



**Inhaltsverzeichnis:** F. Bošnjacovic: Güte von Wärmanlagen und die Leistungsregeln, S. 439 / Kurt Trachte: Wirkungsgrade des modernen Flugmotors, S. 445 / Prof. Dr. O. Scherzer: Elektronenoptik, S. 454 / Dr. Otto Dorner: Geschlecht und Geschlechtsbestimmung im Pflanzen- und Tierreich, S. 457.

## Güte von Wärmanlagen und die Leistungsregeln<sup>\*)</sup>

Von F. Bošnjacović, Zagreb

Die Beurteilung der wärmewirtschaftlichen Güte von Wärmanlagen erfolgt im allgemeinen nach dem Anteil, mit dem es gelingt, aufgewendete Energieformen in solche Formen zu verwandeln, die wir als nützlich bezeichnen. So z. B. ist es üblich, den thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftanlage mit dem Verhältnis der gewonnenen Arbeit zu der aufgewendeten Wärme  $Q$  auszudrücken.

$$\eta_{th} = \frac{AL}{Q} \quad (1)$$

Eine Gütebeurteilung nach einem solchen Wirkungsgrad kann nicht allgemein angewendet werden, denn es gibt Wärmanlagen, deren Zweck es nicht ist, Arbeit zu gewinnen, sondern Stoffe umzuwandeln, wie das im Trockner oder in einer beliebigen chemischen Anlage der Fall ist.

### Abwärme kein Maß für die Güte

Der thermische Wirkungsgrad einer guten Wärmekraftanlage erreicht den Wert von 25%, d. h. die zugeführte Wärme wird zu einem Viertel in mechanische Arbeit umgewandelt. Es liegt nahe, den nicht ausgenutzten Rest von 75% als einen Verlust hinzustellen. Dieser Rest wird als Abwärme an die Umgebung abgegeben. Es wäre jedoch verkehrt, diesen unter dem Namen „Abwärmeverlust“ bekannten Energiebetrag als ein Maß der Güte der Wärmanlage zu betrachten, und zwar aus folgenden Gründen. Es gibt Prozesse, die so vollkommen sind, daß sie keiner Verbesserung mehr fähig wären, und die doch eine merkliche Abwärme aufweisen, und andererseits gibt es solche Prozesse, die ihrem Wesen nach verlustreich sind und doch keine Abwärme zeigen. Wir führen zwei kennzeichnende Beispiele an. Es ist bekannt, daß der Carnot-Prozess in bezug auf die Umwandlung von Wärme in Arbeit von keinem anderen Prozess übertroffen werden kann, wenn es sich um die Aufgabe handelt, Arbeit aus zwei Wärmebehältern von unveränderlichen Temperaturen  $T$  und  $T_u$  (Abb. 1) zu gewinnen. Der Carnot-Prozess stellt in diesem Falle einen verlustlosen Kreisprozess dar, der durch keine noch so gewitzte Maßnahme weiter zu verbessern ist. Und doch weist dieser Carnot-Prozess die merkliche Abwärme

$$Q_u = Q \frac{T_u}{T} \quad (2)$$

als „Abwärmeverlust“ auf. Diese Abwärme  $Q_u$  ist genau so eine Naturnotwendigkeit wie die Heizwärme

$Q$ . Die Gewinnung der Arbeit  $AL$  in einem Kreisprozess ist ebensowenig ohne Auftreten dieser Abwärme  $Q_u$ , als auch ohne Verbrauch von Heizwärme  $Q$  zu denken. Demgegenüber ist es zur Genüge bekannt, daß der Drosselvorgang

einen verlustreichen Prozess darstellt. In Abb. 2 ist im  $i$ - $s$ -Diagramm die Abdrosselung des Dampfes vom Zustand 1 bei höheren Druck  $p_1$  auf Zustand 2 bei tieferem Druck  $p_2$  eingezeichnet. Obwohl wir nun beim Drosselvorgang auf eine Arbeitsleistung des Dampfes verzichten mußten, also einen Arbeitsverlust zu buchen haben, so tritt bei diesem verlustreichen Prozess doch keine Abwärme auf. Der Abwärmeverlust kann also nach diesen Darlegungen kein Zeichen für die Güte eines Vorganges sein.

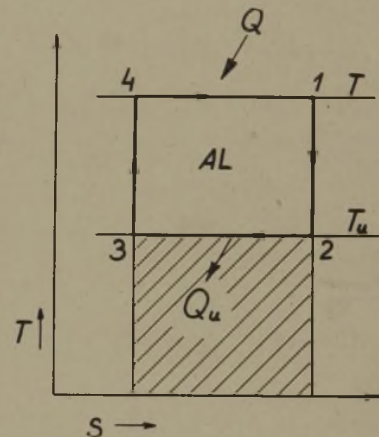


Abb. 1

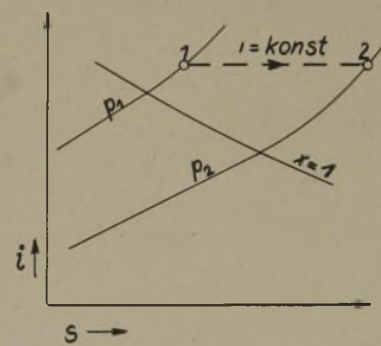


Abb. 2

### Begriffsbestimmung „Verlust“

Obwohl nun das Dargelegte genügt, um den Abwärmeverlust als einen Gütemaßstab abzulehnen, soll noch ein Grund von mehr begrifflicher Natur erwähnt werden. Bei näherer Betrachtung des Abwärmeverlustes sehen wir, daß dieser Energiebetrag nicht verlorengeht, sondern nur an die Umgebung abgegeben und dort aufgespeichert wird, um uns jederzeit wieder zur Verfügung zu stehen, sollten wir ihn jemals wieder gebrauchen. Was bei den Wärmeprozessen verlorengeht, das sind andere Energieformen. So z. B. verschwindet in einer Wärmekraftanlage die Heizwärme,

<sup>\*)</sup> Nach einer Vortragsfolge, gehalten im Hause der Technik (Essen) und Bielefeld, im VDI-Bezirksverein Berlin sowie im Seminar des Lehrstuhls für Thermodynamik der Technischen Hochschule Karlsruhe.



um teilweise in der Energieform der mechanischen oder elektrischen Arbeit und zum Teil in der Energieform der Abwärme wiederzuerscheinen. Es ist einleuchtend, daß es richtiger sein wird, die Verluste in derjenigen Form anzugeben, die wirklich verlorengegangen sind. Das veranlaßt uns zur folgenden Begriffsbestimmung: Als Verlust sollen ausschließlich solche Energiemengen oder Stoffmengen angesprochen werden, die bei einer sinnreicheren Führung des Prozesses bei sonst gleicher Wirkung der Anlage hätten eingespart werden können (oder die bei sonst gleichem Aufwand hätten mehr gewonnen werden können)<sup>1)</sup>. Dies mag an einigen Beispielen erläutert werden (Abb. 3 bis 6).

Die Aufgabe der Wärmekraftanlage in Abb. 3 ist so aufgefaßt, daß aus gegebener Heizwärme  $Q$  möglichst viel mechanische Arbeit gewonnen werden soll. Dann wird die wirklich gewonnene Arbeit  $AL$  geringer als die theoretische  $AL_{th}$  sein,

$$AL = AL_{th} - \Delta AL \quad (3)$$

und zwar ist der Unterschied  $\Delta AL$ . Dieser Verlust an Arbeit stellt hier eine Minderleistung gegenüber dem theoretisch möglichen Fall dar.

In Abb. 4 ist dieselbe Wärmekraftanlage unter dem anderen Gesichtspunkt betrachtet, wonach eine bestimmte Arbeitsmenge  $AL$  geleistet werden soll, unter mindestmöglichem Verbrauch an Heizwärme, bei gegebenem Heizkörper von der Temperatur  $T$  und bei gegebener Umgebungstemperatur  $T_u$ . Für diese Aufgabe wäre im theoretischen Falle die theoretische Heizwärme  $Q_{th}$  aufzuwenden, während in Wirklichkeit die Wärmemenge  $Q$

$$Q = Q_{th} + \Delta Q \quad (4)$$

gebraucht wird. In einem solchen Falle werden wir den Mehrverbrauch an Heizwärme  $\Delta Q$  (Mehraufwand) als Verlust hinstellen, da wir die gestellte Aufgabe, d. h. die Erzeugung des Arbeitsbetrages  $AL$  bei einer sinnreicheren Führung des Prozesses unter Einsparung dieses Mehraufwandes hätten erledigen können.

Wie man aus Beispielen in Abb. 3 und 4 sieht, kann man bei ein und derselben Wärmekraftanlage, je nach der Aufgabenstellung von verschiedenen Energieverlusten sprechen. Dagegen sollte man nicht von Verlusten an Abwärme reden, denn diese geht ja nicht verloren, sondern sie wird nur in der Umgebung aufgespeichert. In Abb. 5 ist eine Kältemaschinenanlage dargestellt. Bei dieser kann man je nach der Aufgabenstellung entweder von einem Mehraufwand an Kompressionsarbeit reden oder aber bei gegebener Kompressionsarbeit von einer Minderleistung an Kälteleistung sprechen. Im zweiten Falle hätte man günstigenfalls eine theoretische Kälteleistung  $Q_0$  gewinnen können, während die wirkliche Kälteleistung um den Betrag  $\Delta Q_0$  kleiner ist.

$$Q_0 = Q_{0th} - \Delta Q_0 \quad (5)$$

In diesem Falle stellt also der Energieverlust eine Minderleistung dar.

In Abb. 6 ist eine Wärmekraftanlage dargestellt, bei der es gar nicht darauf ankommt, Arbeit zu leisten oder zu verbrauchen. Der Zweck dieser Anlage ist, aufzutrocknen, d. h. Stoffänderungen zu veranlassen, was durch Aufwendung von Heizwärme unterstützt werden soll. Zu diesem Zweck wäre die theoretische Heizwärme  $Q_{th}$  erforderlich, während die wirkliche Heizwärme um den Betrag  $\Delta Q$  größer ist. Hier stellt der Energieverlust einen Mehraufwand dar.

Nun könnten wir noch Wärmevergänge anführen, bei denen es gar nicht darauf ankommt, Wärme zu verbrauchen oder zu erzeugen, ebensowenig wie Arbeit zu verbrauchen oder zu erzeugen, wie das z. B. beim Hochofenprozeß der Fall ist, wo aus gegebenen Rohstoffen bestimmte Erzeugnisse hergestellt werden sollen. Bei solchen Vorgängen würde man am zweckmäßigsten nicht von Verlusten an Energie sprechen, sondern von Verlusten in irgendeiner Rohstoffart, z. B. von Verlusten des Brennstoffes oder des Kokes oder des Erzes, die durch die Unvollkommenheit dieser Vorgänge verursacht worden sind. Unsere Betrachtungen erweisen sich auch hier erfolgreich.

### Ursachen der Verluste

Wir stellen nun die wichtige Frage auf: Wodurch entstehen die erwähnten Energieverluste? Diese Frage ist aus zweifachem

Grunde interessant: Wenn die Ursache erkannt wird, ist das Übel leichter zu bekämpfen. Wir erlangen aber darüber hinaus ein Mittel, um die Verluste auch in verwickelten Fällen auf einfache Weise zu ermitteln und so ein Urteil über die Güte der Anlage zu gewinnen. Die ausschließliche Ursache der Energieverluste sind die nichtumkehrbaren (irreversiblen) Vorgänge, wie dies aus den Lehren der klassischen Thermodynamik hervorgeht. Es gibt keinen Energieverlust, der nicht durch nichtumkehrbare Prozesse verursacht worden wäre, und es gibt keinen nichtumkehrbaren Prozeß, der nicht Energieverlust zur Folge hätte.

Es ist vielleicht nützlich, zu erinnern, daß jede Nichtumkehrbarkeit eine Entropieerhöhung  $\Delta S$  zur Folge hat, die durch keine Maßnahme mehr rückgängig gemacht werden kann. Diese Entropiezunahme ist zugleich ein eindeutiges Maß für den verursachten Energieverlust. Man kann diesen

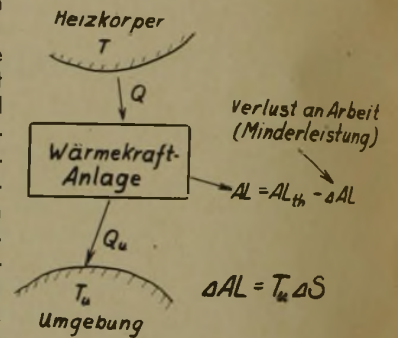


Abb. 3

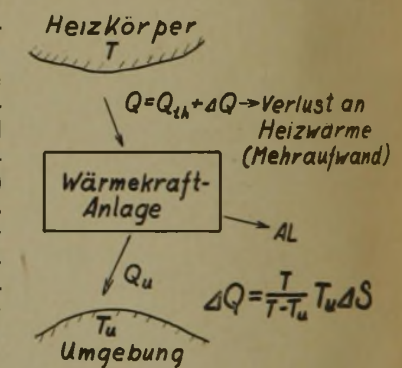


Abb. 4

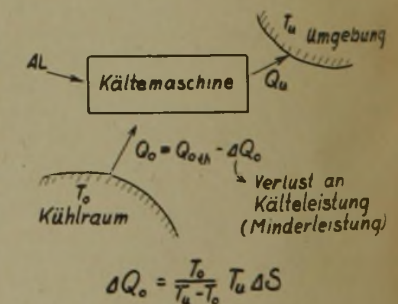


Abb. 5

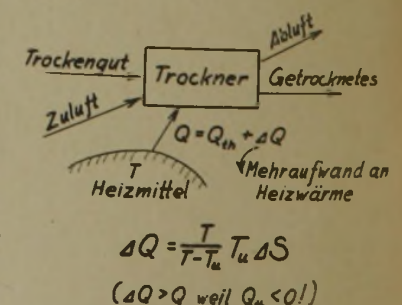


Abb. 6

<sup>1)</sup> Der Austausch mit der Umgebung wird hier nicht als eine „Wirkung“ aufgefaßt. Eine sinnreichere Führung des Prozesses könnte und würde eine Änderung des Austausches mit der Umgebung zur Folge haben.



berechnen, sobald  $\Delta S$  und die Umgebungstemperatur  $T_u$  bekannt sind. Danach ist z. B. der Arbeitsverlust in (3) und Abb. 3

$$\Delta AL = T_u \Delta S \quad (6)$$

Ebenso einfach kann man auch die Verluste irgendeiner Heizwärme oder Kälteleistung ermitteln, wenn nur die Temperaturen, bei denen diese Wärmemengen gedacht sind, bekannt sind<sup>2)</sup>. So ist der Heizwärmeverlust in (4) (Abb. 4)

$$\Delta Q = \frac{T}{T - T_u} T_u \Delta S \quad (7)$$

und der Kälteleistungsverlust in (5) (Abb. 5)

$$\Delta Q_0 = \frac{T_0}{T_u - T_0} T_u \Delta S \quad (8)$$

Zu (7) kommt man z. B. aus (6) durch folgende Überlegung. Hätte ein Energieverlust in der Anlage nicht stattgefunden, so könnte der Arbeitsbetrag  $\Delta AL$  zum Antrieb einer Wärmepumpe, die zwischen der immer zur Verfügung stehenden Umgebungstemperatur  $T_u$  und dem Heizkörper mit der Temperatur  $T$  arbeitet, herangezogen werden. Unter Berücksichtigung des Carnotschen Wirkungsgrades würde eine solche Wärmepumpe dem Heizkörper die Wärmemenge

$$\Delta Q = \frac{T}{T - T_u} \Delta AL \quad (9)$$

liefern, welche mit dem Ausdruck in (7) identisch ist. Um so viel weniger Heizwärme müßte man im verlustlosen Falle zum Betrieb der Wärmeanlage dem Heizkörper entnehmen, und so stellt  $\Delta Q$  tatsächlich den gesuchten Heizwärmeverlust der wirklichen Anlage dar. Eine ganz ähnliche Überlegung führt zu (8).

### Entropiebilanzen

Die Ermittlung des Entropiezuwachses  $\Delta S$  erfolgt einfacher, als man zunächst vermuten sollte<sup>3)</sup>. In Abb. 7 sei irgendein ununterbrochener Wärmevergange schematisch dargestellt. Die betrachtete Anlage kreisen wir

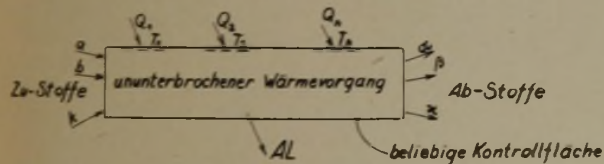


Abb. 7

mit einer gedachten Kontrollfläche so ein, daß wir sämtliche zu- und abgeführten Stoffe und Energiemengen kontrollieren können. Dann werden im allgemeinen der Anlage zugeführt die Stoffe  $a, b, \dots, k$ , und entzogen werden die gleichen oder andere Stoffe  $\alpha, \beta, \dots, x$ . Die Abstoffe werden von den Zustoffen dann verschieden sein, wenn sich auch chemische Prozesse abspielen, so z. B. Verbrennungsvorgänge, chemische Reaktionsprozesse usw. Im allgemeinen mag die Anlage einen Arbeitsbetrag  $AL$  liefern, während ihr verschiedene Wärmemengen  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  zugeführt werden. An den Durchdringungsstellen durch die Kontrollflächen herrschen die Temperaturen  $T_1, T_2, \dots, T_n$ . Entzogene Wärmemengen sind mit negativen Vorzeichen einzusetzen. Für diese ununterbrochen arbeitende Wärmeanlage können wir eine Wärmebilanz aufstellen:

$$J_a + J_b + \dots + J_k + Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = AL + J_\alpha + J_\beta + \dots + J_x \quad (10)$$

<sup>2)</sup> Daraus ergibt sich die Forderung, jeder Wärmemenge  $Q$  stillschweigend auch die Temperatur hinzuzudenken, bei welcher diese Wärme vorkommt.

<sup>3)</sup> Siehe vom Verfasser:

Kampf den Nichtumkehrbarkeiten! (Arch. f. Wärmew.) Bd. 19, 1938, S. 1. Ursachen der Energievergeudung. (Tschedisch) Strojnický Obzor, Prag, Bd. 18, 1938, S. 97.

Hier bedeuten  $J$  Wärmeinhalte der in der Zeiteinheit zugeführten oder entzogenen Stoffe. Aus (10) kann man z. B. die gewonnene Arbeit ermitteln:

$$AL = \sum_a^k J_{\text{ein}} - \sum_\alpha^n J_{\text{aus}} + \sum_1^n Q \quad (11)$$

Genau so wie eine Wärmebilanz können wir nun auch eine Entropiebilanz aufstellen. Bei einem vollkommenen, d. h. umkehrbaren Vorgang dürfte sich die Entropiesumme aller beteiligten Stoffe nicht ändern. Bei einem unvollkommenen Vorgang wird die Entropie der entzogenen Stoffe um  $\Delta S$  größer sein als die Entropiesumme der zugeführten Stoffe, natürlich unter Berücksichtigung der Entropiezunahmen durch Zuführung von Wärmemengen. Es lautet damit die Entropiebilanz:

$$S_a + S_b + \dots + S_k + \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \dots + \frac{Q_n}{T_n} + \Delta S = S_\alpha + S_\beta + \dots + S_x \quad (12)$$

Hier sind  $S$  die Entropien der zugeführten und der entzogenen Stoffe, während die Ausdrücke  $\frac{Q_1}{T_1}, \frac{Q_2}{T_2}, \dots, \frac{Q_n}{T_n}$

die durch Wärmezufuhr bedingten Entropievermehrungen des Gebildes darstellen. Daraus folgt die gesuchte Entropiezunahme  $\Delta S$

$$\Delta S = \sum_\alpha^n S_{\text{aus}} - \sum_a^k S_{\text{ein}} - \sum_1^n \frac{Q}{T} \quad (13)$$

eine Gleichung, die eine Ähnlichkeit mit der aus der Wärmebilanz gewonnenen Gl. (11) aufweist. Die Zahlenwerte der Entropiebeiträge  $S_a, S_b$  usw. muß man auf Grund der bekannten Zustände der Stoffe  $a, b$  usw. ermitteln. Dazu wird man sich der Entropietafeln bedienen, falls solche zugänglich sind, wie z. B. die Wasserdampf tafeln usw., oder aber man wird zu den Gleichungen greifen, die zur Ermittlung der Entropie des betreffenden Stoffes maßgebend sind, wie z. B. bei idealen Gasen usw. Man muß also genau so vorgehen, als wenn man eine Wärmebilanz aufstellt, nur daß man an Stelle der Wärmeinhalte die Werte der Entropien berechnet oder den Tafeln entnimmt. Im Berechnungsgang besteht also zwischen einer Wärmebilanz und einer Entropiebilanz grundsätzlich kein Unterschied, was besonders hervorgehoben werden mag in Anbetracht der Tatsache, daß man in Ingenieurkreisen Rechnungen, in denen die Entropie vorkommt, mit gewissem Mißtrauen begegnet und nach Möglichkeit vermeidet.

### Die Verlustherde

Sobald der nichtumkehrbare Entropiezuwachs in einer Wärmeanlage bekannt ist, kann man sofort die Energieverluste nach (6) bis (8) berechnen, und zwar in derjenigen Energieform, die bei dem betreffenden Wärmevergange besonders interessiert. Die Entropiebilanz setzt uns jedoch auch in die Lage, einen tieferen Einblick in die Vorgänge innerhalb der Wärmeanlage zu gewinnen und diejenigen Anlageteile herauszuschälen, in denen sich besonders verlustreiche Prozesse abspielen. Solche Anlageteile wollen wir als Verlustherde bezeichnen. Zur Ermittlung solcher Verlustherde ist es nur notwendig, die Anlage durch gedachte Kontrollkreise in einzelne Abschnitte zu zerlegen. In Abb. 8 ist die Anlage der Abb. 7 in eine zweckmäßig erscheinende, aber sonst beliebige Anzahl von Teilen zerlegt worden, A, B, C, D, E, F. Jeden dieser Einzelteile kann man nun als eine Anlage für sich betrachten und für diese die Wärmebilanz und die Entropiebilanz aufstellen. Mit den gleichen Betrachtungen wie oben wird man für jeden dieser Einzelteile die Entropiezunahmen  $S_A, S_B, S_C$  usw. ermitteln. Die Summe der Entropiezunahmen in allen



Einzelteilen muß der Zunahme der Entropie  $\Delta S$  der Gesamtanlage gleich sein,

$$\Delta S = \Delta S_A + \Delta S_B + \Delta S_C + \dots \quad (14)$$

Die Anlageteile mit dem größten Entropiezuwachs stellen auch die Stellen der größten Verluste dar, und das sind die Verlustherde. Solche Verlustherde werden am ehesten einer Verbesserung des Prozesses bedürfen. Die Verbesserung von Anlageteilen, in denen die Entropiezunahmen keine nennenswerten Beträge aufweisen, sind in bezug auf die Energiewirtschaft zwecklos, mögen die beabsichtigten Maßnahmen noch so ausgeklügelt erscheinen. Die Verbesserungsmaßnahmen haben vor allen Dingen an den Verlustherden anzusetzen!

