Schönheit in Wissenschaft und Technik: Abschiedsvorlesung

Autor(en): **Traupel, Walter**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 22

PDF erstellt am: **25.04.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75467

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Schönheit in Wissenschaft und Technik

Abschiedsvorlesung

Von Walter Traupel, Küsnacht

Am Ende meines Wirkens als Ingenieur will ich nicht nochmals einen Fachvortrag halten. Nicht die Geschichte und nicht die Zukunft des Turbomaschinenbaus soll Gegenstand dieser Abschiedsvorlesung sein, auch nicht die ETH Zürich, deren Rektor ich einmal gewesen bin, sondern das, worum es mir immer wieder eigentlich gegangen ist: die Schönheit.

Allen Ingenieuren gewidmet, die ihren Beruf in Ehrfucht vor der Schöpfung ausüben.

Widmung des Buches «Thermische Turbomaschinen» von *W. Traupel.* Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1958 (3. Aufl. 1982)

Das ist sie, die Schnellzuglokomotive IVh der Badischen Staatsbahnen (Bild 1). *Anton Hammel,* einer der ganz grossen Meister der Maschinenbaukunst, der die Lokomotivfabrik Maffei in München weltberühmt machte, war ihr Schöpfer. Mit ihm muss auch sein engster Mitarbeiter *Heinrich Leppla* genannt werden.
Die Grossherzoglich-Badische Staatsbahn liess die Maschine unmittelbar vor dem Ersten Weltkrieg projektieren. Als die Bestellung nach München ging, war der Krieg ausgebrochen und verzögerte die Herstellung. Erst nach dem Krieg wurden die Maschinen ausgeliefert. Die Badische Staatsbahn war nun nicht mehr grossherzoglich. 1920 ging sie über in die Deutsche Reichsbahn, die durch ihre stümperhafte Normalisiererei der deutschen Lokomotivbaukunst schwersten Schaden zugefügt hat. Dies soll nichts gegen das Normalisieren im allgemeinen sagen, aber es kommt eben darauf an, wie es gemacht wird.

Die IVh fuhr Schnellzüge auf der Strekke Basel–Mannheim. Daher sah ich sie in meiner Jugend oft in Basel. Und da soll einer nicht Ingenieur werden, wenn er täglich diese Maschine sieht, die damals mächtigste Schnellzuglokomotive Europas!

Anton Hammels unverwechselbaren Stil zeigt das Bild 1. Das Fahrgestell ist der Barrenrahmen, den Hammel im europäischen Lokomotivbau eingeführt hat. Das ganze Fahrgestell war also durchsichtig; man sah auf die andere Seite. Man muss sich vorstellen, wie das aussieht bei einem Raddurchmesser von 2,1 m!

Leicht gekürzte Fassung der Abschiedsvorlesung vom 12. Januar 1984 im Auditorium Maximum der ETH Zürich

