Kongress für angewandte Mechanik, Paris 1946; P. DUWEZ and D. S. CLARK, Proceedings American Society for Testing Materials **47**, 502 (1947).

a) Schaffung von Triebstoffen, die an Energie pro Massen- und Volumeneinheit bis zum hundertfachen der gewöhnlichen Triebstoffe enthalten.

b) Zur Herstellung von hochwertigen Akkumulatoren.

c) Zur Ausnützung der Sonnenstrahlung.

d) Als Zwischenstufe, zur Ausnützung von Kernenergie in stationären Kraftmaschinen und bei Translationsantrieben.

e) Die Morphologie von Signalapparaten.

f) Die Morphologie der Kraftanlagen beruhend auf Kernenergie.

Hier ist besonders die Analyse aller prinzipiellen Möglichkeiten der Zündung von Kernfusionen von grösster Bedeutung. Leider sind auf diesem Gebiete höchst unerwartete und unangenehme Überraschungen nicht ausgeschlossen.

g) Die Akzeleratoren für Elementarteilchen.

Dies ist ein typisches Gebiet, auf welchem man planlos von Erfindung zu Erfindung schreitet. Anbetracht der ungeheuren Ausgaben für Zyklotronen, Betatronen und dergleichen wäre vielleicht eine morphologische Analyse von erheblichem Wert.

h) Die Morphologie der Fundamentalgesetze.

Infolge vieler missglückter Versuche von Philosophen, Physikern und Astronomen, die Natur der physikalischen Gesetze und den Charakter der Grundelemente der Materie a priori zu ergründen und eventuell Voraussagen zu machen, ist dieser Umkreis der Metaphysik arg verschrien. Es kann aber kaum schaden etwas tiefer zu schürfen, als das in der Vergangenheit geschehen ist und das vorliegende Problem vom Gesichtspunkte aller Zeichen (Signale) und Operationen zu untersuchen, die für die Übermittlung aller mitteilbaren Wahrheiten benutzt werden und notwendigerweise benutzt werden müssen. Solcher Signale gibt es nur eine relative kleine Anzahl. Ihre Morphologie sollte deshalb nicht allzu schwer zu ergründen sein und sollte zwangsläufig gewisse Aussagen über mögliche Formulierungen physikalischer Gesetze erlauben. Dieser Weg der Analyse der Grundelemente mitteilbarer Wahrheiten ist meines Wissens noch nie beschrritten worden. Einige tastende Versuche scheinen auf wichtigstes Neuland hinzuweisen, in welchem besonders die *Unerschöpflichkeit* der mitteilbaren Wahrheiten ins Auge springt. Diese Unerschöpflichkeit bedeutet, dass wir jeder in endlichen Ausdrücken formulierten Wahrheit im besten Falle nur einen Näherungswert zuschreiben dürfen. Von einem absoluten Wert solcher Wahrheiten zu sprechen ist wenig sinnvoll. Die Konsequenzen dieser Schlussfolgerung, falls richtig, sind nichts weniger als verheerend. Zum Beispiel folgt, dass die Unsicherheitsbeziehungen der

Quantenmechanik *nicht unsicher genug* sind, indem bei absoluter Konstanz der Planck'schen Konstanten h die absolute Aussage gemacht wird, dass das Produkt der Unsicherheiten einer Koordinate und dem assoziierten Impuls nicht kleiner sein kann als h . Das Prinzip des Näherungscharakters der wissenschaftlichen Wahrheiten verlangt, dass die Unsicherheitsrelationen noch unsicherer gemacht werden, was etwa durch das Fallenlassen der absoluten Konstanz des Wirkungsquantums h geschehen kann. Paradoxerweise führt gerade diese grössere Unsicherheit dazu, dass es unter Umständen wieder möglich wird, gleichzeitig genaue Lage und Impuls von Elementarteilchen zu messen. Im allgemeinen wird allerdings das Eintreffen einer solchen Messung nicht vorauszusagen sein. Erst nach der Messung wird es sich gelegentlich zeigen, dass man beide Variable genau gemessen hat.

Die morphologische Analyse gibt auch Fingerzeige dafür, bei welcher Art von neuen Experimenten es gelingen sollte, den Charakter der hier vorausgesagten grösseren Unsicherheit der Unsicherheitsrelationen qualitativ und quantitativ zu fassen.

Pasadena, den 15. Oktober 1949.