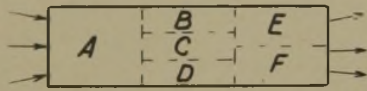


Abb. 8

Die Verbesserung von Anlageteilen, in denen die Entropiezunahmen keine nennenswerten Beträge aufweisen, sind in bezug auf die Energiewirtschaft zwecklos, mögen die beabsichtigten Maßnahmen noch so ausgeklügelt erscheinen. Die Verbesserungsmaßnahmen haben vor allen Dingen an den Verlustherden anzusetzen!

### Die Arbeitsfähigkeit

Wenn auch die Entropiebilanz ein vorzügliches Werkzeug geliefert hat, um die Verlustherde und die Verluste zu ermitteln, so bedürfen wir zur Aufstellung eines Gütemaßstabes einer Wärmeanlage doch noch weiterer Betrachtungen. Die mit Hilfe des Entropiezuwachses ermittelten Energieverluste nach (6) bis (8) geben uns zwar einen Einblick in die absolute Größe der Verluste, wir gewinnen jedoch daraus noch kein Bild über den Anteil dieser Verluste zu den umgesetzten Energiemengen oder einer ähnlichen Größe. Wünschen wir nun eine solche Beziehung in der Art eines Wirkungsgrades, oder richtiger eines Gütegrades aufzustellen, so müssen wir auf die wärmetechnischen Grundbedingungen, unter denen alle technischen Prozesse ablaufen, zurückgreifen.

Durch sein Eingreifen bezweckt der Ingenieur, gewollte technische Umstellungen in der Natur zu erzielen, was nur so erreicht werden kann, daß anderweitig Energieträger zur Hilfe gezogen werden, die die erforderliche Energie liefern. Als Energieträger können wir dabei nicht jeden Stoff schlechthin benennen, der Energie enthält, denn das enthält ein jeder Stoff. Der Energieträger muß vielmehr noch die besonders wichtige Fähigkeit besitzen, durch Wechselwirkung mit seiner Umgebung Energie frei machen zu können. Diese Fähigkeit besitzt aber nur ein solcher Energieträger, der sich noch nicht im Gleichgewicht mit seiner Umgebung befindet. Durch geschicktes Angleichen seines Zustandes mit der Umgebung können wir aus dem Energieträger Energie oder im besonderen eine Arbeit gewinnen. Für die Aufgabe, aus einem Energiebehälter eine größte Arbeitsausbeute zu erhalten, stellt das Überführen des Energieträgers in einen solchen Zustand, in welchem er mit seiner Umgebung in endgültiges Gleichgewicht kommt, die eine notwendige Bedingung dar. Die zweite notwendige und von der vorigen unabhängige Bedingung ist durch die Forderung gegeben, diesen Übergang ganz verlustlos, d. h. umkehrbar zu leiten. Die beiden Bedingungen stellen die notwendige, aber auch hinreichende Voraussetzung für die größtmögliche Arbeitsausbeute dar. Diese wollen wir die „Arbeitsfähigkeit“  $\mathfrak{A}$  kcal nennen.

Kontinuierlichen technischen Prozessen, die bei weitem vorherrschen, werden Stoffe bei unveränderlichen Drücken zugeführt, und die verbrauchten Stoffe müssen aus der Anlage gegen den Umgebungsdruck  $P_u$  entfernt werden (Abb. 9). Wie durch einfache Überlegung gezeigt werden kann<sup>4)</sup>, ist dann die Ar-

beitsfähigkeit des Stoffes vom Zustand 1 gegeben durch die Beziehung

$$\mathfrak{A}_1 = J_1 - J_u - T_u (S_1 - S_u) \quad (15)$$

Hier beziehen sich der Wärmehalt  $J_1$  und die Entropie  $S_1$  auf den gegebenen Anfangszustand 1, während sich die entsprechenden Größen  $J_u, S_u$  auf den Zustand  $M_u$  beziehen, in welchem dieser Stoff im Gleichgewicht mit der Umgebung steht. Wir wollen  $M_u$  als den „Umgebungs Zustand des Stoffes“ bezeichnen.

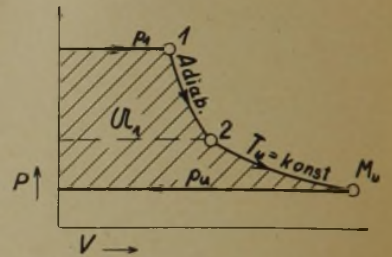


Abb. 9

Man kann auch von der Arbeitsfähigkeit einer Wärmemenge, die bei einer bestimmten Temperatur  $T$  zur Verfügung steht, sprechen. Liefert der Heizkörper von der Temperatur  $T$  eine Wärmemenge  $Q$ , so wissen wir, daß diese Wärmemenge in der Lage ist, z. B. in einem Carnotschen Kreisprozeß, eine Arbeit zu erzeugen, die gleich ist  $Q \frac{T - T_u}{T}$ . Das ist die größtmögliche Arbeit, die diese Wärmemenge herzugeben in der Lage ist. Deswegen nennen wir diesen Arbeitsbetrag die Arbeitsfähigkeit der Wärmemenge  $Q$  bei den Temperaturen  $T$  und  $T_u$ , und es ist

$$\mathfrak{A}_Q = Q \frac{T - T_u}{T} \quad (16)$$

Die Arbeitsfähigkeit eines mechanischen oder elektrischen Arbeitsbetrages ist gleich diesem Arbeitsbetrag

$$\mathfrak{A}_L = AL \quad (17)$$

### Ermittlung der Arbeitsfähigkeit

Nach (15) folgt aus dem is-Diagramm eine überaus einfache Ermittlung der Arbeitsfähigkeit  $\mathfrak{A}_1$  der Mengeneinheit eines Stoffes, dessen Zustand 1 gegeben ist. Man suche im Diagramm den Umgebungs Zustand  $M_u$  des Stoffes auf, d. h. den Zustand, welcher dem Druck und der Temperatur entspricht, mit denen der Stoff in der Umgebung vorkommt. Bei Wasserdampf kann das bei 20° und 1 at nur flüssiges Wasser sein, dessen Zustandspunkt  $M_u$  im is-Diagramm im Flüssigkeitsgebiet liegt, und zwar mit guter Näherung auf der unteren Grenzkurve (Abb. 10). Bei anderen Stoffen liegt dieser Zustand anderswo, so bei Luft auf der Isobare für 1 at bei der Temperatur 20° C weit im überhitzten Gebiet (Abb. 11). Zieht man auf die Isobare im Punkt  $M_u$  eine Tangente, die wir Umgebungsgerade nennen wollen, so ergibt sich die Arbeitsfähigkeit  $\mathfrak{A}_1$  als Strecke auf der Ordinate vom Punkt 1 bis zur Umgebungsgeraden.

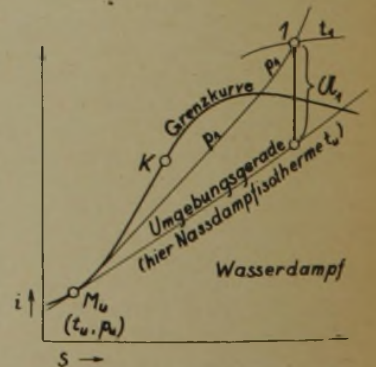


Abb. 10

Ist z. B. der Dampfzustand vor einer Turbine gegeben (Zustand 1), so könnte dieser Dampfstrom im besten Falle eine Arbeit abgeben, die für 1 kg des Dampfes durch  $\mathfrak{a}_1$  im is-Diagramm (Abb. 10) dargestellt ist. Da bei Wasserdampf die Flüssigkeitsisobaren praktisch in die untere

<sup>4)</sup> Bosnjakovic: Technische Thermodynamik I, S. 138.



Grenzkurve fallen, so entspricht die Umgebungsgerade zufällig auch der Naßdampfisotherme mit der Temperatur  $T_u$  der Umgebung. Als Umgebung kann man hier das Kühlwasser des Kondensators auffassen, wenn dieses in großer Menge vorhanden ist. Etwas anders wird das Bild bei einer anderen Aufgabe, z. B. bei der Frage nach der Mindestarbeit, die bei der Verflüssigung der Umgebungsluft zu leisten wäre. Die Abb. 11 gibt das Bild des is-Diagrammes für Luft wieder. Die Aufgabe besteht darin, Luft vom Umgebungszustand  $M_u$  in den flüssigen Zustand 1, bei gleichem Druck  $p_1 = p_u$ , aber bei wesentlich tieferen Temperaturen ( $t_1 = -190^\circ \text{C}$ ) zu überführen. Dazu muß im günstigsten Falle mindestens die Arbeit geleistet werden, die durch die Arbeitsfähigkeit des nun erzeugten Luftzustandes 1 gegeben wird. Die Umgebungsgerade zieht man als Tangente auf die Umgebungsisobare durch den Umgebungspunkt  $M_u$ , worauf man die gesuchte Arbeitsfähigkeit sofort abgreifen kann (Abb. 11). In diesem Falle ist natürlich die Umgebungsgerade keine Naßdampfisotherme, wie das bei Wasserdampf zufällig der Fall war.

Es mag noch ein Beispiel gezeigt werden, das bei Verbrennungsmotoren und anderen Verbrennungsvorgängen interessant sein kann. Die Ausdehnung in einem Verbrennungsmotor wird abgebrochen, bevor der Gegendruck  $p_u$  erreicht wird. Am Ende der Expansion sei der Zustand 1 erreicht worden, bei höherem Druck  $p_1$  und höherer Temperatur  $t_1$  (Abb. 12). Wir fragen nun, welchen Arbeitsverlust wir dadurch verzeichnen, daß diese Gase aus dem Zylinder entweichen, ohne Arbeit zuleisten. Man zieht die Umgebungsgerade im is-Diagramm als Tangente im Umgebungspunkt  $M_u$  auf die Umgebungsisobare  $p_u$ . Dann hat man gleich die Arbeitsfähigkeit des entweichenden Zustandes 1 nach Abb. 12. Das wäre auch der Arbeitsverlust, würde es sich um kontinuierliches Entweichen der Verbrennungsgase mit dem Zustand 1 handeln.

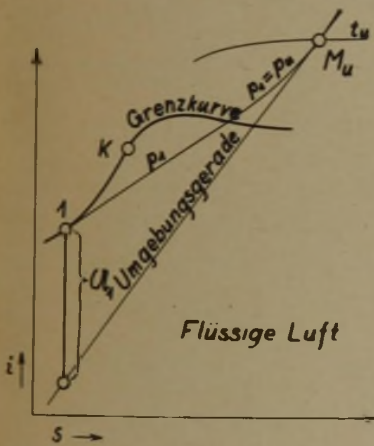


Abb. 11

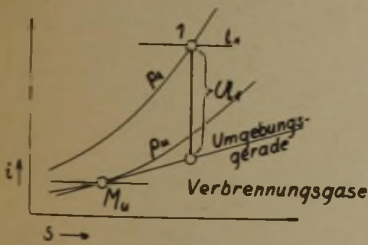


Abb. 12

auf den Umgebungsdruck  $p_u$  abfällt, so muß man noch eine Korrektur anbringen, und es wird der Arbeitsverlust je Mengeneinheit des Gases

$$\Delta AL = a_1 - A(p_1 - p_u)v_1 \quad (18)$$

Das Glied  $A(p_1 - p_u)v_1$  berücksichtigt, daß die Abgase nicht mit dem Zustand 1 kontinuierlich ausgeschoben werden, sondern daß sie bei jedem Arbeitsspiel einmal gegeben sind. Die in (15) für einen kontinuierlichen Vorgang berücksichtigte Ausschubarbeit des Zustandes 1 wird auf diese Weise berichtigt. Bei solchen Überlegungen ist noch Vorsicht insofern ge-

boten, als im Umgebungszustand  $M_u$  ein endgültiges Gleichgewicht mit der Umgebung vorausgesetzt ist. Das setzt z. B. voraus, daß es in den Abgasen keine verbrennlichen Reste mehr gibt, sondern nur die Verbrennungsprodukte  $\text{CO}_2$  und  $\text{H}_2\text{O}$  neben den Resten der Verbrennungsluft  $\text{O}_2$  und  $\text{N}_2$ . Sind am Ende der Expansion im Zustand 1 noch verbrennliche Rückstände enthalten, so muß dieses in  $J_1$  und in  $S_1$  berücksichtigt werden. Das bietet heute keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, nur wird gewöhnlich nicht dasselbe is-Diagramm für Abgase mit nur unverbrennlichen als auch für solche mit auch verbrennlichen Bestandteilen zur Verfügung stehen. Noch einmal: der Zustand  $M_u$  setzt endgültiges Gleichgewicht mit der Umgebung voraus!

### Arbeitsfähigkeit und die Verluste

Die Arbeitsfähigkeit hat nun die kennzeichnende Eigenschaft, daß sie im Verlauf der Prozesse nur abnehmen, oder, bestenfalls, gleichbleiben kann. Bei umkehrbaren Vorgängen bleibt die Arbeitsfähigkeit aller am Vorgang beteiligten Stoffe und Energien insgesamt gleich, während sie bei nichtumkehrbaren Prozessen abnimmt. Es kann leicht gezeigt werden, daß der Verlust an Arbeitsfähigkeit bei solchen nichtumkehrbaren Vorgängen dargestellt wird durch

$$\Delta \mathcal{A} = T_u \Delta S \quad (19)$$

Hier stellt  $\Delta S$  die durch Nichtumkehrbarkeiten hervorgerufene Entropiezunahme dar, die wir ja auf Grund von Entropiebilanzen haben ermitteln können. Es verlohnt sich nun, eine Bilanz der Arbeitsfähigkeiten zu machen, genau so wie wir eine Wärmebilanz und eine Entropiebilanz aufgestellt haben.

In Abb. 7 kommt jedem zugeführten oder entzogenen Stoff, und jeder umgesetzten Energiemenge ein gewisser Betrag an Arbeitsfähigkeit zu, und es muß nach dem eben Gesagten die Summe der zugeführten Arbeitsfähigkeiten gleich der Summe der entzogenen sein, wenn der Vorgang verlustlos, d. h. umkehrbar verläuft. Ist er jedoch nichtumkehrbar, was tatsächlich immer der Fall ist, so muß die Summe der entzogenen Arbeitsfähigkeiten um  $\Delta \mathcal{A}$  geringer als diejenige der zugeführten geworden sein. Es lautet also die Bilanz

$$\mathcal{A}_a + \mathcal{A}_b + \dots + \mathcal{A}_k + Q_1 \frac{T_1 - T_u}{T_1} + Q_2 \frac{T_2 - T_u}{T_2} + \dots + Q_n \frac{T_n - T_u}{T_n} = \mathcal{A}_\alpha + \mathcal{A}_\beta + \dots + \mathcal{A}_\zeta + AL + \Delta \mathcal{A} \quad (20)$$

woraus sich der Verlust an Arbeitsfähigkeit  $\Delta \mathcal{A}$  ergibt zu

$$\Delta \mathcal{A} = \sum_a^k \mathcal{A}_{\text{ein}} - \sum_\alpha^z \mathcal{A}_{\text{aus}} + \sum_1^n Q \frac{T - T_u}{T} - AL \quad (21)$$

Je kleiner dieser Verlust  $\Delta \mathcal{A}$  ist, um so vollkommener der Prozeß. Die Verluste der Gesamtanlage setzen sich zusammen aus Einzelverlusten der Arbeitsfähigkeit in den Anlageteilen, und es ist

$$\Delta \mathcal{A}_{\text{ges}} = \sum \Delta \mathcal{A}_{\text{teil}} \quad (22)$$

Hier können die Einzelverluste  $\Delta \mathcal{A}_{\text{teil}}$  durch Unterteilung der Anlage nach Abb. 8 und durch Aufstellung der Arbeitsfähigkeitsbilanz für die einzelnen Teile ermittelt werden. Die Anlageteile mit den größten Arbeitsfähigkeitsverlusten sind die bereits erwähnten Verlustherde.

### Festlegung der Gütezahl

Gleichung (22) stellt eine Grundlage von allgemeiner Gültigkeit zur Aufstellung von Gütezahlen von Wärmeanlagen dar. Die Aufgabe einer jeden Wärmeanlage ist, gewisse Leistungen zu liefern, sei es in Form von Arbeit, oder in Form von Wärme, oder in Form von umgewandelten chemischen Stoffen. Allen diesen Leistungen (Erzeugnissen) verschiedenster Art kann immer



eine Arbeitsfähigkeit zugesprochen werden, die durch irgendwelches Glied auf der rechten Seite der Gleichung (22) erfäßt wird. Hier findet man nicht nur die Arbeitsfähigkeiten der Leistungen, sondern auch die der Aufwendungen, sei es, daß solche Aufwendungen als mechanische Arbeit, oder als eine Wärmemenge oder als irgendein Stoff, z. B. als Brennstoff, in Wärmeanlagen, oder als Erz in Hochofenanlagen usw. auftreten. Wenn wir nun die Arbeitsfähigkeit der Leistungen im Verhältnis zur Arbeitsfähigkeit der Aufwendungen bringen, so haben wir eine eindeutig definierte Gütezahl für die energetische Vollkommenheit der Wärmeanlage geschaffen,

$$\eta_g = \frac{\text{Arbeitsfähigkeit der Leistungen}}{\text{Arbeitsfähigkeit der Aufwendungen}}$$

Die algebraische Summe der Leistungen und der Aufwendungen muß nach (21) gerade den Verlust  $\Delta Q$  geben.

Da die Leistungen und die Aufwendungen in Anlagen verschiedener Art und sogar bei Wärmeanlagen der gleichen Art je nach Auffassung verschieden sein können, so wird man für jede Wärmeanlage für Vergleichsfälle eine Übereinkunft treffen müssen, was man als Leistung und was man als Aufwendung auffassen will. Sobald aber diese Übereinkunft getroffen worden ist, ist die Gütezahl nach (22) festgelegt und zahlenmäßig eindeutig bestimmt. Die Nebenleistungen können mannigfacher Art sein. So z. B. können in einer Dieselmachine die Abgase zur Dampferzeugung herangezogen werden. Dann kann die Dampferzeugung eine Nebenleistung der Dieselmachine sein, deren Hauptzweck doch eine Arbeitserzeugung bleibt. Ähnlich kann von einer Wärmekraftanlage Anzapfdampf zu Heizzwecken abgenommen werden. Hier kann die Heizung entweder als Nebenleistung bewertet werden, oder aber es wird die Heizung als Hauptzweck erachtet und die Krafterzeugung als Nebenleistung. Nebenleistungen kann man mit ihren Arbeitsfähigkeiten der Arbeitsfähigkeit der Hauptleistung zuschlagen, oder aber man kann sie mit gleicher Berechtigung von der Arbeitsfähigkeit der Aufwendungen abziehen. So z. B. kann man bei einer Entnahmeturbine die Arbeitsfähigkeit des abgegebenen Dampfes entweder von der Arbeitsfähigkeit des zugeführten Frischdampfes in Abzug bringen, oder aber man kann sie der Turbinenleistung zuzählen. Es ist also insbesondere in bezug auf die Nebenleistungen erforderlich, vorher eine Übereinkunft zu treffen, wenn man die hier dargelegte Gütezahl zu Vergleichszwecken bei verschiedenen Wärmeanlagen gleicher Art verwenden will. Ähnlich wie von Nebenleistungen, können wir auch von Nebenaufwendungen sprechen. So wird man in einer Dampferzeugungsanlage den Brennstoffverbrauch als die Hauptaufwendung hinstellen können, während der etwa für regenerative Vorwärmung des Speisewassers herangezogene Anzapfdampf der Turbine als Nebenaufwendung nicht übersehen werden darf. Auch hier muß man die Arbeitsfähigkeit der Nebenaufwendungen je nach Übereinkunft entweder der Arbeitsfähigkeit der Hauptaufwendung zuschlagen, oder aber von der Arbeitsfähigkeit der Leistungen in Abzug bringen.

Als Beispiel mag eine Übersichtstafel für eine Dampfturbinenanlage gegeben werden. Die Arbeitsfähigkeiten verschiedener Energie- und Dampfmen gen sind darin in Kilokalorien je Stunde gegeben. Sie könnten ebensogut in Kilowatt oder Pferdestärken ausgedrückt werden. Die Zeichen (+) und (—) deuten an, mit welchem Vorzeichen die entsprechenden Arbeitsfähigkeiten in die beiden Spalten eingetragen werden. Im Falle einer anderen Übereinkunft kann man

die einzelnen Größen aus einer Spalte in die andere, aber unter Änderung des Vorzeichens übertragen.

Zahlentafel 1

Position	Arbeitsfähigkeit in kcal/h von	Einzusetzen mit angegebenen Vorzeichen in die Gruppe der		Bemerkung
		Leistungen	Aufwendungen	
1	Nutzleistung an der Kupplung.	+		
2	Eigenbedarf an Kraft .....	—		
3	Eintrittsdampf beliebiger Herkunft (also auch bei Mehrdruckturbinen) vor dem Absperrventil		+	
4	Turbinendampf zum Zwischenüberhitzer .....		—	bei Fremdüberhitzer
5	Turbinendampf vom Zwischenüberhitzer .....		+	
6	Heizmittel zum Zwischenüberhitzer (z. B. Kesseldampf) .....		+	bei Eigenüberhitzer
7	Heizmittel vom Zwischenüberhitzer (z. B. Kondensat) .....		—	
8	Abdampf, Gegendruckdampf, Entnahmedampf .....	entweder +	oder —	
9	Anzapfdampf für Speisewasservorwärmer .....		—	bei Fremdvorwärmer
10	Vorgewärmtes Speisewasser ...		—	bei Eigen vorwärmer
11	Antriebsdampf der zur Turbine gehörigen Hilfsapparate (z. B. Ejektoren), sofern nicht in Position 3 berücksichtigt .....		+	
Summenbildung .....		$\Sigma =$	$\mathcal{A}_{Leist}$	$\mathcal{A}_{Aufw}$

### Arbeitsfähigkeiten und die Leistungsregeln

Man kann die besprochenen Arbeitsfähigkeiten sehr vorteilhaft zur Abgabe von Gewährleistungen heranziehen, was besonders in verwickelteren Fällen zum Vorschein kommt. So ist z. B. bei Entnahmeturbinen mit Zwischenüberhitzung, Drosselregelung und regenerativer Vorwärmung des Speisewassers eine Angabe der Gewährleistung nach Dampf- oder Wärmeverbrauch äußerst mangelhaft, da die Wärme des Anzapfdampfes viel minderwertiger ist als die des Frischdampfes. Durch die Arbeitsfähigkeit wird dagegen der Güte oder der Minderwertigkeit eines Arbeitsstoffes eindeutig Rechnung getragen, wodurch eine einheitliche Beurteilungsgrundlage für die verschiedenartigsten noch so verwickelten Anlagen gegeben ist. Die Gewährleistung erfolgt dann entweder in Kilokalorien je Stunde oder in Kilowatt. In Zahlentafel 1 werden durch Summenbildung gewonnen die Größen  $\mathcal{A}_{Leist}$  kcal/h oder kW als die gewährleistete Mindestleistung und  $\mathcal{A}_{Aufw}$  kcal/h oder kW als der gewährleistete Höchstaufwand, welche Größen bei Abnahmeversuchen nachgewiesen werden können. Daraus folgt sofort der Leistungsverlust  $\Delta N$ , verursacht durch die Unvollkommenheit der Anlage

$$\Delta N = \mathcal{A}_{Aufw} - \mathcal{A}_{Leist} \quad (23)$$

und die Gütezahl 
$$\eta_g = \frac{\mathcal{A}_{Leist}}{\mathcal{A}_{Aufw}} \quad (24)$$

Man kann selbstverständlich aus dem gewährleisteten Arbeitsfähigkeitsverbrauch sofort auf den Dampf-



verbrauch  $D$  kg/kWh umrechnen, sobald man den Zustand und damit die Arbeitsfähigkeit  $\alpha$  des Bezugsdampfes angenommen hat. Es ist dann

$$D = \frac{\mathcal{A}_{\text{Aufw}}}{N \cdot \alpha} \text{ kg/kWh}, \quad (25)$$

der gleichwertige (äquivalente) spezifische Dampfverbrauch der Gesamtaufwendung. Er stellt den wirklichen Dampfverbrauch dar, vermindert um z. B. Entnahmedampf usw., wobei jedoch für die Entnahmedampfmenge nicht die wirklich gemessene, sondern die mit Hilfe der Arbeitsfähigkeiten auf den Bezugsdampf umgerechnete „gleichwertige“ Menge eingesetzt wird. Den gleichwertigen Dampfverbrauch der Einzelpositionen der Zahlentafel 1 gewinnt man, wenn man an Stelle von  $\mathcal{A}_{\text{Aufw}}$  die Arbeitsfähigkeiten der einzelnen Posten in (25) einsetzt.