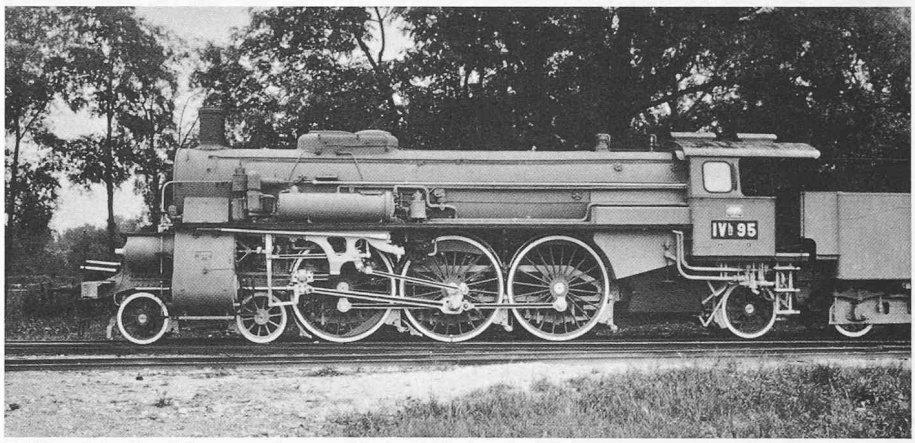


Bild 1. Schnellzuglokomotive Gattung IVh der Badischen Staatsbahnen

Die IVh war eine Vierzylinder-Verbundmaschine, die Hochform der Dampflokomotive. Die HD-Zylinder lagen innen, und die Innentriebwerke waren im durchsichtigen Fahrgestell zu erkennen. Man sah also, wie die beiden inneren Kreuzköpfe um 90° versetzt liefen, die Triebwerke der äusseren ND-Zylinder um 180° versetzt. Und dazu das wunderschöne Spielen des Steuerungsmechanismus! Dem Betrachter zeigte sich ein Bewegungsablauf von unnachahmlicher Harmonie.

Formgefühl des Konstrukteurs

Man hat schon oft gesagt, das technisch Richtige wirke ganz von selbst auch schön. Hammels Konstruktionen scheinen dies zu bestätigen. Und doch ist es eine halbe Wahrheit, denn es lassen sich Gegenbeispiele finden. Die preussische P8 z. B. war eine ausgezeichnete, aber ausgesprochen hässliche Lokomotive. Bei Hammel geht das Formgefühl des Konstrukteurs in den Gesamtentwurf wie auch in die Gestaltung der Einzelheiten ein. Doch ist unverkennbar, dass er auch bewusst an das Aussehen der Maschine gedacht hat. Man muss annehmen, dass er ähnlich wie ein Architekt überlegt hat. Bei der IVh hebt er die besondere technische Eigenart hervor: hochräderig und lang. Der Laufsteg liegt 20 cm über den Triebrädern, also auf einer Höhe von 2,3 m. Die Distanz zwischen Schienenoberkante und Laufsteg ist also grösser als jene zwischen Laufsteg und Kesselfirst. So wirkt der Kessel schlank und lang. Die Höhe der Triebräder ist betont. Da Dampfdom und Sanddom unter einer Verkleidung zusammengefasst sind, entsteht ein langer, leerer Rücken, der die Länge der Maschine noch mehr hervorhebt. Das Extreme der technischen Lösung wird also betont, und doch wirkt das Ganze harmonisch.

Technisch war die IVh der Zenith des deutschen Dampflokomotivbaus. Es blieb dem Franzosen *André Chapelon,* dem grössten Dampflokomotiveningenieur aller Zeiten, vorbehalten, den Dampflokomotivenbau Anfang der dreissiger Jahre auf eine Stufe der Vollkommenheit zu führen, die auch die IVh noch weit übertraf.