### Einige Zahlenwerte

In Zahlentafel 2 sind die ungefähren Gütezahlen von einigen guten Anlagen angegeben.

Zahlentafel 2

Technischer Vorgang	Gütezahl festgelegt durch $\eta_i =$	Gütezahl
Wärme kraftwerk	$\frac{\text{gewonnene Elt-Energie}}{A \text{ des Brennstoffes}}$	0,25
Turbogenerator	$\frac{\text{gewonnene Elt-Energie}}{A \text{ des Dampfes}}$	0,8
Dampfzueger	$\frac{A \text{ des Dampfes}}{A \text{ des Brennstoffes}}$	0,3
Feuerung (restlose Verbrennung)	$\frac{A \text{ der Verbrennungsgase}}{A \text{ des Brennstoffes}}$	0,7
Wärmeaustausch im Dampfzueger	$\frac{A \text{ des Dampfes}}{A \text{ der Heizwärme}}$	0,7
Gasgenerator	$\frac{A \text{ des Gases}}{A \text{ des Brennstoffes}}$	0,7
Wohnraumheizungen	$\frac{\dot{Q} \cdot (T - T_a)}{A \text{ des Brennstoffes}}$	0,05
Trockner	$\frac{Q_h}{\dot{Q}}$	~ 0,1
Zerlegungsapparate (für Alkohol, Luft usw.)	$\frac{A \text{ der zerlegten Bestandteile}}{A \text{ der Aufwendung}}$	~ 0,1-0,2
Absorptionskältemaschine	$\frac{A \text{ der Kälteleistung}}{A \text{ der Heizwärme}}$	~ 0,3

Die Zahlentafel weist einige interessante Ergebnisse auf.

Die Gütezahl des Kraftwerkes  $\eta_g = 25\%$  stimmt mit dem üblichen thermischen Wirkungsgrad überein, weil

die Arbeitsfähigkeit des Brennstoffes nahezu gleich seinem Heizwert ist. Dagegen ist die Gütezahl eines guten Dampfzuegers mit dem Wert von 30% wesentlich ungünstiger als sein üblich angeführter Wirkungsgrad von vielleicht 80%. Der Grund liegt darin, daß im Dampf zwar fast die ganze Wärme des Brennstoffes, aber eine nur viel geringere Arbeitsfähigkeit wiedergefunden wird, als Folge der nichtumkehrbaren Vorgänge vornehmlich in der Feuerung (irreversible chemische Reaktionen) und beim Wärmeaustausch zwischen den heißen Verbrennungsgasen und dem wesentlich kühlerem Kesselwasser. In diesen beiden Teilvorgängen geht wegen Nichtumkehrbarkeiten jeweils etwa ein Drittel der vorhandenen Arbeitsfähigkeit verloren, wenn auch kein Wärmeverlust im üblichen Sinne zu verzeichnen ist! Die Verlustherde einer Wärmekraftanlage liegen also in der Feuerung und beim Wärmeübergang, und nicht auf der Maschinen-seite, die mit der Gütezahl von 80% schon ziemlich vollkommen ist. Leider ist heute eine technische Lösung zur umkehrbaren Verbrennung, daß heißt zur verlustlosen Umwandlung der chemischen Energie des Brennstoffes in mechanische Arbeit noch nicht bekannt. Ganz schlecht ist die Ausnützung der Brennstoffe in Raumheizungen. Hier könnte man bei Vermeidung

von Nichtumkehrbarkeiten mit nur  $\frac{1}{20}$  des heutigen

Brennstoffverbrauches „guter“ Heizungen auskommen. Die richtige Bedeutung dieser Ziffer kommt erst dann zum Ausdruck, wenn man bedenkt, daß der Haushalt mehr als die Hälfte des Brennstoffverbrauches der Welt verschluckt, und daß er in einem so industrialisierten Lande wie Deutschland noch mit einem Drittel am gesamten Kohlenverbrauch beteiligt ist. Die Anwendung der Wärmepumpe stellt hier energiewirtschaftlich einen bedeutenden Fortschritt dar.

### Zusammenfassung

Es wird in die Beurteilung der Güte der Wärmeanlagen nicht allein nach den Wärmebilanzen des Ersten Hauptsatzes, sondern nach den Erkenntnissen des Zweiten Hauptsatzes eingetreten. Hierzu eignet sich hervorragend die „Arbeitsfähigkeit“ eines Stoffes oder einer Wärmemenge. Sie erlaubt eine einheitliche Gütebeurteilung von Wärmeanlagen verschiedenster Art. Die daraus abgeleiteten Gütezahlen weisen auf eine Anzahl noch recht mangelhafter Wärmevorgänge hin. Die Arbeitsfähigkeit ist auch sehr gut geeignet zur Abgabe von Gewährleistungen und zur Aufnahme in die Leistungsregeln.

## Wirkungsgrade des modernen Flugmotors

Von Kurt Trachte, Dessau

Der heute so hoch entwickelte Stand des Flugzeugbaues, der sich hauptsächlich nach dem Weltkrieg gebildet hat, ist neben aerodynamischen Forschungserfolgen in der Hauptsache durch die gewaltige Verbesserung und die Leistungssteigerung der Triebwerke möglich geworden. Mit dem Vorhandensein einer bestmöglichen Vortriebskraft steht und fällt die heutige Fliegerei. Abgesehen von vereinzelt anderen Forschungswegen ist — man kann sagen, so lange wir fliegen können — der der Vortriebskraftzeugung vom Verbrennungsmotor über die Luftschraube als erfolgreichster begangen worden. Es läßt sich kaum annähernd voraussagen, durch welche grundlegend

andere Art der Vortriebskraftzeugung die heutige, so hoch entwickelte abgelöst werden wird. Mag an Stelle der Luftschraube das Ansauggebläse, an Stelle des Verbrennungsmotors die Dampfturbine oder sonst ein Aggregat treten, oder mag sogar der Rückstoß einst geeignet sein, die heutige Vortriebskraft-erzeugungsart abzulösen, immer würde es noch unendliche Forschungsarbeit und Zeit kosten — bei wirklich physikalisch, theoretisch begründeter, besserer Ausnutzungsmöglichkeit der aufgewandten Energie —, bis der heute so gut entwickelte, wirtschaftlich günstige und betriebssichere Stand der vorhandenen Vortriebskraftanlagen erreicht sein würde. Daher ist der einst-



weilen einzig gangbare Weg zur noch größeren Leistungssteigerung der Flugzeuge in der zähen Weiterentwicklung, Verbesserung und Verfeinerung der prinzipiell heute vorherrschenden Triebwerksanlagen zu suchen.

Es soll nun Aufgabe meiner Ausführungen sein, einmal weitgehend alle erfahrbaren Wirkungsgrade oder durch Energieumwandlungen, physikalische Gesetze und gegenseitige Beeinflussungen bedingt — zusammenzustellen, ihr Zustandekommen zu besprechen und gegebenenfalls mögliche Wege zu ihrer Verbesserung anzugeben.

Auf der damaligen Suche nach einem geeigneten Antriebsmotor für die Luftschraube des Luftfahrzeuges fiel nicht durch Zufall die Wahl auf die Verbrennungskraftmaschine. Sie war die best geeignete in ihrer Bauart und Wärmeausnutzung (s. Tafel I). Man ging daran, diese Maschine zu erforschen und für den speziellen Weg als Flugmotor zu entwickeln, durch diese Forschung aber zugleich eine Leistungssteigerung anzustreben, die ungeahnte Erfolge nach sich zog. Auf Grund verschiedener physikalischer Gesetze, dem Gay-Lussacschen, Mariotteschen und Poissonschen Gesetze errechnet man den thermodynamischen Wirkungsgrad des Idealmotors zu

$$1. \eta_{tho} = 1 - \epsilon^{k-1}$$

für den Ottomotor und

$$2. \eta_{tho} = 1 - \frac{1}{k} \cdot \epsilon^{k-1} \frac{\left(\frac{V_3}{V_2}\right)^k - 1}{\frac{V_3}{V_2} - 1}$$

für den Dieselmotor.

Sie sind abgeleitet an Hand der p-v-Diagramme, die schematisiert in Abb. 1 und 2 wiedergegeben sind. Die Zuführung der Wärme bei konstantem Druck ist die Eigentümlichkeit des Dieselverfahrens, weshalb es auch das Gleichdruckverfahren genannt wird. Zu bemerken ist aber, daß das Diesel-p-v-Diagramm moderner Maschinen meist kein reines Gleichdruckdiagramm mehr ist, sondern dem Aussehen nach sehr dem des Ottomotors ähnelt.

Bei der Vergleichsbetrachtung zwischen den beiden Formeln erkennt man, daß  $\eta_{tho}$  des Ottomotors mit Verkleinerung des Verdichtungsverhältnisses „ $\epsilon$ “, d. h. mit höherer Verdichtung wächst, was praktisch bedeutet, daß, je kleiner der Kompressionsraum ist, um so günstiger der Wirkungsgrad  $\eta_{tho}$  wird. Diese Verbesserungsmöglichkeit wird praktisch weitestgehend ausgenutzt. Die Grenze bietet beim Ottomotor der Klopfbeginn bzw. die Selbstzündung des Gemisches. Neben diesem Faktor ist  $\eta_{tho}$  des Ottomotors noch eine Funktion von „ $k$ “. Dieser Wert ändert sich mit der Gemischzusammensetzung, jedoch in geringen Grenzen, wodurch die Gemischänderung für  $\eta_{tho}$  des Ottomotors ohne großen Einfluß ist.

Aus der Formel des Dieselmotors erkennt man, daß  $\eta_{tho}$  außer von den Faktoren wie in Formel 1 außerdem

Zahlentafel 1

	Verbrennungskraftmaschine	Dampfturbine
Höchsttemperatur des Kreisprozesses $T_1$	3070° abs.	743° abs.
Niedrigste Temp. des Kreisprozesses $T_2$	770° „	313° „
Temperaturgefälle $T_1 - T_2$ .....	2300° „	430° „
Entsprechender Wirkungsgrad des Kreisprozesses von Carnot .....	75 v. H.	58 v. H.

auch noch von dem Verhältnis  $\frac{V_3}{V_2} =$  Füllungsgrad abhängt. Je näher das tatsächlich vorhandene Gemischvolumen dem theoretisch durch die Motorabmessung möglichen kommt, um so besser wird  $\eta_{tho}$ . Dieser Zahlenwert ist immer größer als der Zahlenwert „1“,

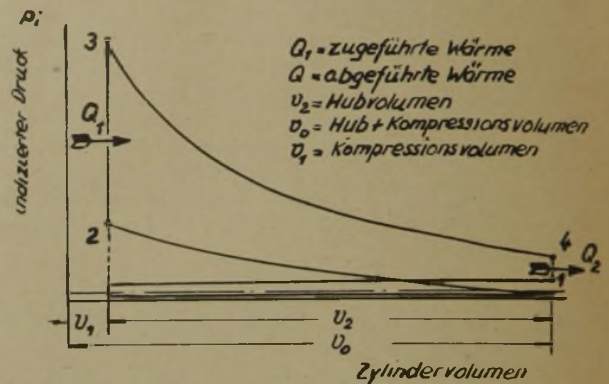


Abb. 1: P-v-Diagramm des Otto-Motors

so daß formelmäßig bei gleicher Wärmezufuhr und gleichem Verdichtungsverhältnis der ideale Ottomotor günstiger arbeitet als der ideale Dieselmotor. Allerdings arbeitet der Dieselmotor — bedingt durch seine Arbeitsweise — mit viel kleinerem „ $\epsilon$ “, was ihn praktisch günstiger arbeiten läßt als den Ottomotor. Man geht bis etwa  $\frac{1}{17} : \frac{1}{18}$  für „ $\epsilon$ “ bei modernen Dieselflugmotoren, gegenüber  $\frac{1}{5,5} : \frac{1}{6,5}$  bei modernen Ottomotoren.

### Ermittlung des thermodynamischen Wirkungsgrades der ausgeführten Maschine

Nach Ermittlung des thermodynamischen Wirkungsgrades für die Idealmaschine gilt es, zu überprüfen, inwieweit die gemachten Annahmen nicht für die ausgeführte Maschine zutreffen. Es werden zusätzliche Verluste sein, die im einzelnen festgestellt, von dem thermodynamischen Wirkungsgrad des Idealmotors abgezogen, den für die ausgeführte Maschine ergibt. Alle diese inneren Wärmeverluste, bis zur indizierten Arbeit erfährt man durch den Gütegrad „ $\eta_g$ “.

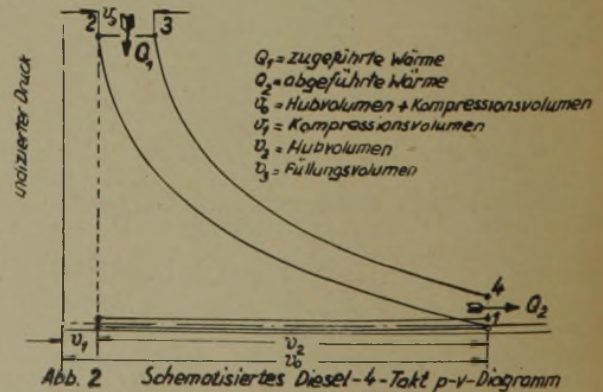


Abb. 2: P-v-Diagramm des Diesel-Motors

### I. Füllungsgrad $\eta_v$

1. Zu seiner Ermittlung ist es erforderlich, die vorhandenen Temperaturen an den markanten Punkten des Kreisprozesses zu ermitteln. Davon ist die am Ende des Ansaughubes (Punkt 1, Abb. 1 und 2)



am wichtigsten, da diese alle anderen beeinflusst und wesentlichen Einfluß auf den Füllungsgrad hat.

Diese Temperatur ist sehr stark abhängig von der Gemisch- bzw. Ladelufttemperatur, die bei Eintritt der Füllung in den Zylinder vorhanden ist. Sie bestimmt maßgeblich den Füllungsgrad  $\eta_v$ , d. h. das Ladegewicht. Diese Temperatur liegt bei aufgeladenen Otto-Flugmotoren ohne Zwischenkühler mit  $1,2 \div 1,3$  ata Ladedruck bei  $50 \div 60^\circ \text{C}$ , bei nicht aufgeladenen Diesel-Flugmotoren mit  $1,4 \div 1,5$  ata Spüldruck bei  $\sim 60 \div 70^\circ \text{C}$ . Das Gemisch bzw. die Ladeluft erwärmt sich an den heißen Ventilen und Zylinderwänden während des Ansaughubes und Aufladung um rund  $40 \div 45^\circ \text{C}$ . Sehr wesentlich ist dabei die Höhe der Kühlmitteltemperatur,

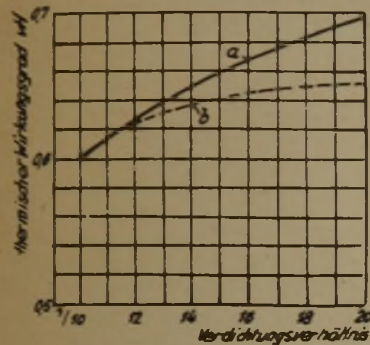


Abb. 3: Vergleich der Wirkungsgrade des Gleichdruckverfahrens (a) (Otto) und Gleichdruckverfahrens (b) (Diesel)

die die Gemischtemperatur und damit  $\eta_v$  sehr beeinflusst (siehe Abbildung 4). Nach Versuchen von Ricardo (6) wurde ermittelt, daß sich z. B. das einströmende Gemisch an einer  $150^\circ \text{C}$  heißen Zylinderwand, was etwa  $100^\circ \text{C}$  Kühlmitteltemperatur entspricht, während des Ansaughubes um  $45,5^\circ \text{C}$  erwärmt.

Demgegenüber betrug die Erwärmung nur  $30,5^\circ \text{C}$  bei kaltem Kühlwasser von  $22^\circ \text{C}$ . Bei Absinken der Ladungstemperatur um  $15^\circ \text{C}$  vermehrt sich das Gewicht der Ladung um  $390$  d. h. im Verhältnis der absoluten Temperaturen,  $375$

also um rund  $3,75\%$ . Die Verluste infolge größerer Wärmeabgabe durch Leitung und Strahlung, bedingt durch die größeren Temperaturunterschiede zwischen Kühlmittel- und Zylindertemperaturen während der Verbrennung, werden nach den Versuchen mit  $0,4 \div 1\%$  angegeben, so daß ein Reingewinn an indizierter Leistung von  $2,75 \div 3,25\%$  zu verzeichnen ist.

2. Gleichmaßen wesentlich bestimmt wird der Füllungsgrad  $\eta_v$  durch die hydraulischen Verluste. Sie sind an vielen Motorstellen recht beträchtlich, und eine wesentliche Verminderung ist aus Gründen des Prinzips an diesen Stellen nicht möglich. Besonders sei hier an den Gas- bzw. Luftdurchtritt durch die Ventilöffnungen gedacht. Ihr Vorhandensein bedingt einen höheren Druck vom Gebläse zur Erreichung des bestimmten

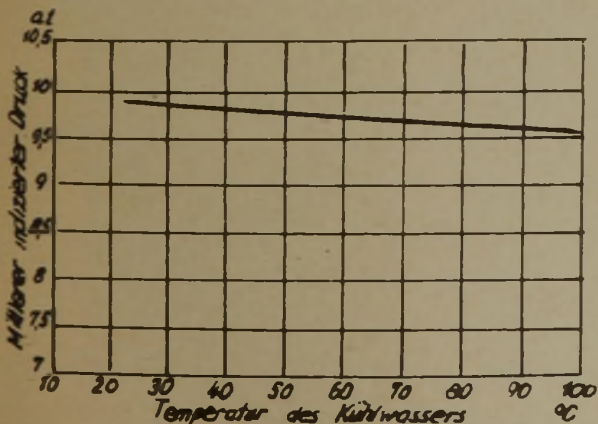


Abb. 4: Änderung des mittleren indizierten Kolbendruckes mit der Kühlwassertemperatur

Ladedrucks im Zylinder, und damit größere Verdichtungsarbeit.

Der Druckabfall in den Leitungen entsteht durch:

- a) Reibung des Gemisches an den Wandungen der Leitung;
- b) Stoßverluste (vor allem bei Umlenkungen);
- c) durch Wirbelbildung.

Hier ist vor allem auf die Art der Querschnittsvergrößerung zu achten. Der Winkel zwischen der Rohrwand und Rohrachse darf nicht mehr als  $4^\circ$  betragen, um mit Sicherheit Wirbelbildung zu vermeiden.

3. Weiter ist  $\eta_v$  von der Gas- bzw. Luftgeschwindigkeit abhängig. Sie wird bestimmt durch:

- a) Leitungs- und Durchtrittsquerschnitte;
- b) Druckunterschied zwischen Gebläseaustritt und im Zylinder;
- c) Oberflächenzustand der Leitungsinflächen, d. h. von der Reibung des Gases;
- d) Zeitquerschnitt des Steuerorgans.

Am größten ist immer die Gasgeschwindigkeit beim Öffnen des Einlaßventils bzw. der Einlaßschlitze. Durch Versuche hat Caroselli (7) festgestellt, daß bei Flugmotorenzylindern eine mittlere Gasgeschwindigkeit in den Einlaßventilquerschnitten von  $60 \text{ m/s}$  beste Füllung und höchsten mittleren Nutzdruck ergibt.

$90 \text{ m/s}$  sollten nicht überschritten werden (siehe Abb. 5). In diesem Zusammenhang ist es erforderlich, die Ausführung der neuen Schiebersteuerung zu erwähnen, von der man durch

bessere Zeitquerschnitte einen günstigeren Füllungsgrad erhofft und versuchsmäßig erzielt hat. Dies ist ja auch möglich durch das Doppelkolbenverfahren nach Junkers. Untersuchungen ergaben fast gradlinigen  $p_m$ -Verlauf bis  $v_{m \text{ gas}} = 100 \text{ m/s}$ . Die Schieberkonstruktion wird heute von der englischen Flugmotorenfirma „Bristol Aeroplane-Company“ gebaut, die teils durch Anregung des englischen Luftfahrtministeriums sehr lange Versuchs- und Forschungsarbeit auf diesem Gebiet geleistet hat. Seit 1905 als 2-Schieber-Konstruktion einem Amerikaner Charles Y. Knight patentiert, schließlich 1909 durch die 1-Schieber-Konstruktion des Schotten Peter-Burt verbessert und neu patentiert, wird sie heute in zahlreichen englischen Flugmotorentypen der genannten Firma verwirklicht. Neben vielen Vorteilen sind die Material- und Schmierungs-schwierigkeiten doch erheblich und noch nicht restlos überwunden. Es wurden als Schiebermotoren gebaut:

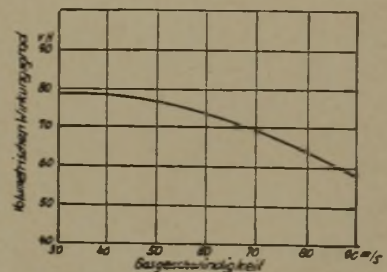


Abb. 5: Volumetrischer Wirkungsgrad als Funktion der Gasgeschwindigkeit im Einlaßventil

#### 1. 9-Zylinder-Sternmotor

Perseus I

1932 typengeprüft mit  $647 P_{S \text{ max}}$ . Bei Überladung wurden bis  $710 \text{ PS}$  gefahren.

#### 2. Perseus II

1934 typengeprüft bodenüberladen  $N_{\text{Reise}} = 426 \text{ PS}$  bei  $n = 2150 \text{ U/min}$   $0,195 \text{ kg PS}$  Brennstoffverbr.

#### 3. Perseus III als Militärmotor mit ähnlichen Daten wie Perseus II.

#### 4. Perseus V und VI

Sie sind verbesserte 9-Zylinder-Typen und werden heute in größerer Stückzahl gebaut.

#### 5. Perseus VIII 1936 typengeprüft.

#### 6. Perseus XII.

#### 7. Hercules-Motor.



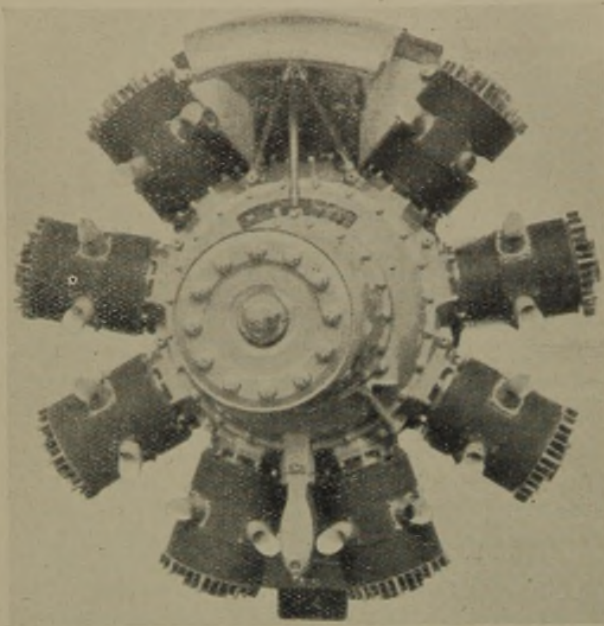


Abb. 6: Bristol, Baumuster „Perseus XII“  
9-Zylinder-Schiebermotor, Bohrung 146 mm, Hub 165 mm,  $V = 24,91$ ,  
Höchstleistung am Boden 840 PS bei  $n = 2650$  U/min, Höchstleistung in  
2 km Höhe 918 PS bei  $n = 2750$  U/min, Nennleistung in 2 km Höhe 755  
PS, Außendurchmesser 1320 mm

Ich nehme mit den gemachten Angaben hierüber Bezug auf den Vortrag des Chefkonstruktors der „Bristol Aeroplane-Company“ AHR Fedden, Bristol (England) (1): „Die Entwicklung der Einschiebersteuerung bei Flugmotoren“, gehalten auf der Lilienthal-Hauptversammlung 1938.

4. Der Füllungsgrad ist weiter abhängig von der Menge noch vorhandener Abgase. Sie ist eine Funktion von:

- Der Größe der Austrittsquerschnitte;
- der Zeitdauer des Auspuffhubes;
- Lage der Auslaßventile bzw. Schlitze im Zylinder;
- der Kopfform;
- der Art der Spülung bei Zweitaktmaschinen;
- dem Vorhandensein einer Abgasturbine.

#### Zu a) Austrittsquerschnitte

Bei Betrachtung dieses Punktes hat man die gleichen Verhältnisse in der Umkehrung wie bei dem oben-erwähnten Ladevorgang. Schlitze und Schieber werden auch hier dem Ventil überlegen sein; noch besonders bekräftigt wird diese Tatsache auf Grund der Schwierigkeiten, die durch die hohen Temperaturen, denen das Auslaßventil ausgesetzt ist, auftreten.

#### Zu b) Zeitdauer des Auspuffhubes

Je hochtouriger der Motor ist, um so geringer ist die Zeit zum Ausstoßen der Abgase, um so unvollkommener wird dies daher möglich sein. Während heute allgemein Drehzahlen von 2000 ÷ 2800 U/min für Flugmotoren üblich sind, machen sich in allerneuester Zeit aus Gründen der Leistungssteigerung Anzeichen weiterer Drehzahlsteigerungen bis 3500 und 4000 U/min hin-auf, bemerkbar. Diese Maßnahme zur Leistungssteigerung liegt entsprechend den Leistungsformeln 3. und 4. sehr nahe.

$$3. N = \frac{V_h \cdot l \cdot P_{m \text{ at}} \cdot n^{\text{min}^{-1}}}{900} \quad \text{für Viertaktmotor}$$

$$4. N = \frac{V_h \cdot l \cdot P_{m \text{ at}} \cdot n^{\text{min}^{-1}}}{450} \quad \text{für Zweitaktmotor}$$

Dies sind Leistungsformeln auf Grund des Mitteldrucks. Die Drehzahlerhöhung beeinflusst augenscheinlich nach den angeführten Formeln  $\eta_v$  und damit  $\eta_{ges}$  ungünstig.

#### Zu c) und d) Kopfform

Eine rein konstruktive Möglichkeit der Verbesserung des Füllungsgrades  $\eta_v$  ist durch zweckmäßigste Gestaltung des Zylinderkopfes und der günstigsten Lage der Ventile gegeben. Hierzu sei auf Abb. 8 verwiesen, wo Köpfe, unabhängig von ihrem Vorhandensein bei modernen Flugmotoren zusammengestellt wurden, um die konstruktiven Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit zu veranschaulichen. Grundsätzlich muß man beachten, daß tote Ecken im Zylinderkopf, wo sich die verbrannten Gase beim Auspuffhub verbergen können, zu vermeiden sind. Es muß auf eine möglichst glatte Gasführung zum Aus- bzw. Einlaßventil im Kopf geachtet werden, was bei Ventiltaschen und Einnischungen nicht durchführbar ist.

#### Zu e) Spülung

Bei Viertaktmotoren ist ein besseres Ausstoßen möglich, wenn das Gemisch bei überladenen Motoren teilweise eine Spülfunktion übernimmt.

Bei Zweitaktmotoren, wo an Stelle des Auspuffhubes zwischen Ende des Expansions- und Anfang des Kompressionshubes eine besondere Ausspülung des Zylinders mit Luft bzw. Gemisch erfolgt, ist durch Verwendung besserer Spülsysteme eine verbesserte Ausbringung der Abgase zu erreichen. Hier hat die Firma Junkers in ihrem Spülsystem bei den Gegenkolben-Diesel-Flugmotoren das zur Zeit günstigste ausgearbeitet. Es hat sich sehr gut in dem bekannten Jumo-205-Motortyp bewährt (Abb. 8). Der Spüldruck beträgt hier  $1,4 \div 1,5$  ata.

#### Zu f) Abgasführung

Die Verwendung der Abgasturbine beim Flugmotor ist heute noch sehr selten. Bei Ottomotoren sind die Schwierigkeiten in bezug auf Materialfragen bisher kaum überwindlich. Hinzu kommt, daß ihre Verwendung bei Ottomotoren als Bodenmotoren einstweilen noch illusorisch ist, da diese zur Zeit selten aufgeladen werden. Eine Verwendung liegt daher in der Hauptsache bei Höhenmotoren nahe. Wesentlich günstiger

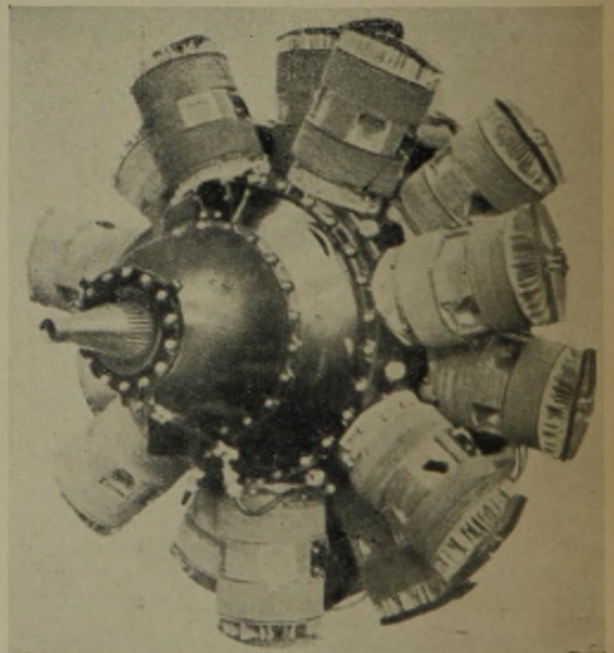


Abb. 7: Bristol, Baumuster „Perseus XII“  
14-Zylinder-Doppelsternmotor mit Schiebersteuerung, Bohrung 146 mm,  
Hub 165 mm,  $V = 33,7$  l, Höchstleistung am Boden 1290 PS bei  $n = 2650$   
U/min, Höchstleistung in 1220 m Höhe 1375 PS bei  $n = 2750$  U/min



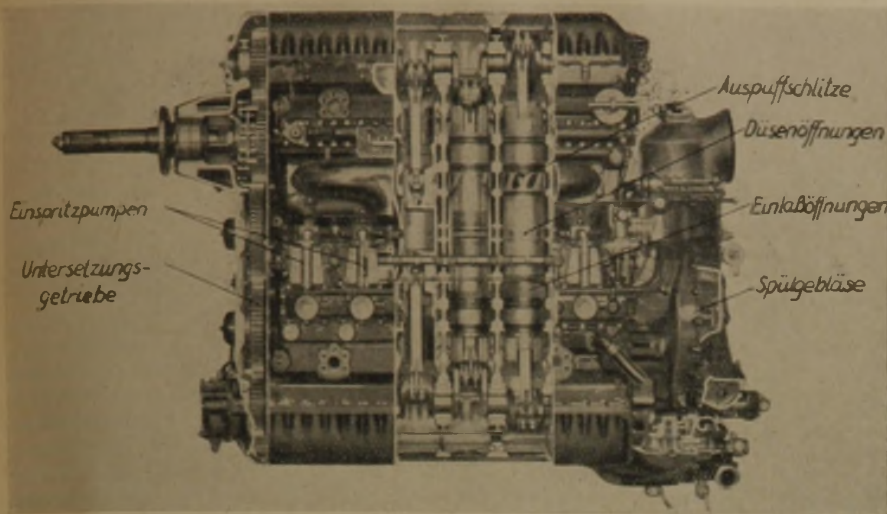


Abb. 8: Junkers-Schweröl-Flugmotor Jumo 205, Längsschnitt (Werkfoto Junkers)

liegen die Verhältnisse beim Diesel-Flugmotor, da hier die Auspufftemperaturen rund  $600 \div 700^\circ \text{C}$  betragen, gegenüber  $1200^\circ \text{C}$  beim Ottomotor. Wie wirkt sich nun das Vorhandensein einer Abgasturbine aus? Selbst bei bestem Wirkungsgrad ( $65 \div 70\%$ ) wirkt sich die Behinderung des freien Austritts der Abgase so stark aus, daß nach Versuchen von Ricardo die restlichen, im Zylinder verbleibenden Abgase einen um 0,21 at höheren Druck haben als die Außenluft (siehe Abb. 9) (2); gleichfalls wird die Frage der Rückkühlung der Spül- bzw. Ladeluft bei Verwendung der Abgasturbine akut, da durch Wärmestrahlung deren Temperaturen erheblich steigen und damit  $\eta_v$  verschlechtert wird.

#### 5. Wärmebeeinflussung des Füllungsgrades (siehe Abb. 10)

Führte ich schon bei Beginn der Füllungsgradbesprechung einen wesentlichen Teil der Wärmebeeinflussung auf  $\eta_v$  aus, so ist es nunmehr trotzdem noch erforderlich, erneut diesen Punkt zu beleuchten, da außerdem noch viele andere, danach besprochene Faktoren unter diesem Gesichtspunkt zu berücksichtigen sind.

Oben sprach ich von dem Vorhandensein des hydraulischen Wirkungsgrades. Hier ist nun noch das zusätz-

liche Auftreten von Reibungswärme aus den Stoßverlusten zu beachten. Ein nicht zu vernachlässigender Faktor ist die Wärmeentwicklung infolge Wirbelbildung. Gleichfalls erwärmt sich die Luft bzw. das Gemisch noch durch die Verdichtungsarbeit, die erforderlich war, um den Druckverlust durch die hydraulischen Widerstände auszugleichen. Die Vorbeileitung des besprochenen Mediums an heißen Teilen des Motors vor dem Zylinder bedingt gleichermaßen eine Wärmeaufnahme durch Strahlung und Leitung.

- Neben den bisher angeführten Verschlechterungen des Füllungsgrades, meist infolge Luft- bzw. Gemischtemperaturerhöhung tritt eine Verbesserung durch Abkühlung ein:
- durch Abführung von Wärme an die außen freiliegenden, kühleren Leitungswände;
  - durch Abkühlung des Gemisches infolge der Verdampfung.

Die Verdampfungswärme beträgt bei Benzin  $80 \text{ kcal/kg}$ , bei Gasöl  $130 \div 190 \text{ kcal/kg}$ , d. h.  $80$  bzw.  $130 \text{ kcal}$  werden dem Gemisch entzogen, um  $1 \text{ kg}$  des in kleinen Tröpfchen vorhandenen Brennstoffes vom flüssigen in den gasförmigen Zustand umzuwandeln. Neben dem unter 4. beschriebenen ungünstigen Einfluß der vorhandenen Abgase auf  $\eta_v$  durch Verringerung des Füllungsvolumens des brennbaren Gemisches ist auch noch die Temperaturerhöhung zu berücksichtigen, die bei Vermischung mit den Abgasresten von hoher Temperatur beim Gemisch auftritt, wodurch weiterhin das Füllungsgewicht vermindert wird.

## II. Abgasverluste

Neben den Abgaswärmeverlusten, die durch Abführung der heißen Abgase an die Außenluft erfolgen, treten noch rein chemische Verluste auf.

### 1. Durch unvollkommene Verbrennung im Zylinder:

- als Funktion ungenügender Mischung;
- als Funktion der Zylinderkopfform nach den Gesichtspunkten der Lage der einzelnen Teile, wie Zündkerze bzw. Einspritzdüse, Ventile usw.;
- als Funktion des Zünd- bzw. Einspritzzeitpunktes;
- als Funktion von Zerstäubungsart und Einspritzdruck beim Dieselmotor;
- als Funktion der Zündwilligkeit des Gemisches
- als Funktion der Verbrennungszeit;
- als Funktion der Gemischtemperatur.

Um ein richtiges Mischungsverhältnis der Füllung im Ottomotor erreichen zu können, ist die theoretische Bestimmung der Luftbedarfszahl „L“ — rein chemisch — für den betreffenden gefährten Brennstoff erforderlich. Praktisch wird natür-

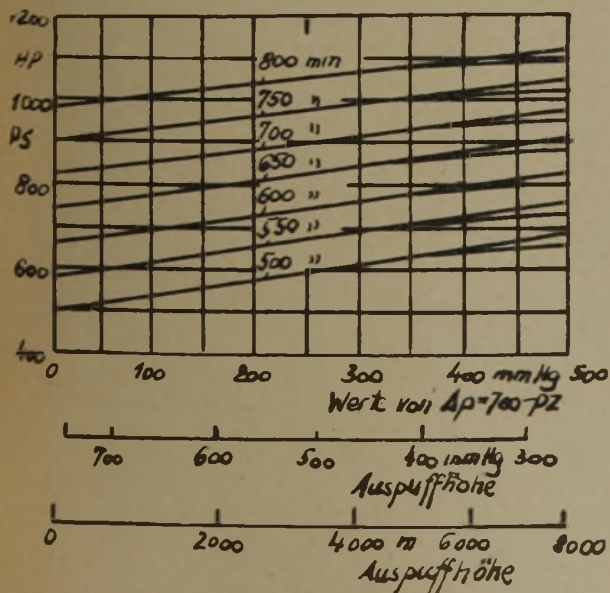


Abb. 9: Änderung der Leistung in Abhängigkeit vom Auspuffegendruck für Otto-Motoren

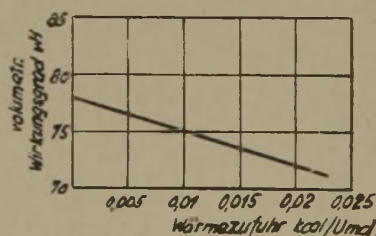


Abb. 10: Einfluß der Vorwärmung auf den volumetrischen Wirkungsgrad  
Brennstoff: Benzin  $n = 1500 \text{ min}^{-1}$ ,  $\epsilon = 5:1$ , Kühlwassertemperatur  $60^\circ \text{C}$ , Betrieb mit Höchstleistungsgemisch, 20 v. H. Brennstoffüberschuß



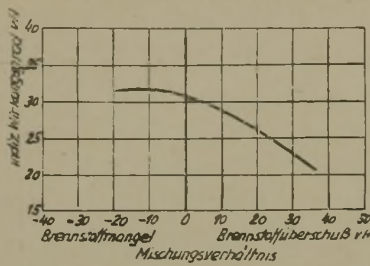


Abb. 11: Einfluß des Mischungsverhältnisses auf indiz. Wirkungsgrad

fahren. Hier haben die Brennstoffmoleküle genügend Gelegenheit, sich mit den Sauerstoffmolekülen der Luft zu innigem Gemisch zu verbinden. Bei Maximalleistung wird jedoch mit bis  $-10\%$  Luftmangel gefahren, wodurch die chemischen Verluste natürlich sehr hoch werden. Der Brennstoffverbrauch des Motors ist erheblich höher. Der Luftüberschuß beim Dieselverfahren beträgt bei Vollast  $\sim 50\%$ , wobei die chemischen Verluste sehr abnehmen, was sich zum Teil in dem geringen Brennstoffverbrauch von weniger als  $160 \frac{\text{g}}{\text{PSh}}$  (Dauerverbrauch) gegenüber  $170 \div 180 \frac{\text{g}}{\text{PSh}}$  beim Ottomotor (kurzfristig erreichter Verbrauch) bemerkbar macht. Die Luftmenge bleibt hier konstant, während sich die Brennstoffmenge je nach Belastung ändert. Neben dem Luftüberschuß hängt die gute Verbrennung des Brennstoffes beim Dieselmotor aber noch wesentlich von der Art der Zerstäubung des Brennstoffstrahles ab, wie er beim Einspritzen entsteht. Hier ist die Stärke der Luftwirbelung im Augenblick des Einspritzens sehr wichtig. Für die Auflösung des Brennstoffes in Einzeltröpfchen bei der Zerstäubung reicht die Einspritzenergie schon aus, wenn der Einspritzdruck  $\sim 50$  at über dem Gegen-

druck liegt. Die Luftwirbelung dient also in erster

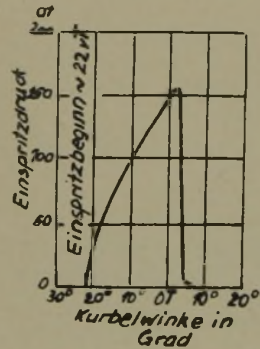


Abb. 12: Druckverlauf in Abhängigkeit von der Kurbelstellung

Linie der schnellen Verteilung der Brennstofftröpfchen auf das gesamte Luftvolumen während des Einspritzens und zum schnellen Vorwärtsbringen der Verbrennungswelle während der Explosion. Die Einspritzung ist so vorzunehmen, daß eine gleichmäßige Drucksteigerungsgeschwindigkeit erreicht wird. Entsprechend sind der Einspritzbeginn und das Ende abzustimmen mit ihren Geschwindigkeiten (siehe Abb. 12).

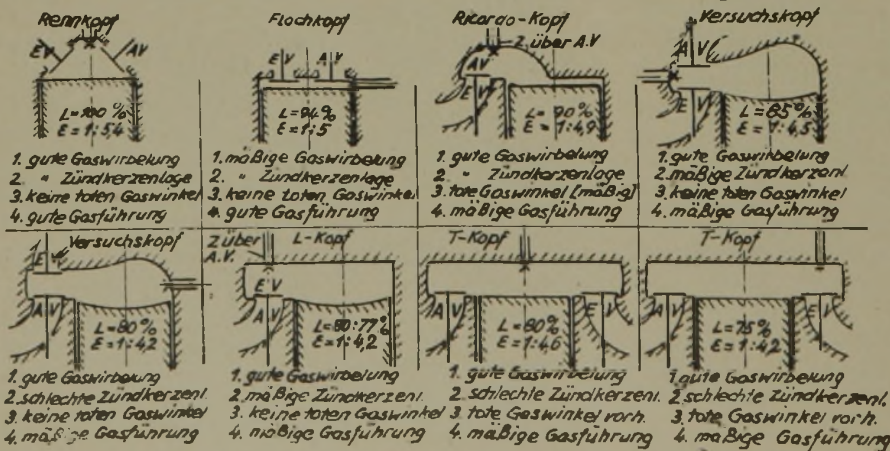


Abb. 13: Zusammenstellung der von Ricardo untersuchten Kopfformen

Über den Einfluß der Kopfform, der Lage der Ventile und Zündkerzen bzw. Einspritzdüsen hat Ricardo<sup>6)</sup> umfangreiche Untersuchungen angestellt, die prinzipiell geklärt haben, daß

a) der Einfluß der Kopfform auf die Art und Schnelligkeit der Verbrennung sehr groß ist,

β) die beste Verbrennung erfolgt, die chemischen Verluste am kleinsten werden, wenn der Weg von der Kerze bzw. Einspritzdüse zum weitest entfernten Gemischteilchen in bezug auf seine Kürze ein Optimum ist, das heißt, wenn die Verbrennung in einer Kugel mit der Zündstelle in deren Mittelpunkt erfolgen würde. Wie schon erwähnt, sind Taschen und Nischen zu vermeiden, die erstens die Klopfgefahr beim Ottomotor steigern, und in denen sich Gemischteile befinden, die von der Verbrennung nicht oder zu spät erfaßt werden, wenn ihre Verbrennung keinen Nutzen mehr bringt. Schließlich, wie schon erwähnt, verbergen sich dort Abgase, die beim Auspuffhub nicht aus dem Zylinder entfernt werden. An Hand von Abb. 13 möge hier verkürzt das Ergebnis der Untersuchungen von Ricardo angeführt sein. Er hat einzelne Kopfformen untersucht und ihre Wirkungsgrade ermittelt, die er nach dem bestmöglich untersuchten Kopf, dem sogenannten Rennkopf, ausgerichtet hat. Wenn dessen Leistungsfähigkeit „L“ mit 100% bezeichnet werden soll, haben die anderen untersuchten jene bei den einzelnen Skizzen angegebenen Leistungswerte. Die Werte für „E“ bei den einzelnen Typen geben das Verdichtungsverhältnis des entsprechenden Kopfes an, das bei Brennstoff mit 87 O.-Z. noch eben möglich ist, bevor das Klopfen beginnt. Für die L-Wertebestimmung wurden an den einzelnen Köpfen jeweils getrennt Untersuchungen vorgenommen, die nach folgenden Gesichtspunkten durchgeführt wurden:

- Erhaltung der Gaswirbelung während der Verdichtung und Verbrennung.
- Möglichkeit zweckmäßiger Unterbringung der Zündkerze bzw. Einspritzdüse.
- Vermeidung toter Gaswinkel.
- Freier Zugang vom Einlaßventil zum Verbrennungsraum.

Neben der zweckmäßigen Lage der Zündkerze in bezug auf den Zündweg ist noch zu beachten, daß die Zündung möglichst weitgehend von der heißesten Stelle des Zylinders ausgehen soll, um eine Selbstzündung des zuletzt verbrennenden Gemischrestes zu vermeiden, der durch die Explosionswelle noch äußerst hoch verdichtet wird, was sich in einem deutlich hörbaren Klopfen des Motors bemerkbar macht. Wertlegung auf gute Gaswirbelung bei Verdichtung und Zündung ist für den chemischen Wirkungsgrad von

großer Bedeutung. Sie vergrößert erstens die Verbrennungsgeschwindigkeit wesentlich, wodurch zum erwünschten Zeitpunkt viel mehr Gas verbrennt und in Nutzarbeit umgesetzt wird. Würde zum Beispiel die Zündung in einem Zylinder mit vollkommen ruhig stehendem Gasgemisch erfolgen, würde die Zündgeschwindigkeit selbst bei langsamlaufender Maschine so gering sein, daß ein wesentlicher Gemischteil viel zu spät verbrennt (gegen Ende des Explosionshubes),







besser wärmeleitenden Materials für den Kolbenboden und durch geeignetste Gestaltung der Ölabbstreifringe ist so heute eine wesentlich größere Wärmeabfuhr an das Öl möglich geworden als in früherer Zeit.

#### IV. Verluste durch Undichtigkeit von Kolben und Steuerung

Dieser Verlustfaktor wird um so beachtlicher, je höher die Verdichtung und die Zünddrücke des Motors sind. Beim Dieselmotor werden somit zwangsweise diese Verluste größer sein, da dieser mit viel kleinerem „ $\epsilon$ “ arbeitet als der Ottomotor.

Neben der Undichtheit vom Verbrennungsraum zum Kurbelraum treten auch noch Dichtverluste an den Ventilen bzw. Schlitzen auf. Bei Korrosionseinflüssen, Anfrassungen der Ventile durch die Benzinbeimischungen oder Verbrennungen an den Sitzen können diese Verluste oft erheblich werden. Aus dieser Erkenntnis heraus war es sehr wichtig, korrosionsfestere, widerstandsfähigere Ventilsitze in Form der bekannten Stelit-Sitze einzuführen.

Alle diese von I bis IV angeführten Verlustfaktoren, die die ausgeführte von der idealen Maschine unterscheiden — zusammengefaßt in „ $\eta_g$ “, dem Gütegrad —, lassen sich als Gesamtheit leicht errechnen. Erforderlich hierzu ist der Brennstoffverbrauchswert für die zu untersuchende Belastung und dessen genauer Heizwert, sowie die indizierte Leistung. Der thermische Wirkungsgrad ist dann

5. 
$$\eta_{th} = \frac{632 \cdot N_i}{B_u \cdot H_u}$$

632 = theor. erf. Wärmemenge für 1 Psh (kcal/PSh)  
 $H_u$  = unterer Heizwert des Brennstoffes kcal/kg  
 $B$  = wirklicher Brennstoffverbrauch kg/h  
 $N_i$  = indizierte Leistung in PS
6. 
$$\eta_g = \frac{\eta_{th}}{\eta_{tho}}$$
7. 
$$\eta_g = \frac{632 \cdot N_i}{B \cdot H_u \cdot (1 - \epsilon^{k-1})}$$

„ $\eta_g$ “ der Formel 7 stellt den Gütegrad des Ottomotors dar. Praktisch ist nun die indizierte Leistung, die wir bei der Berücksichtigung aller bisher besprochenen

- A: Energie aus zurückgebliebenen Gasen und Gemischerwärmung durch dieselben
- B: Gemischerwärmung durch Zylinderwände
- C: Reibungswärme, die durch Abgase abgeführt wird
- D: Wärmeübergang von den Auspuffgasen an das Kühlwasser
- E: Reibungswärme, die durch das Kühlwasser abgeführt wird
- F: Strahlung der Auspuffleitungen
- G: Strahlung des Kühlwassermantels und der Kühlwasserleitung
- H: Strahlung nicht wasserumspülter Motorwände (z. B. Kurbelgehäuse usw.)

$$\eta_{tho} = \frac{N-a}{100} \quad \eta_{th} = \frac{a+b}{100}$$

$$\eta_g = \frac{a}{a+b} \quad \eta_m = \frac{c}{100} = \frac{f}{e}$$

$$\eta_h = \frac{d}{100} = \frac{g}{f} \quad \eta_{ges} = \frac{g}{100}$$

Wirkungsgrade erhielten, nur ein Zwischenwert auf dem Wege der Umwandlung von chemisch gebundener, in Bewegungsenergie. Bis zum Erhalt der Nutzleistung „ $N_N$ “ an der Luftschraubenwelle sind nun noch folgende Verluste zu berücksichtigen:

#### V. Mechanische Verluste, erfährt in $\eta_m$ = mech. Wirkungsgrad

#### VI. Verluste durch Antrieb der Hilfsaggregate, erfährt in $\eta_h$ = Umsetzungsgrad

Mechanischer Wirkungsgrad

$$\eta_m = \frac{\text{eff. Leistung an der Kurbelw.}}{\text{indiz. Leistung}}$$

Hierunter ist die gesamte innere Reibung — ohne Hilfsaggregate, jedoch mit dazu notwendigem Getriebe — erfährt, die von den Motorbelastungen, der Schmierung, den Abmaßen und Wärmedehnungen des Motors abhängt (siehe Abb. 15) (5). Sie tritt unter anderem auf

- a) zwischen Kolbenschaft, Kolbenring, Ölabbstreifring einerseits und Zylinder andererseits,
- b) in den Kurbelwellen-Haupt- und Pleuellagern,
- c) in den Steuerungswellenlagern,
- d) im Steuerungsmechanismus (Ventilschaft bzw. Einspritzpumpenstempel, Nockenrolle usw.),
- e) zwischen den Getriebezahnrädern,
- f) in den Getrieberadlagerungen,
- g) in den verschiedenen Abtriebslagern, Kupplungen, Verzahnungen der Kuppelknochen für Hilfsaggregate-Abtrieb usw.

Während man vorher die

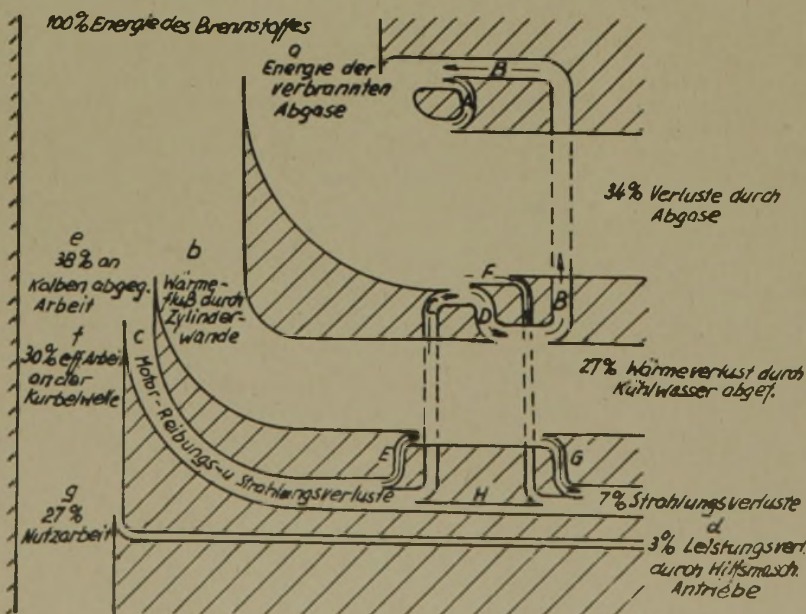


Abb. 15: Leistungsdigramm



Wärmeverluste als solche zusammenzufassen, um eine Vergleichsmöglichkeit in wärmetechnischer Beziehung zwischen den einzelnen Motoren zu haben, ist es daneben in der Praxis gleichfalls gebräuchlich, die gesamten, bisher besprochenen Wirkungsgrade, einschließlich des mech. Wirkungsgrades in dem wirtschaftlichen Wirkungsgrad  $\eta_w$  zusammenzufassen, um die Güte des Motors auch in konstruktiver Hinsicht ganz beurteilen zu können.

$$8. \quad \eta_w = \eta_{th} \cdot \eta_m = \eta_{tho} \cdot \eta_g \cdot \eta_m$$

### Umsetzungsgrad $\eta_h$

Ein moderner Flugmotor auf seinem derzeitigen hohen Entwicklungsstand ist undenkbar ohne Hilfsaggregate.

Die ungeheure Leistungssteigerung der Flugmotoren war zum größten Teil nur möglich unter weitestmöglicher Verwendung von Hilfsmaschinen, die teils direkt, teils indirekt vom Motor angetrieben, irgendeine Funktion zur Betriebsermöglichung oder Leistungssteigerung erfüllen. In Kauf genommen werden muß natürlich der Aufwand an Leistung, der für ihren Antrieb von der Leistung an der Luftschraubenwelle abgenommen wird. Dieser Leistungsverlust wird mit der Anzahl der Aggregate erklärlicherweise zunehmen, und es bleibt bei leistungserhöhenden Apparaten immer zu erwägen, ob der Antriebsaufwand neben seinem Baugewicht in annehmbarem Verhältnis zur Leistung bzw. der Nutzleistungserhöhung des Motors steht. Es geht nicht an, für ein untergeordnetes Hilfsaggregat 8 und 10 PS, vielleicht noch mehr zum Antrieb aufzuwenden, während man an anderer Stelle kostspielige Versuche durchführt, um Leistungserhöhung um Bruchteile von Prozenten zu erhalten. Denn gerade durch geeignete Konstruktionen in dieser Beziehung läßt sich offenbar noch wesentliches erzielen. Um nun den Gesamtumsetzungsgrad festlegen zu können, ist es notwendig, die erforderliche Antriebsleistung jedes einzelnen Hilfsaggregates zu ermitteln, was meistens auf dem Prüfstand durch Versuch erfolgt.

Zu berücksichtigen sind Antriebsleistungen für

- Spülgebläse,
- Überlader (meist als ein Aggregat vorhanden),
- Schmierstoffdruckpumpen,
- Schmierstoffsaugpumpen,
- Schmierstoffleckpumpen,
- Kühlstoffpumpe,
- Brennstoffförderpumpen,
- Einspritzpumpen (bei Dieseln),
- Druckölpumpen für Brennstoffregler und Luftschraubenregler,
- Generatoren (nur bei Zündermotoren Erfassung notwendig) usw.

Die Trennung des Erfassungsbereiches zwischen  $\eta_m$  einerseits und  $\eta_h$  andererseits liegt entweder an der Kuppelstelle des Aggregates, oder aber z. B. bei Öl- und Wasserpumpen werden die reinen Lager-

reibungen usw. zu  $\eta_m$  gezogen, während unter  $\eta_h$  die reine Pumparbeit erfährt wird. Hier ist noch zu sagen, daß weitgehendste Vereinfachung der Getriebe, Verwendung von Stirn- statt Kegelzahnradern, Verwendung von Wälz- statt Gleitlager in Anbetracht des geringeren Reibungswiderstandes beachtlich viel Leistungsverlustersparnisse ermöglichen.

Durch Multiplikation der einzelnen Wirkungsgrade, bezogen auf die Nutzleistung des Motors, wird dann der Gesamtumsetzungsgrad  $\eta_h$  erhalten.

$$\eta_h = \frac{\text{Nutzleistung}}{\text{Leistung an der Kurbelwelle abgezogen [Reibungsverlust]}}$$

Nach der Berücksichtigung des letzten Wirkungsgrades  $\eta_h$  erhält man schließlich durch Zusammenfassung den Gesamt-Motorwirkungsgrad.

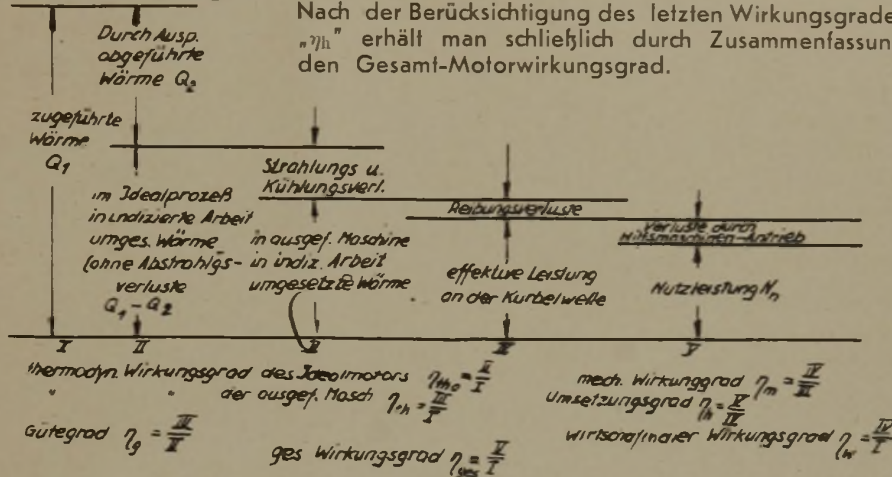


Abb. 16: Diagramm zur Veranschaulichung der Motorwirkungsgrade

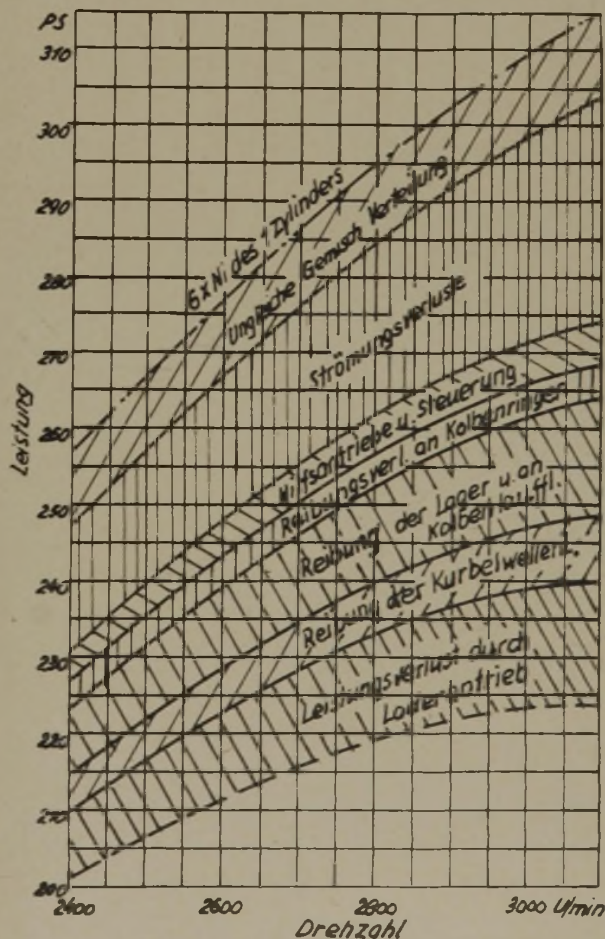


Abb. 17: Innere Verluste eines C-Zylinder-Reihenmotors



9.  $\eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_h$  (Abb. 16)

Man kann bei modernen Flugmotoren innerhalb ihres wirtschaftlichsten Arbeitsbereiches mit etwa 28% beim Ottomotor — was einem Wärmeverbrauch von  $\sim 2200$  kcal/PSeh entspricht, und etwa 34 ÷ 37% beim Dieselmotor — was einem Wärmeverbrauch von 1850 ÷ 1700 kcal/PSh entspricht — rechnen (Abb. 17), was natürlich nur als ungefähre Anhalt gelten kann.

### Zusammenfassung

Die Bedeutung des Motorgesamtwirkungsgrades ist wohl jedem Flugmotorenkonstrukteur hinreichend bekannt. Aus wie vielen einzelnen Faktoren er sich jedoch aufbaut, wieviel Funktionen hier eine Rolle spielen und wie weit die gegenseitige Beeinflussung erfolgt, ist in den wenigsten Fällen immer klar und übersichtlich. Das beweist die Tatsache, daß oft bei untergeordnet erscheinenden Bauteilen nutzlos verbraucht wird, was an wichtigeren Stellen mit Mühe erreicht wurde. Es erhebt sich nun die Frage, ob es möglich ist, den heute erreichten Wirkungsgrad noch wesentlich zu verbessern.

Wenn man den von Otto in seinem ersten Verbrennungsmotor erreichten Wirkungsgrad mit dem heutigen vergleicht, so scheint eine weitere Erhöhung möglich. Praktisch ist diese Verbesserung aber fast

ausschließlich durch konstruktive Kleinarbeit herbeigeführt, während die Verluste, die durch den Kreisprozeß bedingt sind, ganz unwesentlich verringert werden konnten. Auf Grund der umfangreichen Forschungsarbeit ist es im Laufe der Jahre in weitem Maße gelungen, das Wesen der Verbrennungskraftmaschine und ihre Ausnutzungsmöglichkeit zu ergründen. Man wird daher kaum mit großen Überraschungen rechnen können. Es wird auch weiterhin zäher Konstruktionskleinarbeit vorbehalten bleiben, durch immer weitere Verfeinerung und Erfassung aller bisher noch verschenkten Energieverluste zu nutzbarer Arbeit eine allmähliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrades zu erreichen.

### Schrifttumsnachweis

- (1) AHR. Fedden, Bristol (England), „Die Entwicklung der Einschlebersteuerung bei Flugmotoren“.
- (2) Pagazzi, Turin, „Beitrag zur Frage des Höhenverhaltens von Flugmotoren“.
- (3) Luftwissen, Bd. 4, Juni 37, S. 167, „Dieselmotoren-Forschung“.
- (4) Otto Kurz, Berlin-Adlershof, „Forschungsaufgaben und Gestaltungsfragen bei Steigerung der Triebwerksleistung“, aus Luftwissen, Bd. 4, N. 4, 37.
- (5) H. Dubbel, „Taschenbuch für Maschinenbau, Bd. II“.
- (6) Harry R. Ricardo, „Schnelllaufende Verbrennungsmaschinen“.
- (7) Pye D. „Die Brennkraftmaschine“.

## Elektronenoptik\*)

Von Prof. Dr. O. Scherzer, Technische Hochschule Darmstadt

### A. In welcher Hinsicht sind Elektronenstrahlen den Lichtstrahlen überlegen?

Elektronenoptik ist die Anwendung der aus der Optik geläufigen Betrachtungsweise auf Strahlengänge von Elektronen. Die Elektronen, die leichtesten elektrisch geladenen Teilchen, die wir in der Natur kennen, sind trotz ihrer Kleinheit im Laufe der letzten Jahrzehnte zu vertrauten Helfern des Elektrotechnikers und Physikers geworden. In der Röntgenröhre tragen sie den Strom, in der Röntgenröhre erzeugen sie bei ihrer Abbremsung die wirksame Strahlung, und in den Leuchtröhren regen sie die Gasmoleküle durch Stöße zur Lichtaussendung an. Seit man gelernt hat, geordnete Strahlengänge von Elektronen herzustellen, treten die Elektronenstrahlen auf verschiedenen Gebieten mit dem Licht in Wettbewerb, und sie haben uns eine Reihe von Wünschen erfüllt, die die Lichtoptik übriggelassen hatte.

Ein solcher Wunsch war beispielsweise das Fernsehen. Wenn ein Bild durch Funk oder über Kabel übertragen werden soll, müssen Punkt für Punkt die Helligkeit des Bildes übertragen und die einzelnen Helligkeitswerte wieder zusammengesetzt werden. Damit

bei einem bewegten Bild unser Auge den Betrug nicht merkt, müssen in der Sekunde mindestens 25 Bilder zu je 400 000 Bildpunkten übertragen werden. Das gibt also 10 Millionen Bildpunkte, die in einer Sekunde abgetastet, übertragen und im Empfangsgerät wieder zu Bildern zusammengesetzt werden müssen. Optische Geräte sind außerstande, dieses Tempo zu bewältigen. Prismen, Spiegel, Linsen würden lieber in Trümmer gehen, als eine so rasche Bewegung mitzumachen.

Anders ist es, wenn man Elektronen als abbildende Strahlen verwendet. Wenn ein Elektronenstrahl zwischen zwei Platten durchgeschickt wird, die gegeneinander elektrisch geladen sind, so wird er, da die Elektronen negative Ladung tragen, von der positiven Platte angezogen und dadurch aus seiner Richtung abgelenkt (Abb. 1). Man braucht also nur eine Wechselspannung hinreichend hoher Frequenz an die Platten zu legen, und schon pendelt der Strahl in raschem Rhythmus hin und her. Der erste Vorzug der Elektronenstrahlen gegenüber den Lichtstrahlen ist daher: der Strahlengang läßt sich rascher ändern.

Ein zweiter, noch älterer Wunsch der Menschheit ist es, zu sehen, ohne gesehen zu werden. Seit die Tarnkappe verlorengegangen ist, gibt es hierzu nur die eine Möglichkeit, daß man im Dunkeln den betrachteten Gegenstand mit unsichtbaren Lichtstrahlen be-

\*) Auszug aus einem am 18. November 1938 im Haus der Technik, Essen, gehaltenen Vortrag. Mit den beiden nachfolgenden Aufsätzen beenden wir die Veröffentlichung der Vorträge der Naturwissenschaftlichen Vortragsreihe 1938/39 des Hauses der Technik, Essen. Die Schriftleitung.



leuchtet und das von dem Gegenstand reflektierte Licht irgendwie sichtbar macht. Bei ultraviolettem Licht ist dies durch Verwendung geeigneter Leuchtschirme

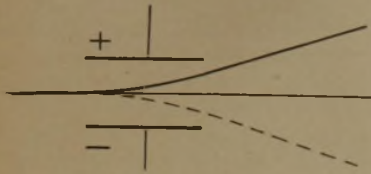


Abb. 1: Ablenkung eines Elektronenstrahls

möglich. Bei ultrarotem Licht dagegen reicht die Energie der Lichtquanten nicht aus, um einen Leuchtschirm zu sichtbarem Leuchten anzuregen. Die Ultrarot-Photographie, die ja das Problem im Grunde löst, und die dadurch schon manches spiritistische Medium zum Berufswechsel veranlaßt hat, zeigt das Bild erst nach Abschluß der photographischen Entwicklung, also mit erheblicher Verspätung. Hier kann wieder die Elektronenoptik zeitsparend eingreifen.

Die Schwierigkeit, daß die Energie eines Strahls sich mit keinen Mitteln nachträglich erhöhen läßt, besteht bei Elektronenstrahlen nicht. Man braucht daher nur das energiearme ultrarote Licht auf eine geeignet vorbereitete, sehr dünne Metallfolie auffallen zu lassen, so daß von ihr nach beiden Seiten Elektronen ausgesandt werden. Bringt man hinter die Folie einen positiv aufgeladenen Leuchtschirm (Abb. 2), so fliegen die Elektronen auf ihn zu. Dabei gewinnen sie aus dem elektrischen Feld so viel Energie, daß sie mit Leichtigkeit den Leuchtschirm zu sichtbarem Leuchten anregen können. Da die Elektronen sehr rasch fliegen, richtet sich die Helligkeit des Leuchtschirms nahezu trägeheitslos nach der Intensität des auf die Folie auf-

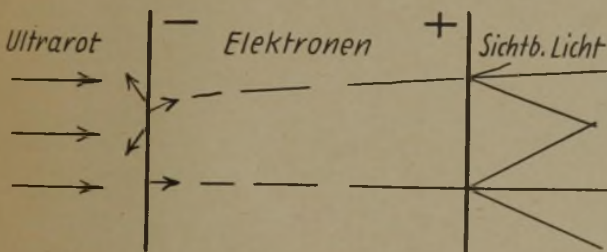


Abb. 2: Nachweis von ultrarotem Licht

treffenden unsichtbaren Lichtes; wir haben also das energiearme ultrarote Licht in sichtbares Licht „verwandelt“. Man erkennt somit als zweiten Vorzug der Elektronen gegenüber dem Licht: ihre Energie läßt sich vermehren.

Ein dritter Wunsch der Menschheit ist ebenfalls sehr alt: Gegenstände sollen auch dann genau gesehen werden können, wenn sie sehr klein sind. Die Lichtoptik hat durch Lupe und Mikroskop diesen Wunsch lange Zeit befriedigt. Als man aber erkannte, daß die unvermeidliche Beugung des Lichtes die Form von Gegenständen, die kleiner als die Lichtwellenlänge sind, verschleiert, da mischte sich in den Dank an die Lichtoptik ein kleines Gefühl der Unzufriedenheit. Als man überdies vermutete, daß die Größe vieler Krankheitserreger knapp unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze der besten Lichtmikroskope liegt, wurde der Wunsch nach Abhilfe immer dringender.

Der Ausweg wurde gewiesen durch die Erkenntnis, daß sich Elektronenstrahlen durch elektrische und magnetische Felder in gleicher Weise beeinflussen lassen, wie Lichtstrahlen durch Linsen, und daß es insbesondere möglich ist, Abbildungen mit Elektronenstrahlen hervorzurufen. Da bei den Elektronenstrahlen Beugungserscheinungen eine viel geringere Rolle spielen als beim Licht, lassen sich auch Gegenstände

von weniger als ein zehntausendstel Millimeter Ausdehnung mit Elektronenstrahlen noch formgetreu abbilden. Es ergibt sich daher als dritter Vorzug: Elektronenstrahlen zeigen geringere Beugung.

Leider stehen den Vorzügen der Elektronenstrahlen schwere Nachteile gegenüber. Der schwerwiegendste Nachteil ist die starke Absorption beim Durchgang durch Luft. Sie ist der Grund dafür, daß die Wunder der Elektronen sich immer nur in ausgedehnten Röhren abspielen, und daß die Elektronenstrahlengänge immer nur als kurzes Zwischenglied zwischen Licht-Strahlengängen in Betracht kommen.

## B. Die Elektronenlinse

Die Wirkungsweise einer Elektronenlinse ist in Abb. 3 erläutert. Das elektrische oder magnetische Feld, das durch geeignete Spannungen oder Ströme aufrechterhalten wird, wirkt in solcher Weise auf die Elektronen ein, daß die von einem bestimmten Punkt der Objektebene ausgehenden Elektronenstrahlen sich wieder in einem bestimmten Punkt der Bildebene vereinigen. Schon 1926 hat H. Busch rechnerisch gezeigt, daß die Herstellung von Feldern, die dieses Kunststück fertigbringen, gar nicht besonders schwierig ist: jedes rotations-symmetrische elektrische oder magnetische Feld, dessen Achse frei von Leitern ist, übt auf Elektronenstrahlen die gewünschte Wirkung aus.

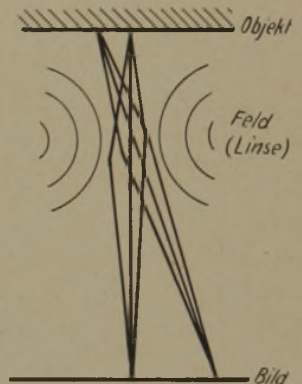


Abb. 3: Wirkungsweise einer Elektronenlinse. Dünn gezeichnet: elektrische oder magnetische Kraftlinien. Dick gezeichnet: Elektronenbahnen

Die praktische Ausführung der Linsen richtet sich nach den Ansprüchen, die sie zu erfüllen haben. Für manche Zwecke ist schon ein homogenes Magnetfeld ausreichend. In anderen Fällen genügt das Magnetfeld eines einzelnen Drahttringes oder das elektrische Feld eines senkrecht zu den Platten durchbohrten Plattenkondensators. Bei höheren Ansprüchen werden die stromführenden Drahtwindungen magnetischer Linsen in Eisen gekapselt und die Form der Eisenkapselung wird sorgfältig ausgewählt; bei elektrischen Linsen wendet sich das Augenmerk vor allem der Formgebung der Metallteile zu, zwischen denen sich das elektrische Feld ausbilden soll. Je weiter die Elektronenoptik fortschreitet, desto mehr wird die Frage der Gestaltung und Justierung der Elektronenlinsen in den Vordergrund rücken.

## C. Einige Anwendungen

Eine der einfachsten Anwendungen der Elektronenoptik erhalten wir dadurch, daß man in Abb. 2 zwischen Folie und Leuchtschirm eine Elektronenlinse bringt, die ein auf der Metallfolie entworfenes Lichtbild vermöge der lichtelektrisch ausgelösten Elektronen auf den Leuchtschirm abbildet. Man hat dann einen Bildwandler vor sich als ein Gerät, das ein von ultraroten Strahlen entworfenes Bild in ein sichtbares Bild umwandelt.

Bringt man zwischen Linse und Leuchtschirm eines Bildwandlers noch zwei Paare von Ablenkplatten, und bohrt man in die Mitte des Schirmes ein enges Loch,



9.  $\eta_{ges} = \eta_{th} \cdot \eta_m \cdot \eta_h$  (Abb. 16)

Man kann bei modernen Flugmotoren innerhalb ihres wirtschaftlichsten Arbeitsbereiches mit etwa 28% beim Ottomotor — was einem Wärmeverbrauch von  $\sim 2200$  kcal/PS<sub>eh</sub> entspricht, und etwa 34  $\div$  37% beim Dieselmotor — was einem Wärmeverbrauch von 1850  $\div$  1700 kcal/PS<sub>h</sub> entspricht — rechnen (Abb. 17), was natürlich nur als ungefähre Anhalt gelten kann.

### Zusammenfassung

Die Bedeutung des Motorgesamtwirkungsgrades ist wohl jedem Flugmotorenkonstrukteur hinreichend bekannt. Aus wie vielen einzelnen Faktoren er sich jedoch aufbaut, wieviel Funktionen hier eine Rolle spielen und wie weit die gegenseitige Beeinflussung erfolgt, ist in den wenigsten Fällen immer klar und übersichtlich. Das beweist die Tatsache, daß oft bei untergeordnet erscheinenden Bauteilen nutzlos verbraucht wird, was an wichtigeren Stellen mit Mühe erreicht wurde. Es erhebt sich nun die Frage, ob es möglich ist, den heute erreichten Wirkungsgrad noch wesentlich zu verbessern.

Wenn man den von Otto in seinem ersten Verbrennungsmotor erreichten Wirkungsgrad mit dem heutigen vergleicht, so scheint eine weitere Erhöhung möglich. Praktisch ist diese Verbesserung aber fast

ausschließlich durch konstruktive Kleinarbeit herbeigeführt, während die Verluste, die durch den Kreisprozeß bedingt sind, ganz unwesentlich verringert werden konnten. Auf Grund der umfangreichen Forschungsarbeit ist es im Laufe der Jahre in weitem Maße gelungen, das Wesen der Verbrennungskraftmaschine und ihre Ausnutzungsmöglichkeit zu ergründen. Man wird daher kaum mit großen Überraschungen rechnen können. Es wird auch weiterhin zäher Konstruktionskleinarbeit vorbehalten bleiben, durch immer weitere Verfeinerung und Erfassung aller bisher noch verschenkten Energieverluste zu nutzbarer Arbeit eine allmähliche Steigerung des Gesamtwirkungsgrades zu erreichen.

### Schriftumsnachweis

- (1) AHR. Fedden, Bristol (England), „Die Entwicklung der Einschlebersteuerung bei Flugmotoren“.
- (2) Pagazzi, Turin, „Beitrag zur Frage des Höhenverhaltens von Flugmotoren“.
- (3) Luftwissen, Bd. 4, Juni 37, S. 167, „Dieselmotoren-Forschung“.
- (4) Otto Kurz, Berlin-Adlershof, „Forschungsaufgaben und Gestaltungsfragen bei Steigerung der Triebwerksleistung“, aus Luftwissen, Bd. 4, N. 4, 37.
- (5) H. Dubbel „Taschenbuch für Maschinenbau, Bd. II“.
- (6) Harry R. Ricardo „Schnelllaufende Verbrennungsmaschinen“.
- (7) Pye D. „Die Brennkraftmaschine“.

## Elektronenoptik\*

Von Prof. Dr. O. Scherzer, Technische Hochschule Darmstadt

### A. In welcher Hinsicht sind Elektronenstrahlen den Lichtstrahlen überlegen?

Elektronenoptik ist die Anwendung der aus der Optik geläufigen Betrachtungsweise auf Strahlengänge von Elektronen. Die Elektronen, die leichtesten elektrisch geladenen Teilchen, die wir in der Natur kennen, sind trotz ihrer Kleinheit im Laufe der letzten Jahrzehnte zu vertrauten Helfern des Elektrotechnikers und Physikers geworden. In der Radoröhre tragen sie den Strom, in der Röntgenröhre erzeugen sie bei ihrer Abbremsung die wirksame Strahlung, und in den Leuchtröhren regen sie die Gasmoleküle durch Stöße zur Lichtaussendung an. Seit man gelernt hat, geordnete Strahlengänge von Elektronen herzustellen, treten die Elektronenstrahlen auf verschiedenen Gebieten mit dem Licht in Wettbewerb, und sie haben uns eine Reihe von Wünschen erfüllt, die die Lichtoptik übriggelassen hatte.

Ein solcher Wunsch war beispielsweise das Fernsehen. Wenn ein Bild durch Funk oder über Kabel übertragen werden soll, müssen Punkt für Punkt die Helligkeit des Bildes übertragen und die einzelnen Helligkeitswerte wieder zusammengesetzt werden. Damit

bei einem bewegten Bild unser Auge den Betrug nicht merkt, müssen in der Sekunde mindestens 25 Bilder zu je 400 000 Bildpunkten übertragen werden. Das gibt also 10 Millionen Bildpunkte, die in einer Sekunde abgetastet, übertragen und im Empfangsgerät wieder zu Bildern zusammengesetzt werden müssen. Optische Geräte sind außerstande, dieses Tempo zu bewältigen. Prismen, Spiegel, Linsen würden lieber in Trümmer gehen, als eine so rasche Bewegung mitzumachen.

Anders ist es, wenn man Elektronen als abbildende Strahlen verwendet. Wenn ein Elektronenstrahl zwischen zwei Platten durchgeschickt wird, die gegeneinander elektrisch geladen sind, so wird er, da die Elektronen negative Ladung tragen, von der positiven Platte angezogen und dadurch aus seiner Richtung abgelenkt (Abb. 1). Man braucht also nur eine Wechselspannung hinreichend hoher Frequenz an die Platten zu legen, und schon pendelt der Strahl in raschem Rhythmus hin und her. Der erste Vorzug der Elektronenstrahlen gegenüber den Lichtstrahlen ist daher: der Strahlengang läßt sich rascher ändern.

Ein zweiter, noch älterer Wunsch der Menschheit ist es, zu sehen, ohne gesehen zu werden. Seit die Tarnkappe verlorengegangen ist, gibt es hierzu nur die eine Möglichkeit, daß man im Dunkeln den betrachteten Gegenstand mit unsichtbaren Lichtstrahlen be-

\*) Auszug aus einem am 18. November 1938 im Haus der Technik, Essen, gehaltenen Vortrag. Mit den beiden nachfolgenden Aufsätzen beenden wir die Veröffentlichung der Vorträge der Naturwissenschaftlichen Vortragsreihe 1938/39 des Hauses der Technik, Essen. Die Schriftleitung.



leuchtet und das von dem Gegenstand reflektierte Licht irgendwie sichtbar macht. Bei ultraviolettem Licht ist dies durch Verwendung geeigneter Leuchtschirme möglich. Bei ultrarotem Licht dagegen reicht die Energie der Lichtquanten nicht aus, um einen Leuchtschirm zu sichtbarem Leuchten anzuregen. Die Ultrarot-Photographie, die ja das Problem im Grunde löst, und die dadurch schon manches spiritistische Medium zum Berufswechsel veranlaßt hat, zeigt das Bild erst nach Abschluß der photographischen Entwicklung, also mit erheblicher Verspätung. Hier kann wieder die Elektronenoptik zeitsparend eingreifen.

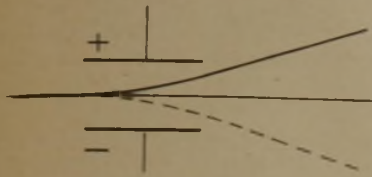


Abb. 1: Ablenkung eines Elektronenstrahls

Die Schwierigkeit, daß die Energie eines Strahls sich mit keinen Mitteln nachträglich erhöhen läßt, besteht bei Elektronenstrahlen nicht. Man braucht daher nur das energiearme ultrarote Licht auf eine geeignet vorbereitete, sehr dünne Metallfolie auffallen zu lassen, so daß von ihr nach beiden Seiten Elektronen ausgesandt werden. Bringt man hinter die Folie einen positiv aufgeladenen Leuchtschirm (Abb. 2), so fliegen die Elektronen auf ihn zu. Dabei gewinnen sie aus dem elektrischen Feld so viel Energie, daß sie mit Leichtigkeit den Leuchtschirm zu sichtbarem Leuchten anregen können. Da die Elektronen sehr rasch fliegen, richtet sich die Helligkeit des Leuchtschirms nahezu trägeheitslos nach der Intensität des auf die Folie auf-

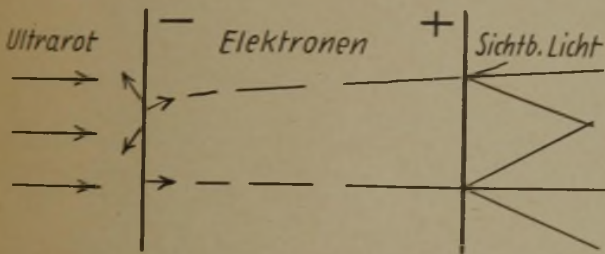


Abb. 2: Nachweis von ultrarotem Licht

treffenden unsichtbaren Lichtes; wir haben also das energiearme ultrarote Licht in sichtbares Licht „verwandelt“. Man erkennt somit als zweiten Vorzug der Elektronen gegenüber dem Licht: ihre Energie läßt sich vermehren.

Ein dritter Wunsch der Menschheit ist ebenfalls sehr alt: Gegenstände sollen auch dann genau gesehen werden können, wenn sie sehr klein sind. Die Lichtoptik hat durch Lupe und Mikroskop diesen Wunsch lange Zeit befriedigt. Als man aber erkannte, daß die unvermeidliche Beugung des Lichtes die Form von Gegenständen, die kleiner als die Lichtwellenlänge sind, verschleiert, da mischte sich in den Dank an die Lichtoptik ein kleines Gefühl der Unzufriedenheit. Als man überdies vermutete, daß die Größe vieler Krankheitserreger knapp unterhalb der Sichtbarkeitsgrenze der besten Lichtmikroskope liegt, wurde der Wunsch nach Abhilfe immer dringender.

Der Ausweg wurde gewiesen durch die Erkenntnis, daß sich Elektronenstrahlen durch elektrische und magnetische Felder in gleicher Weise beeinflussen lassen, wie Lichtstrahlen durch Linsen, und daß es insbesondere möglich ist, Abbildungen mit Elektronenstrahlen hervorzurufen. Da bei den Elektronenstrahlen Beugungserscheinungen eine viel geringere Rolle spielen als beim Licht, lassen sich auch Gegenstände

von weniger als ein zehntausendstel Millimeter Ausdehnung mit Elektronenstrahlen noch formgetreu abbilden. Es ergibt sich daher als dritter Vorzug: Elektronenstrahlen zeigen geringere Beugung.

Leider stehen den Vorzügen der Elektronenstrahlen schwere Nachteile gegenüber. Der schwerwiegende Nachteil ist die starke Absorption beim Durchgang durch Luft. Sie ist der Grund dafür, daß die Wunder der Elektronen sich immer nur in ausgepumpten Röhren abspielen, und daß die Elektronenstrahlengänge immer nur als kurzes Zwischenglied zwischen Licht-Strahlengängen in Betracht kommen.

## B. Die Elektronenlinse

Die Wirkungsweise einer Elektronenlinse ist in Abb. 3 erläutert. Das elektrische oder magnetische Feld, das durch geeignete Spannungen oder Ströme aufrechterhalten wird, wirkt in solcher Weise auf die Elektronen ein, daß die von einem bestimmten Punkt der Objektebene ausgehenden Elektronenstrahlen sich wieder in einem bestimmten Punkt der Bildebene vereinigen. Schon 1926 hat H. Busch rechnerisch gezeigt, daß die Herstellung von Feldern, die dieses Kunststück fertigbringen, gar nicht besonders schwierig ist; jedes rotations-

symmetrische elektrische oder magnetische Feld, dessen Achse frei von Leitern ist, übt auf Elektronenstrahlen die gewünschte Wirkung aus.

Die praktische Ausführung der Linsen richtet sich nach den Ansprüchen, die sie zu erfüllen haben. Für manche Zwecke ist schon ein homogenes Magnetfeld ausreichend. In anderen Fällen genügt das Magnetfeld eines einzelnen Drahttringes oder das elektrische Feld eines senkrecht zu den Platten durchbohrten Plattenkondensators. Bei höheren Ansprüchen werden die stromführenden Drahtwindungen magnetischer Linsen in Eisen gekapselt und die Form der Eisenkapselung wird sorgfältig ausgewählt; bei elektrischen Linsen wendet sich das Augenmerk vor allem der Formgebung der Metallteile zu, zwischen denen sich das elektrische Feld ausbilden soll. Je weiter die Elektronenoptik fortschreitet, desto mehr wird die Frage der Gestaltung und Justierung der Elektronenlinsen in den Vordergrund rücken.

## C. Einige Anwendungen

Eine der einfachsten Anwendungen der Elektronenoptik erhalten wir dadurch, daß man in Abb. 2 zwischen Folie und Leuchtschirm eine Elektronenlinse bringt, die ein auf der Metallfolie entworfenes Lichtbild vermöge der lichtelektrisch ausgelösten Elektronen auf den Leuchtschirm abbildet. Man hat dann einen Bildwandler vor sich als ein Gerät, das ein von ultraroten Strahlen entworfenes Bild in ein sichtbares Bild umwandelt.

Bringt man zwischen Linse und Leuchtschirm eines Bildwandlers noch zwei Paare von Ablenkplatten, und bohrt man in die Mitte des Schirmes ein enges Loch,

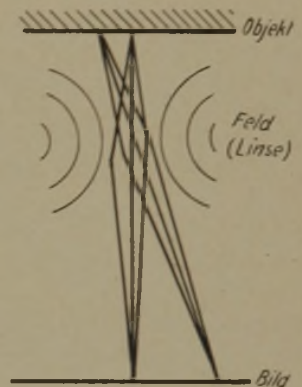


Abb. 3: Wirkungsweise einer Elektronenlinse. Dünn gezeichnet: elektrische oder magnetische Kraftlinien. Dick gezeichnet: Elektronenbahnen



so entsteht ein Bildzerleger (Abb. 4). Der Vorgang, der ferngesehen werden soll, wird von links her auf die Metallfolie F projiziert. Die dadurch aus der Folie nach rechts herausgeworfenen Elektronen

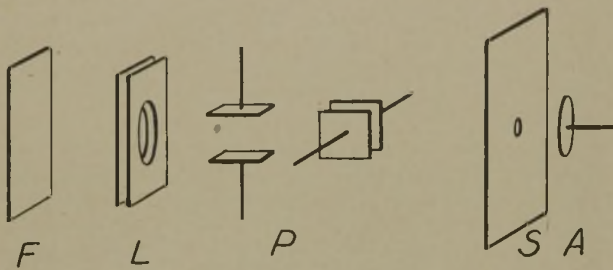


Abb. 4: Bildzerleger

übertragen unter der Wirkung der Elektronenlinse L das Bild auf den Schirm S. Werden an die Ablenkplatten P geeignete Wechselspannungen gelegt, so wandert das Bild in rascher Folge auf dem Schirm S auf und ab und hin und her. Helle und dunkle Stellen des Bildes fallen so in raschem Wechsel durch die Öffnung des Schirmes S und rufen in dem Auffänger A elektrische Schwankungen hervor. Diese Schwankungen lassen sich in üblicher Weise verstärken, durch Funk übertragen und im Empfangsgerät wieder zu einem Bild zusammensetzen.

Die bekannteste und vielleicht für die Zukunft fruchtbarste Anwendung der Elektronenoptik ist das Elektronenmikroskop. Es besteht aus einer oder mehreren Elektronenlinsen, die so angeordnet sind, daß möglichst hohe Vergrößerungen erreicht werden. Das Elektronenbild wird entweder auf einen Leuchtschirm oder unmittelbar auf die photographische Platte geworfen. Als Objekte kommen vor allem solche Dinge in Betracht, die sich mit dem Lichtmikroskop nicht oder nur schwer beobachten lassen; also etwa glühende Metallflächen, deren Nachbarschaft Glaslinsen schlecht bekommen würde, oder Objekte, die so klein sind, daß sie wegen der schon erwähnten Beugungserscheinungen im Lichtmikroskop nicht mehr scharf gesehen werden können. Bei der Umwandlung von  $\alpha$ - in  $\gamma$ -Eisen bei  $900^\circ\text{C}$ , wie sie von W. G. Burgers und J. A. Ploos van Amstel aufgenommen wurde<sup>1)</sup>, sieht man deutlich, wie zwischen zwei kurz nacheinander erfolgten Aufnahmen die Umkristallisation fortgeschritten ist. Die Metalloberfläche war dabei in solcher Weise mit Strontium vorbehandelt,

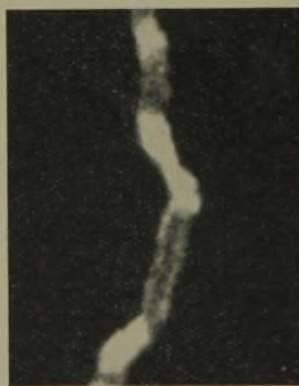


Abb. 5: Eisenfaden von ein zehntausendstel Millimeter Dicke

<sup>1)</sup> W. G. Burgers und J. J. A. Ploos van Amstel, Physica 4, 15, 1937.

daß sie bei der Versuchstemperatur die zur Abbildung nötigen Elektronen selbst aussandte. Im Gegensatz hierzu ist bei der Abbildung kalter Gegenstände die Bestrahlung mit Elektronen notwendig. Abb. 5 zeigt einen Eisenfaden, wie er in Analogie zur Bildung von Rauhreif entsteht, wenn sich Eisendampf niederschlägt. Man erkennt darauf einzelne helle und dunkle Stellen, die nur ein hunderttausendstel Millimeter voneinander entfernt sind. Das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops ist also durch diese Aufnahme, die D. Beischer und F. Krause mit einer Linse von E. Ruska gewonnen haben<sup>2)</sup>, um mindestens einen Faktor 50 geschlagen. Weitreichende Anwendungsmöglichkeiten des Elektronenmikroskops kündigen sich in Bild 6 an; im Lichtmikroskop nicht sichtbare Krank-

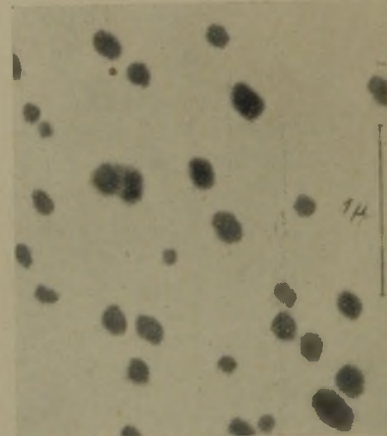


Abb. 6: Virus der infektiösen Ektromelie der Maus

heitserreger sind von B. v. Borries und E. und H. Ruska auf ein dünnes Kollodiumhäutchen aufgebracht und mit dem magnetischen Elektronenmikroskop abgebildet worden<sup>3)</sup>. Wenn es auch in solcher Weise nicht möglich sein dürfte, lebende Zellen abzubilden, so dürfen wir doch von der Fortsetzung dieser Untersuchungen eine gewaltige Bereicherung unserer biologischen und medizinischen Kenntnisse erwarten. Von besonderer Bedeutung ist die Frage, ob sich der Verbesserung des Elektronenmikroskops eines Tages eine ähnlich unüberwindbare Grenze entgegenstellen wird, wie sie die Beugung für das Lichtmikroskop bedeutet. Leider müssen wir diese Frage bejahen. Bei weiterer Verfeinerung der Versuchsbedingungen wird sich auch bei Elektronenstrahlen der Wellencharakter in Form von Beugungserscheinungen bemerkbar machen. Er wird im Bündnis mit dem bei Elektronenlinsen unvermeidbaren Öffnungsfehler dafür sorgen, daß Gegenstände von weniger als etwa 100 Elektronenwellenlängen Ausdehnung im Elektronenmikroskop nicht mehr scharf zu erkennen sind. Immerhin haben Elektronen, die durch eine Spannung von 15 Kilovolt beschleunigt sind, nur eine Wellenlänge von  $10^{-8}$  mm. Man kann also hoffen, daß eines Tages zwar nicht einzelne Atome, aber doch größere Moleküle im Elektronenmikroskop zu sehen sind. Die großen Moleküle der Eiweißstoffe sind es aber gerade, die als Träger des Lebens und des Erbgutes uns heute noch so große Rätsel aufgeben. Es ist daher kaum zu kühn, wenn man vermutet, daß die Elektronenoptik trotz ihrer zahlreichen Erfolge bisher nur einen kleinen Teil ihrer Möglichkeiten erschöpft hat.

<sup>2)</sup> D. Beischer und F. Krause, Naturwissenschaften 25, 825, 1937.

<sup>3)</sup> B. v. Borries, H. und E. Ruska, Klinische Wochenschr. 17, 921, 1938; ZS. d. VDI 82, 937, 1938.



# Geschlecht und Geschlechtsbestimmung im Pflanzen- und Tierreich<sup>\*)</sup>

Prof. Hartmann begann mit dem Satze: „Es ist eine der auffallendsten Erscheinungen in der Welt des Lebendigen, daß die lebenden Körper im Gegensatz zu den anorganischen gewissermaßen in einer zweifachen Ausgabe vorkommen, einer männlichen und einer weiblichen.“ In der Regel geht nur aus der Verschmelzung der Fortpflanzungszellen, der weiblichen Eizelle und männlichen Samenzelle, ein neues Lebewesen hervor. Diese doppelte Garnitur zeigt sich im ganzen Organismenreich. Mit Ausnahme der zellenlosen Bakterien und der Blaualgen hat man sie auch bei den Einzellern, den Algen und Pilzen (Thallophyten) in letzter Zeit nachgewiesen. In manchen Fällen bilden sich auch auf ungeschlechtlichem Wege neue Lebewesen. Vor der Entdeckung der genauen Vorgänge bei der Befruchtung, die in den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts erfolgte, waren bereits etwa 400 Befruchtungs- und Sexualitätshypothesen bekannt. Heute ist der Mechanismus des Entstehens beider Geschlechter geklärt, und wir sind imstande, an Stelle der 400 eine einheitliche Grundtheorie der Sexualität aufzustellen. Diese Möglichkeit danken wir der Forschung der letzten 50 Jahre. Sie bewegte sich hauptsächlich in drei Richtungen. Es wurden angestellt:

- I. vergleichende mikroskopische Untersuchungen tierischer und pflanzlicher Geschlechtszellen;
- II. Experimentaluntersuchungen über die Vererbung des Geschlechts der höheren Pflanzen und Tiere,
- III. entwicklungsphysiologische Studien über die Geschlechtsbestimmung und -vererbung bei Einzellern, Algen und Pilzen.

Die mikroskopischen und Vererbungsversuche haben durch das ganze Tier- und Pflanzenreich hindurch unter Verwendung verschiedener Methoden doch zu den gleichen Grundanschauungen über das Wesen der Sexualität geführt. Die Mannigfaltigkeit der sexuellen Erscheinungen in der ganzen organischen Welt ist bei der Verschiedenheit der Lebewesen außerordentlich groß; zieht man noch die Organe mit heran, die mittelbar oder unmittelbar im Dienste der Sexualität, der Befruchtung oder der Aufzucht der Eier und der Jugendpflege stehen, so findet man sich einem noch viel größeren Tatsachenmaterial gegenüber. Im wesentlichen behandelte aber Prof. Hartmann nicht den Aufbau der mit der Sexualität in Zusammenhang stehenden Organe, die z. B. bei höheren Lebewesen der ganzen Konstitution einschließlich des psychischen Verhaltens das Gepräge geben können, sondern nur die Geschlechtszellen und ihre Produkte. Dies Gebiet ist schon ein höchst ausgedehnte und mannigfaltiges. „Die Geschichte dieser Studien“, sagte Hartmann, „ist ein besonders hervorragendes Beispiel, wie aus scheinbarer Zersplitterung nach weitgehender Spezialisierung in der Biologie doch eine vorzügliche Zusammenschau erwachsen kann.“

Hartmann verwandte in seinem Vortrage eine Anzahl von Begriffen, zu deren Bildung die Erfahrung anregt. Wir gehen sie im einzelnen durch.

<sup>\*)</sup> Nach einem am 28. November 1938 im Haus der Technik, Essen, gehaltenen Vortrag von Prof. Dr. Max Hartmann, zusammengestellt von Dr. Otto Dörner, Essen.

Da Prof. Hartmann über dieses Thema ein Buch in der Sammlung Götschen: „Das Wissen der Welt“, erschienen bei Walter der Gruyter & Co., Berlin, geschrieben hat, können wir aus dem Vortrag nur einen Auszug bringen.

Die Abb. wurden vom Verlag Walter der Gruyter, Berlin, Sammlung Götschen, zur Verfügung gestellt.

## 1. Gameten

Die bei der Befruchtung sich vereinigenden Geschlechtszellen heißen Gameten. Bei Vielzellern kann man deutlich zwei Arten solcher Zellen unterscheiden. Die plasmareichen großen weiblichen Eizellen und die plasmarmen kleinen Samenzellen oder Spermien; bei Pflanzen nennt man die letzteren Pollenkörner oder Spermazoiden, bei Blütenpflanzen Blütenstaub. Die weiblichen Zellen sind unbeweglich, die männlichen beweglich und suchen die weibliche Zelle auf. Es finden sich im Organismenreich aber alle Übergänge bis zur völligen gestaltlichen Gleichheit der Geschlechtszellen.

## 2. Haploid und Diploid

Zellen, die eine einzige Kernfädengarnitur besitzen, heißen Haploide; besitzen sie zwei solche Sätze (Chromosomen), so nennt man sie Diploide. Bei den höheren Tieren und Pflanzen verfügen die einzelnen männlichen und weiblichen Geschlechtszellen über je einen Satz von Kernfäden in den Zellkernen. Diese Chromosomen werden als die hauptsächlichsten Träger der Vererbung angesprochen. Bei der Befruchtung verschmelzen je eine männliche und eine weibliche Geschlechtszelle. Die befruchtete Eizelle hat dann zwei Sätze von Chromosomen, d. h. jedes Chromosom hat im allgemeinen einen gleichen Partner. Alle Körperzellen bilden sich nun bei den höheren Tieren und Pflanzen aus der befruchteten Eizelle durch Teilung. Die einzelnen Chromosomen spalten sich dabei der Länge nach auf. Deshalb wird jede Körperzelle hier zwei Sätze von Chromosomen enthalten. Bei der Fortpflanzung würden also die männlichen und weiblichen Geschlechtszellen auch je zwei Sätze von Chromosomen bekommen. Bei der Verschmelzung wären dann vier vorhanden. Das wird dadurch verhindert, daß bei der Reifung der Geschlechtszellen sogenannte Reduktionsteilungen einsetzen; die beiden Chromosomengarnituren werden in diesem Falle auf zwei Zellen verteilt. Die einzelnen Chromosomen spalten sich nicht. Jede reife Samen- oder Eizelle enthält dann vor der Befruchtung nur einen Satz von

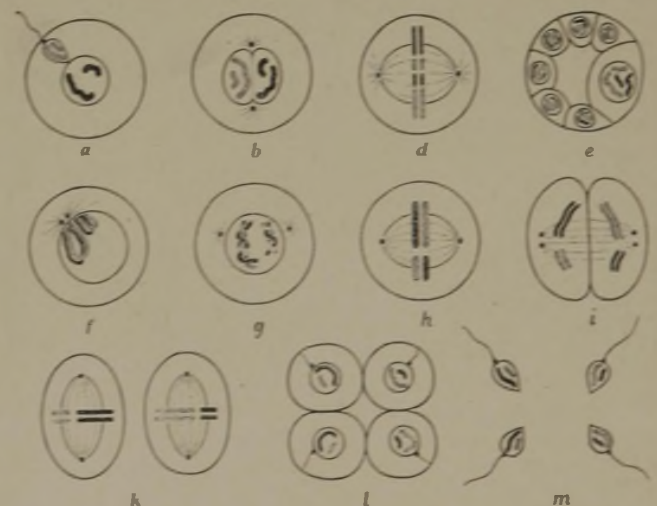


Abb. 1: Schema der Entwicklung und des Kernphasenwechsels eines Diploiden (männliches Metazoon). a, b Befruchtung, Kopulation der haploiden Eizelle mit der haploiden Samenzelle (Kern). c, d Das diploide befruchtete Ei mit 4 Chromosomen (2 Sätzen) teilt sich in viele diploide Zellen, die den tierischen diploiden Organismus aufbauen (große Zelle rechts, Keimbahnzelle). e-k Reifeteilungen. h, i Reduktionsteilung, Verteilung ganzer Chromosomen im 1. Teilungsschritt (Übergang zur Haplophase), 2. Teilung Aquationsteilung. l, m Bildung der Samenzellen.



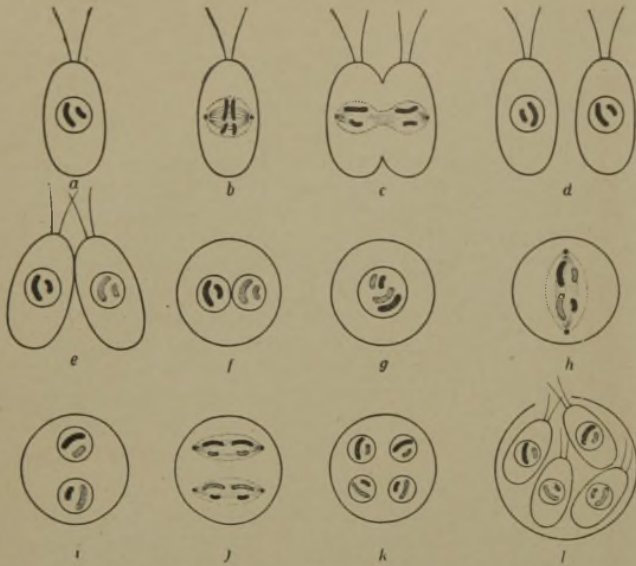


Abb. 2: Schema der Entwicklung und des Kernphasenwechsels von Haplonten (*Chlamydomonas*, Flagellat). a—d Ungeschlechtliche Vermehrung der haploiden vegetativen Individuen, 2 Chromosomen = 1 Satz. e—g Befruchtung, Kopulation zweier haploider Isogameten und Bildung der diploiden Zygote (g) mit 4 Chromosomen (2 Sätze). h—k Reduktionsteilungen, Bildung von 4 haploiden Kernen. Sotofriger Übergang zur Haplophase. l Keimung der 4 haploiden Zoosporen oder Gonien.

Kernfäden (Abb. 1 und 2). Nach der Befruchtung hat also die Eizelle zwei Garnituren von Kernfäden. Bei vielen niederen Pflanzen und Tieren, Algen, Pilzen, Urtieren, haben die Körperzellen nur eine Chromosomgarnitur, also auch die Geschlechtszellen. Bei diesen Lebewesen findet aber eine Reduktionsteilung nach der Befruchtung statt. Deshalb haben hier alle aus der befruchteten Eizelle sich bildenden Körperzellen nur einen Chromosomensatz. Bei den niedrigsten Organismen kann mitunter jede Zelle als Geschlechtszelle funktionieren, bei vielzelligen Algen, Pilzen, Moosen, Blütenpflanzen sowie den vielzelligen Tieren sind besondere Organe vorhanden, in denen sich die Geschlechtszellen bilden.

### 3. Getrenntgeschlechtlichkeit und Gemischtgeschlechtlichkeit

Werden die beiden Arten von Fortpflanzungszellen (männliche und weibliche) von verschiedenen Individuen oder Kulturen gebildet, so liegt Getrenntgeschlechtlichkeit vor. Gehen beide Arten von Geschlechtszellen aus demselben Einzelwesen oder der gleichen Kultur hervor, so spricht man von Gemischtgeschlechtlichkeit oder Zwitterigkeit.

### 4. Erbliche oder nichterbliche Geschlechtsbestimmung

„Wenn man bei getrenntgeschlechtlichen Individuen zeigen kann, daß die Trennung und Bestimmung durch Erbfaktoren erfolgt, die in den Chromosomen liegen, so ist die Geschlechtsbestimmung erblich. Wenn keine besonderen Erbfaktoren für die Entstehung der einzelnen Geschlechtszellen verantwortlich gemacht werden können, sondern äußere oder innere Entwicklungsbedingungen die Art der Geschlechtszellen bestimmen, spricht man von nichterblicher Geschlechtsbestimmung.“ Bei Zwitterigkeit ist die Geschlechtsbestimmung fast immer nichterblich. In der Entwicklungsgeschichte der Lebewesen ist die nichterbliche Geschlechtsbestimmung höchstwahrscheinlich die ursprünglichere, da sie vorwiegend bei den niederen Tieren und Pflanzen auftritt. Im Gegensatz dazu läßt sich bei den höheren Organismen beinahe ausschließlich erbliche Geschlechtsbestimmung nachweisen.

Hartmann gab im ganzen vier Typen der Geschlechtsverteilung und Geschlechtsbestimmung an, zwei erbliche und zwei nichterbliche. Die beiden erblichen sowie die zwei nichterblichen Typen werden je danach unterschieden, ob die Lebewesen einfache oder doppelte Garnitur von Kernfäden besitzen. Während die beiden erblichen Typen starke Unterschiede zeigen, ist das bei den nichterblichen in viel geringem Maße der Fall. Bevor Hartmann auf die Typen genauer einging, widmete er einen kurzen Abschnitt der allgemeinen bipolaren Zweigeschlechtlichkeit. Bei den höheren Tieren und Pflanzen sind die männlichen und weiblichen Geschlechtszellen nach Form, Größe, Beweglichkeit stark unterschieden. Bei den niederen Organismen gibt es Fälle, in denen man äußerlich zwischen den beiden Arten von Geschlechtszellen keine Unterschiede erkennen kann. Dies tritt oft bei Algen und Pilzen ein. Auch dann muß man zwei Sorten als vorhanden annehmen; denn die der einen Art vereinigen sich nicht miteinander, ebensowenig die der anderen, wohl aber kopulieren die Zellen der einen mit denen der anderen. Mitunter gelingt auch die äußere Kenntlichmachung beider Arten. Kultiviert man z. B. bei einem bestimmten Flagellanten die eine Kultur in phosphor- oder stickstoffarmer Lösung, so geht die vorher grüne Farbe des Flagellanten in Rot über. Diese Färbung bleibt längere Zeit erhalten. Bringt man nun solche roten mit grünen Flagellanten zusammen, so vereinigen sich nur die roten mit den grünen. Vielfach, so z. B. bei manchen Algen (*Volvox*), bilden die Lebewesen Kolonien, die einzelnen Lebewesen sind dabei eng miteinander verbunden (Gruppenbildung). Man hat weiter nachgewiesen, daß die beiden verschiedenen Arten von Geschlechtszellen zwei verschiedene Arten von Stoffen ausscheiden. Für die Gruppenbildung und die sexuelle Vereinigung ist das Vorhandensein dieser Stoffe Voraussetzung. Durch Filtrieren kann man diese Stoffe in Lösung gewinnen und mit ihnen experimentieren (Abb. 3).

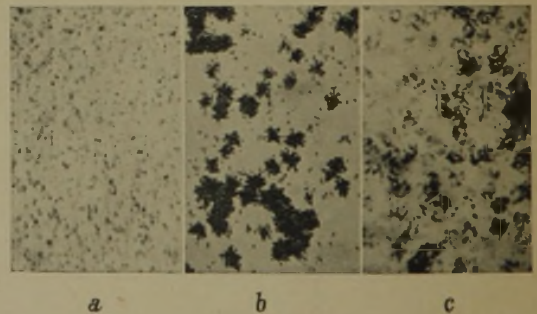


Abb. 3: *Chlamydomonas eugametos* (Phytoplagoellat). a Gameten von einem Geschlecht. b dieselben nach Zufügen der Gameten des andern Geschlechts (= Gameten); normale Gruppenbildung. c Gameten nach Zufügen der Stoffe des andern Geschlechts. Anormale Gruppenbildung (ohne Kopulation) zwischen Gameten desselben Geschlechts. Nach Moewus.

Bei einer bestimmten Flagellantenart konnte man ermitteln, daß die spezifischen Geschlechtsstoffe bei Belichtung mit blauem und violetttem Lichte, das 30 bis 40 Minuten auf die Kulturflüssigkeit wirkte, gebildet werden. Die männlichen Geschlechtszellen müssen dabei länger bestrahlt werden als die weiblichen. Der weibliche und männliche Stoff werden aus der gleichen labilen Vorstufe (V) und der unwirksamen Endstufe (Ko) gebildet.

Der weibliche besteht hier  
aus 3 Teilen V und 1 Teil Ko.  
Der männliche besteht hier  
aus 1 Teil V und 3 Teilen Ko.  
V ist: chemisch Cisrocetindimethylester;  
Ko ist: chemisch Transrocetindimethylester.



Beide sind Carotinoide (gelbe Farbe Karotte). Sie sind bei dieser Art nur in den angegebenen Verhältnissen ein V zu 3 Ko und 3 V zu 1 Ko als Geschlechtsstoffe wirksam und wirken noch bei einer Verdünnung von 1 : 33 Milliarden. Zur Gruppenbildung und Vereinigung der Geschlechtszellen müssen beide Arten von Geschlechtsstoffen vorhanden sein. Während die hier angegebenen Tatsachen für Algen und Pilze erst in der letzten Zeit entdeckt wurden, war für Eier und Samenzellen der Seeigel und Seewürmer das Ausschneiden ähnlicher chemischer Stoffe ins Seewasser schon länger bekannt. Auch hier ermöglichen die unterschiedlichen chemischen Stoffe erst die Befruchtung.

Nach Behandlung der allgemeinen Zweigeschlechtlichkeit ging Prof. Hartmann auf die vier Typen der Geschlechtsbestimmung ein. Er begann mit der erblichen Geschlechtsbestimmung bei Pflanzen und Tieren. Sie liegt vor: „Wenn bestimmte Erbfaktoren, männliche und weibliche Geschlechtsbestimmer, wirksam sind, daß sowohl bei den Geschlechtszellen wie bei den sie bildenden Geschlechtsorganismen in der Regel nur die Eigenschaften des einen Geschlechts zur Entfaltung kommen.“ Zwei Fälle sind zu unterscheiden: Bei Fall 1, der bei vielen Pilzen, Moosen, Algen sowie Urtieren vorliegt, haben die Körperzellen und Geschlechtszellen nur einen Kernfädensatz. Hier tritt die Reduktionsteilung nach der Verschmelzung der Geschlechtszellen ein, der ursprünglich zwittrige Zustand des Organismus wird zerlegt und zur Hälfte Zellen mit männlicher, zur Hälfte mit weiblicher Tendenz gebildet mit je einem Chromosomensatz. Bei den hier behandelten Lebewesen wurde strenge Getrenntgeschlechtlichkeit festgestellt. Aus den Geschlechtszellen gingen durch Teilung zwei und weiter vier Zellen hervor. Aus jeder dieser vier Zellen bildete man nun Einzelkulturen, die durch ungeschlechtliche Vermehrung (Teilung) entstanden. Bei einer bestimmten Volvocinee konnte man so im Laufe von 23 Jahren durch ungeschlechtliche Fortpflanzung 9000mal hintereinander solche ungeschlechtlichen Fortpflanzungsakte beobachten, wobei aus je zwei der vier Zellen weibliche, aus den zwei anderen männliche Lebewesen erhalten wurden. Die männlichen blieben bei immer weiterer Teilung 15 Jahre in ihrer Männlichkeit erhalten. Ein Beweis dafür, daß durch die Reduktionsteilung je zwei Urzellen männlich, je zwei weiblich werden. Eine besonders interessante Tatsache ist nun das Vorhandensein der sogenannten relativen Sexualität. Es zeigt sich, daß bei manchen niederen Lebewesen die Geschlechtszellen des männlichen und des weiblichen Geschlechts verschiedene Stärke haben. So kann sich eine schwach weibliche Geschlechtszelle gegenüber einer stark weiblichen als männlich erweisen, gegenüber einer männlichen als weiblich, das entsprechende gilt von schwach oder stark männlichen Geschlechtszellen. Man muß daher auch bei getrenntgeschlechtlichen Lebewesen eine bisexuelle Potenz, d. h. die Fähigkeit, sich je nach Umständen in der männlichen oder weiblichen Richtung zu entwickeln, annehmen. Diese Erscheinung der relativen Sexualität und der verschiedenen Geschlechtsstärken finden ihre Erklärung in den oben schon erwähnten chemischen Sexualstoffen, die in einem bestimmten Mischungsverhältnis eines Cis- und Transcarotinooids ausgeschieden werden. Eine besondere Gruppe eng verwandter Lebewesen hat nun vier Arten mit erblich verschiedener Geschlechtsstärke. Es läßt sich zeigen, daß für jede Gruppe dies Mischungsverhältnis bei den männlichen und weiblichen Geschlechtszellen verschieden ist (Tabelle 3a). Bildet man die Differenz zwischen den Ciswerten und die Differenz zwischen den Trans-

werten, so erfolgen keine Kopulationen, wenn dies Verhältnis der Differenzen 10:10 beträgt. Bei 20:20 und 30:30 gibt es Vereinigungen, dazu Gruppenbildungen. Bei 40:40 bis 90:90 erfolgt Vereinigung und starke Gruppenbildung (Abb. 3). Je weiter die Geschlechtszellen in der Reihe auseinanderstehen, um so besser gelingt die Vereinigung der Zellen. Diese Tatsache ist ein Beweis, daß die relative Sexualität

	♂ <sup>4</sup>	♀ <sup>2</sup>	♀ <sup>2</sup>	♂ <sup>1</sup>	♂ <sup>1</sup>	♂ <sup>2</sup>	♂ <sup>3</sup>	♂ <sup>4</sup>
cis.....	95	85	75	65	35	25	15	5
trans....	5	15	25	35	65	75	85	95

Abb. 3a:

und die verschiedene Stärke der Männlichkeit oder Weiblichkeit der Geschlechtszellen ihre Erklärung in der Verschiedenheit des Verhältnisses der Cis- und Transcarotinoide findet. Das Verhältnis Cis/Trans ist für jede Art streng erblich bestimmt.

Bei der eben besprochenen ersten Art (Haploide) besitzen die Zellen der Lebewesen nur einen Chromosomensatz. Die Lebewesen sind unmittelbar nach der Befruchtung zwittrig und erst nach der ersten Teilung der befruchteten Geschlechtszellen (Reduktionsteilung) wird die eine von den beiden neuen Zellen Ausgangszelle für ein männliches, die andere Ausgangszelle für ein weibliches Lebewesen. Diese Art kommt im wesentlichen bei niederen Pflanzen und Urtieren vor. Bei der zweiten Art erblicher Geschlechtsbestimmung (Diploide) sind die Zellen mit doppeltem Chromosomensatz versehen, die Reduktionsteilung liegt vor der Befruchtung, nach der Befruchtung ist das Ei bereits als männlich oder weiblich festgelegt. Bei dieser Gruppe von Lebewesen (es sind die meisten höheren Tiere und Pflanzen) gibt es entweder zwei Arten von männlichen Samenzellen und eine Art weiblicher Eizelle oder zwei Arten weiblicher Eizellen und eine Art männlicher Samenzelle. Diese Verhältnisse sind streng erblich. Das männliche bzw. weibliche Geschlecht, das hier zwei Arten von Geschlechtszellen hervorbringt, heißt geschlechtsbestimmend, denn wenn z. B. zwei Arten von Samenzellen erzeugt werden, bildet die eine Art mit dem weiblichen Ei Männchen, die andere Art mit dem weiblichen Ei Weibchen. Ebenso ist es, wenn nur eine Art männlicher Samenzellen und zwei Arten Eizellen produziert werden. Das Verhältnis der männlichen und weiblichen Nachkommen ist im allgemeinen 50:50. Das Schema der Geschlechtsbestimmung zweiter Art gleicht dem Vorgang der Rückkreuzung eines einfachen Bastards mit seinem rezessiven Elter. 50 Prozent der Nachkommen gleichen dort dem Bastard, 50 Prozent dem rezessiven Elter. Die Deutung der Geschlechtsbestimmung zweiter Art läßt sich auf vier verschiedene Tatsachengruppen aufbauen. Es sind dies:

1. Kreuzung zwittriger mit getrenntgeschlechtlichen Blütenpflanzen,
2. das Auftreten der Geschlechtschromosomen und ihr Einfluß auf das Geschlecht;
3. die Erscheinung der Intersexualität (Lebewesen ohne spez. Geschlecht);
4. Konkurrenzversuche der beiden männchen- und weibchenbestimmenden Sorten von Keimzellen.

Diese vier Tatsachengruppen wurden von Hartmann genauer besprochen. Wir geben aus dem Gebiet einen kurzen Auszug:

Zu 1.: Wenn Weibchen der getrenntgeschlechtlichen Zaurübe mit Pollen einer verwandten zwittrigen Art befruchtet werden, sind die Nachkommen alle weiblich. Der getrenntgeschlechtliche Zustand dominiert also über den zwittrigen. Die Weibchen der getrennt-



geschlechtlichen Zaunrübe bilden demnach nur Keimzellen weiblicher Tendenz. Kreuzt man umgekehrt Männchen der Zaunrübe mit Weibchen der verwandten zwitterigen Art, so erhält man gleichviel männliche und weibliche Pflanzen. Also gibt es zwei Arten männlicher Geschlechtszellen bei der getrenntgeschlechtlichen Zaunrübe: die männchenbestimmenden und die weibchenbestimmenden. Bei den männchenbestimmenden Pollenkörnern muß die männliche Tendenz im Samenkern stärker sein als die weibliche der entsprechenden Eizelle. Diese beiden männchen- und weibchenbestimmenden Pollenkörner entstehen durch die Reduktionsteilung. Worin besteht nun der Unterschied der beiden Arten von Pollenkörnern? Zur Beantwortung dieser Frage ziehen wir die Tatsachen des Gebietes 2 heran (Geschlechtschromosome). Die Tiere und Pflanzen, die wir hier besprechen, sind dadurch charakterisiert, daß sie in ihren Zellen zwei Garnituren von Chromosomen besitzen. Bei mikroskopischen Studien der Geschlechtszellen der Insekten entdeckte man, daß diese vor der Reduktionsteilung im männlichen Geschlecht außer einer Anzahl paariger Chromosomen entweder noch ein Chromosom besitzen, das keinen Partner hat, oder daß einem Chromosom ein ungleicher Partner entspricht (Abb. 4). In den weiblichen Zellen sind dann die Chromosomenverhältnisse normal, d. h. jedes Chromosom hat einen gleichartigen Partner. Die Reduktionsteilung, die bei der Reifung der Geschlechtszellen erfolgt, läßt nun Zellen mit je einem Chromosomensatz entstehen. Die Chromosomen werden auf zwei Zellen verteilt. Da aber bei den

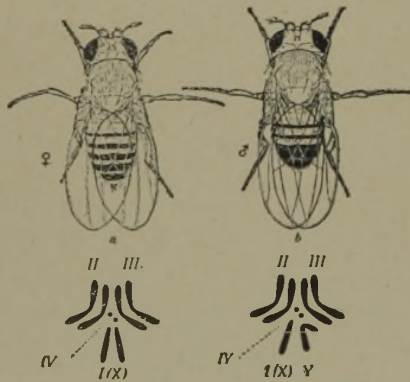


Abb. 4: *Drosophila melanogaster* (Taufliege). a Weibchen, b Männchen; darunter schematisch die weiblichen und männlichen Chromosomenbestände. I Geschlechtschromosomen, II-IV Autosomen. Nach Th. Morgan, Bridges, Sturtevant.

männlichen Zellen vor der Reduktionsteilung außer einer Anzahl von Chromosomenpaaren ein Chromosom vorhanden ist, das keinen Partner hat (XO-Typ) oder das einen ungleichen Partner hat (XY-Typ), so werden bei der Teilung 2 Zellen gebildet, die sich in einem Chromosom unterscheiden. Die eine Zelle hat entweder ein X-Chromosom, die andere keins, oder die eine Zelle ein X-Chromosom, die andere ein Y-Chromosom. Es entstehen also gleichviel männliche Geschlechtszellen des X- und O-Typs resp. des X- und Y-Typs. Die Befruchtung einer weiblichen Zelle durch eine Samenzelle mit X-Chromosom ergibt hier Weibchen. Die Befruchtung einer Samenzelle ohne X-Chromosom oder mit Y-Chromosom Männchen. Während bei Insekten meistens der XO-Fall vorliegt, haben wir bei der Taufliege, *Drosophila melanogaster*, den XY-Typ. Die Taufliege hat eine große Reihe von Erbversuchen, die vor allem von Amerikanern ausgeführt wurden, ermöglicht. Die an das Geschlecht gebundenen Anlagen sind hier im X-Chromosom lokalisiert. Bei manchen Schmetterlingen liegt der Fall vor, daß das Männchen eine Art von Samenzellen, aber das Weibchen zwei Arten von Eizellen erzeugt. Der Typ unterliegt auch dem XO-Schema. In einem Falle konnte man durch Wärme oder Kälte das Verhältnis der Geschlechter zugunsten der Männchen verschieben. Bei stärkerer Erwärmung erhielt man mehr Männchen, auch

wenn die Weibchen längere Zeit an der Eiablage gehindert werden, erhöhte sich die Zahl der Männchens. Für eine Reihe von Blütenpflanzen wurde neuerdings der XY-Typ ebenfalls nachgewiesen.

Zu 3.: Bei der schon erwähnten Taufliege, die Hartmann als Beispiel für Intersexualität wählte, liegen folgende Chromosomenverhältnisse vor: Das männliche Geschlecht zeigt XY-Typ, erzeugt also zwei Arten von Samenzellen, außerdem sind noch zwei große Chromosomenpaare und ein kleines Paar vorhanden. Bei den Zuchten traten nun auch Individuen mit abweichenden Chromosomensätzen auf, in denen entweder die Chromosomensätze vermehrt waren oder nur einzelne Chromosomen. Die Geschlechtsverhältnisse waren dann unnormal. Es bildeten sich Tiere, die männliche und weibliche Geschlechtsmerkmale zugleich aufwiesen (Intersexe). Das weibliche Geschlecht bildet sich, wenn auf jeden gewöhnlichen Chromosomensatz ein X-Chromosom kommt, also auf zwei Chromosomensätze zwei X-Chromosome usw. Es war gleichgültig, ob in den Zellen die ganze Garnitur plus X-Chromosom mehrmals ein- bis viermal vorkam, die Y-Chromosomen beeinflussten das Geschlecht nicht. Wenn aber ein doppelter Chromosomensatz einem X-Chromosom gegenübersteht, so gibt es Männchen. Die Y-Chromosome spielen für die Bestimmung des Geschlechts hier keine Rolle. Das X-Chromosom ist also hier weibchenbestimmend und der sonstige Chromosomensatz Träger der Männchenbestimmung. Man hat den Versuch gemacht, einer Zelle mit einem doppelten Chromosomensatz und einem X-Chromosom, die normalerweise ein Männchen hätte ergeben müssen, ein weiteres X-Chromosom hinzuzufügen, dann ergab sich ein Weibchen. Wenn drei Chromosomensätze zwei X-Chromosomen gegenüberstehen, erhielt man Intersexe. Zwei X-Chromosomen sind also gleich stark geschlechtsbestimmend wie drei Chromosomengarni-



Abb. 5: *Lymantria dispar* (Schwammspanner). Normales Männchen und Weibchen. Nach Goldschmidt.

turen. Wir haben hier den Fall, daß die weibchen- und männchenbestimmenden Faktoren verschieden stark sind. Ähnliche Verhältnisse zeigen sich bei Kreuzung verschiedener Rassen von Schwammspannern (Abb. 5, 6). Man hat japanische und europäische Arten dieses Schmetterlings gekreuzt, die jede für sich normale Geschlechtsverhältnisse zeigen. Bei den Kreuzungen erhielt man neben normalen Einzelwesens Intersexe. Man unterscheidet deshalb schwache und starke männliche und weibliche Rassen. Alle japanischen sind im Beispiel des Schwammspanners starke, alle europäischen schwache Rassen. Die Erscheinung





Abb. 6: Ansteigende Serie intersexueller Weibchen von *L. dispar*. Links oben normales ♀; das letzte Tier zeigt fast rein männliche Charaktere. Nach Goldschmidt.

der verschiedenen Stärke der geschlechtsbestimmenden Faktoren ist wahrscheinlich für alle höheren Lebewesen gültig. Allgemein kann man sagen, in den X-Chromosomen liegen die Auslöser des einen Geschlechts, außerhalb der X-Chromosomen entweder im Y-, oder den anderen Chromosomen oder im Zellplasma liegen, je nach der Art des Lebewesens, die Auslöser des anderen Geschlechts.

#### Zu 4. Konkurrenzversuche

Bei Pflanzen, die zwei Arten von männlichen Geschlechtszellen, aber nur eine Art weiblicher Geschlechtszellen erzeugen, sind öfters die beiden Arten männlicher Geschlechtszellen (Pollen) nicht gleich schnell beim Eindringen in die Eizellen. Nimmt man nun bei solchen Pflanzen Überbestäubung vor, so wird die konkurrenzfähigere Sorte von Samenzellen die Eizellen befruchten, die übrigen gehen leer aus. Bei Unterbestäubung aber werden alle männlichen Zellen zur Befruchtung kommen. Bei Unterbestäubung wird also das Verhältnis der männlichen und weiblichen Nachkommen gleich groß sein, bei Überbestäubung schieben sich oft zugunsten der männlichen oder weiblichen verschoben. Erhöht sich umgekehrt durch Überbestäubung die Zahl der Nachkommen eines Geschlechts, so muß auf das Vorhandensein zweier Arten von männlichen Geschlechtszellen geschlossen werden, die verschieden schnell in die Eizellen eindringen. Versuche dieser Art zeigten z. B. bei der Lichtnelke bei Überbestäubung einen erhöhten Prozentsatz von Weibchen. Hier liegen also zwei Arten von Pollenkörnern vor. Ähnliche Versuche wurden bei Mäusen gemacht. Behandelte man z. B. die Väter mit Alkohol, so wurde die weibchenbestimmende Art der Samenzellen schwerer geschädigt als die männchenbestimmende. Man erhielt einen Überschuss an Männchen. Allgemein kommt es also, will man ein Geschlecht in höherer Anzahl züchten, darauf an, die begünstigenden oder schädigenden Einflüsse festzustellen, die auf die eine Sorte der doppelt vorhandenen Geschlechtszellen des einen Geschlechts begünstigend oder schädigend wirken. Dieser Gedanke könnte für die Tierzucht wertvoll werden.

Nichterbllichkeit der Geschlechtsbestimmung liegt dann vor, wenn die Organismen die Fähigkeit zur Ausbildung beider Arten von Geschlechtszellen in gleicher Entfaltungsmöglichkeit besitzen, aber äußere oder innere Entwicklungsbedingungen an gleichen Zellen darüber entscheiden, ob die Zelle männliche oder weibliche Geschlechtszelle wird.

In diesem Gebiete seien einige Fälle kurz besprochen. Bei vielen Pilzen ist die Geschlechtsdifferenzierung

sehr labil. Abb. 7 gibt einen Fall, wo auf einem weiblichen Eiträger an der Spitze sich ein Träger männlicher Geschlechtszellen ausgebildet hat. Im Falle der Gemischtgeschlechtlichkeit liegt immer nichterbliche Geschlechtsbestimmung vor. Hier hängt die Geschlechtsbestimmung vielfach von äußeren Bedingungen ab. So kann man bei zwittrigen Rassen einer bestimmten Grünalge durch Behandlung mit sauren Lösungen das Überwiegen der männlichen, durch Behandlung mit alkalischer Lösung eine Überzahl an weiblichen Geschlechtszellen hervorrufen.

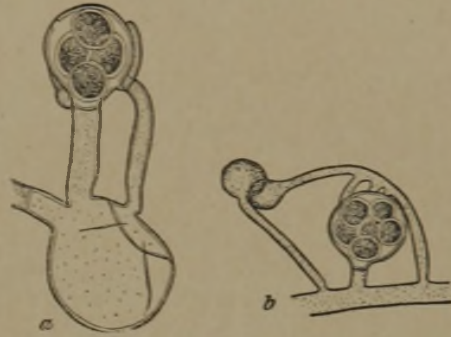


Abb. 7: *Adhlya americana* (Oomycet, Saprolegniaceae). a Aus einem Oogonium sprossen ein Oogonium und Antheridienschlauch. b Antheridienschläuche am Ende zu Oogonien angeschwollen. Nach Humphrey.

Besonders eigenartige Verhältnisse zeigen sich bei einem Borstenwurm. Die Würmer haben eine sehr große Regenerationsfähigkeit, was schon aus Versuchen mit Regenwürmern bekannt ist. Wenn diese in zwei Teile zerlegt werden, vermag sich jeder Teil zu einem ganzen Tiere wieder zu ergänzen. Bei dem erwähnten Borstenwurm sind alle jungen Tiere Männchen, wenn die Zahl ihrer Nebensegmente nicht größer ist als 15 bis 20. Ist die Zahl ihrer Nebensegmente größer, so werden sie weiblich (Abb. 8). Der Jugendzustand ist also männlich bestimmt, der Erwachsenenzustand weiblich. Schneidet man diese Tiere dauernd auf 5 bis 10 Segmente zurück, so wachsen die Vorderenden neu, werden schlank und die Tiere bleiben männlich.



Abb. 8: *Ophryotrocha puerilis* (Borstenwurm), a und b normales ♀ und ♂. c — Umwandlungsmännchen aus alten ehemaligen Weibchen, d durch Amputation, d durch Hunger, e durch Kaliumzusatz, f Dauermännchen in Seewasser mit erhöhtem Kaliumgehalt. Nach Hartmann und Huth.



Selbst alte erwachsene Weibchen von 30 Segmenten werden beim Zerschneiden auf 5 bis 10 Segmente in 48 Stunden männlich. Der breite Vorderkörper, der sonst das Weibchen charakterisiert, wird dabei schlank, Ähnliche Ergebnisse erzielte man durch Hunger oder erhöhten Gehalt von Kaliumionen in der Kulturflüssigkeit. In einer solchen Flüssigkeit ändern selbst erwachsene große Weibchen ihr Geschlecht und werden klein. Die Geschlechtsverhältnisse der Würmer zeigen auch sonst viele Merkwürdigkeiten, auf die wir indes nicht näher eingehen können.

Zum Schluß ging Hartmann auf das Gebiet der Geschlechtshormone und ihre entwicklungsphysiologische Wirkung ein.

Bei Wirbeltieren hängt die Entwicklung der sekundären Geschlechtsmerkmale von Geschlechtshormonen ab, die in die Blutbahn gelangen und an bestimmten Stellen Wirkungen erzeugen. Diese Stoffe werden in den Geschlechtsorganen gebildet. Man kann sie neuerdings auch auf chemischem Wege gewinnen. Diese Hormone sind für alle Wirbeltiere gleichartig. Das kann man daraus schließen, daß die Sexualhormone der Säugetiere auf die anderen Wirbeltiergruppen, Fische, Reptilien, Amphibien und Vögel, die gleichen spez. Wirkungen ausüben, wenn man sie diesen einspritzt. Drei Arten von Versuchen zeigen diese Wirkung:

1. Kastrationsversuche (Entfernung der Keimdrüsen);
2. Transplantationsversuche (Übertragung der Keimdrüsen);
3. Hormonversuche.

Bei Kastration im Entwicklungsstadium stockt die Weiterentwicklung der sekundären Geschlechtsmerkmale. Ihre Ausbildung hängt also von der Wirkung spez. Hormone der Geschlechtsdrüsen ab. Transplantationsversuche an jungen Ratten und Meerschweinchen, denen die Hoden entfernt und Eierstöcke eingepflanzt wurden, zeigen ein Stocken der Entwicklung der männlichen Geschlechtsmerkmale, teilweise sogar Zurückbildung. Organe, die noch entwicklungsfähig sind, bilden sich in weiblicher Richtung aus. Z. B. erhält man so feminierte männliche Meerschweinchen, die in Körper und Knochenbau sowie Haaren den Weibchen ähneln. Sie bilden sogar sekundäre Geschlechtsorgane wie Milchdrüsen aus, die Milch absondern. Dazu treten die Instinkte des weiblichen Geschlechts. Umgekehrt zeigte sich bei Weibchen, denen man die Eierstöcke entfernte und Hoden einpflanzte, eine Vermännlichung. Ähnliche Versuche hat man bei Vögeln, besonders Hühnern, durchgeführt. Kastrierte Hähne und Hennen zeigen Hahnengefieder. Das kastrierte Huhn erhält nach der Mauser männliche Befiederung. Beim kastrierten Hahn bilden sich Kamm und Sporen zurück, die Federn bleiben männlich. Hühner und Hähne ohne Keimdrüsen zeigen also sehr ähnliches Aussehen. Pflanzt man nun nach der Kastration die entgegengesetzten Keimdrüsen ein, so bilden sich beim früher weiblichen Huhn die Federn in männlicher Richtung weiter. Z. B. zeigt die Spitze die Merkmale der weiblichen, der untere Teil die der männlichen Feder usw. Besonders beachtlich sind die Ergebnisse, die man an jungen Embryonen durch Einspritzen der Hormone des entgegengesetzten Geschlechts erzielt hat (Abb. 9). Spritzt man einem Hühnerembryo von vier Tagen ein Tröpfchen Follikulin (weibliches Hormon) ein, so entwickeln sich auch aus den genetisch männlichen Küken solche, die auch innerlich sich der weiblichen Konstitution nähern. Kamm und Sporen fehlen, das Federkleid ist weiblich. Nach 15 Wochen haben dann diese Tiere, die Eierstöcke besaßen, wieder Hoden, und nach einigen Monaten sind sie nach der Mauser Hähne mit inneren und äußeren Merkmalen; nur die großen Eileiter, die sich unter der Wirkung des Follikulins



Abb. 9: 2 genetisch männliche Hühner, das hintere Tier ein normaler Hahn, sein Bruder vorn im Eistadium mit Follikulin behandelt, äußerlich und innerlich weiblich. Nach Dantschakoff.

gebildet hatten, können nicht mehr zurückgebildet werden. Das männliche Hormon, in weibliche Embryonen gebracht, übt keine so sinnfällige Wirkung aus. Ähnliche Erscheinungen zeigen sich bei Eidechsenembryonen. Bei Meerschweinchen wirkt Einspritzung von Follikulin auf männliche und weibliche Embryonen immer tödlich. Injektionen männlichen Hormons in genetisch weibliche Tiere (Testerproprietat) ruff äußerlich Männchen hervor, die inneren Sexualorgane sind teils weiblich, teils männlich. Die primären Sexualorgane bleiben Ovarien, die äußeren Ausführungsorgane werden männlich.

Die Sexualhormone sind nach diesen Versuchen nicht die ersten geschlechtsbestimmenden Faktoren, obwohl sie das primäre Geschlechtsorgan sogar umwandeln können. Die erbliche Konstitution und Geschlechtsbestimmung ist stärker als die Wirkung der Hormone. Sonst könnte sich ein verweiblichter Hahn nicht nach 15 Wochen wieder in einen ganz normalen verwandeln. Auch hier tritt wieder das Vorhandensein der bisexuellen Potenz beider Geschlechter zutage.

Fragt man nun zum Schluß, welches ist in der Fülle der Erscheinungen der Sexualität im Organismenreich der ruhende Pol, so bleiben einige wesentliche Feststellungen gemeinsam.

1. Wir müssen bei den Lebewesen durchweg eine allgemeine bisexuelle Potenz annehmen, denn die Erscheinung der Zwitterigkeit, der Intersexe, die Wirkungen der Geschlechtsstoffe und Hormone zwingen zu der Annahme, daß die Möglichkeit, sich männlich oder weiblich zu entwickeln, den Zellen innewohnt. Jede Keimbahnzelle und jeder Organismus kann sich entweder nach der männlichen oder weiblichen Seite entfalten.

2. Es gibt besondere Faktoren in den Zellen, die entweder erblich bestimmt oder nur von äußerer modifikatorischer Art sind, die den zwitterigen oder getrenntgeschlechtlichen Zustand bestimmen.

3. Diese Faktoren, die männchen- oder weibchenbestimmend wirken, sind meist bei den verschiedenen Lebewesen von verschiedener Valenz oder Stärke. Hartmann unterschied im ganzen 8 Fälle, auf die nicht näher eingegangen werden soll.

Der Vortrag bot eine Fülle neuen Materials, er war besonders wertvoll, weil Hartmann genauer auf die verschiedenen Methoden einging und zeigte, wie man vor allem durch Mitwirkung des Experiments auch in der Biologie zu klaren einheitlichen Auffassungen gelangen kann.

Das erwähnte Buch von Prof. Hartmann kann zu näherem Studium nur bestens empfohlen werden.