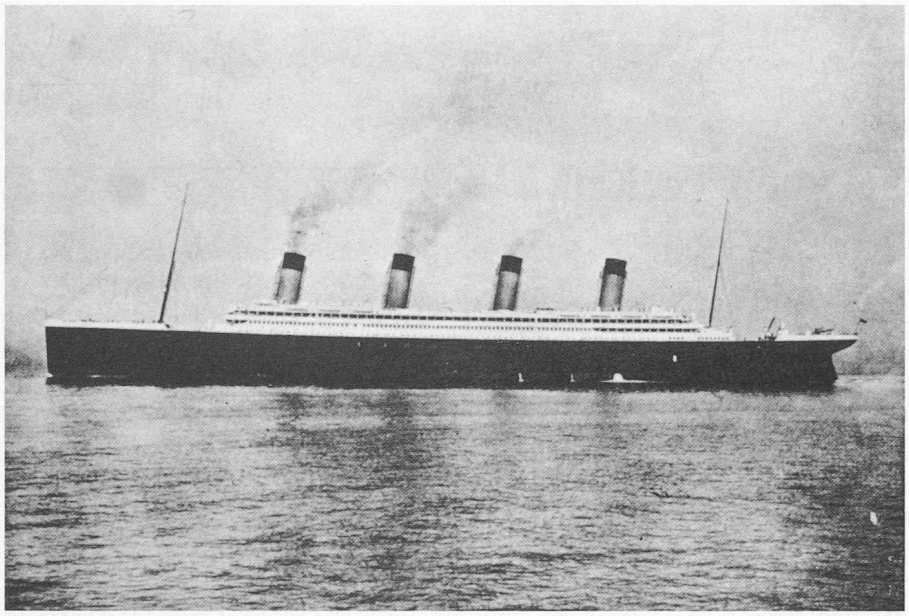


Bild 2. Dampfer «Olympic» der White Star Line

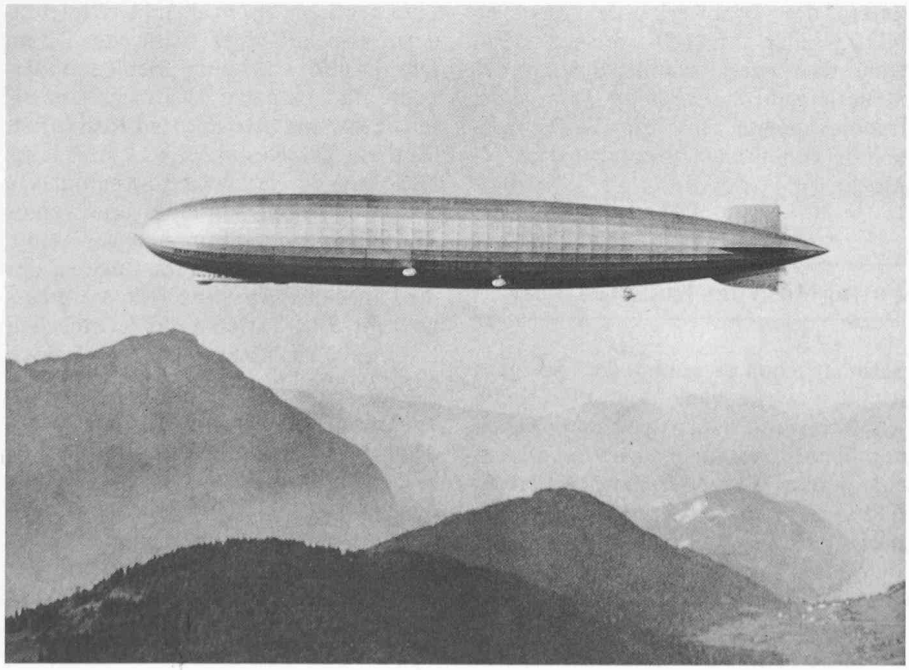
Symbolausdruck der Technik

Dies war die «Olympic» der White Star Line (Bild 2), einer jener wunderbaren englischen Vierschornsteiner, ein Höhepunkt der englischen Schiffbaukunst. Sie waren die englischsten Schiffe, die es je gegeben hat. Betrachten Sie die schlanke Schönheit dieses grossartigen Schiffes! Es ist eine typische Schöpfung der Werft Harland and Wolff: steiler, gerader Vordersteven, klassisch geformtes Dampferheck. Obwohl acht Decks übereinanderliegen, wirkt das Schiff nicht hoch, sondern schlank.

Die White Star Line war für äussersten Komfort und Luxus bekannt. Heute amüsiert es, dass beim Buchen einer Luxuskabine Erster Klasse auf der «Olympic» verschiedene Stile zur Wahl standen: Louis XIV., Louis XV., Louis XVI., Empire, Adams, italienische Renaissance, Georgian, Régence, Queen Anne, Modern Dutch und Old Dutch. Und der berühmte Speisesaal Erster Klasse war im Stil der Epoche Jacobs I. gestaltet. Diesen fragwürdigen Nachahmungen würden wir heute kaum mehr den Rang echter Kunstwerke zubilligen. Aber dieses Schiff im Stil von Harland and Wolff, dies ist das wahre und echte Kunstwerk!

Das Bild 2 fängt den Geist des Schiffes ein und vermittelt den Eindruck, das «British Empire» selbst komme in diesem Schiff auf den Wogen des Ozeans daher.

Bild 3. Luftschiff «Graf Zeppelin»



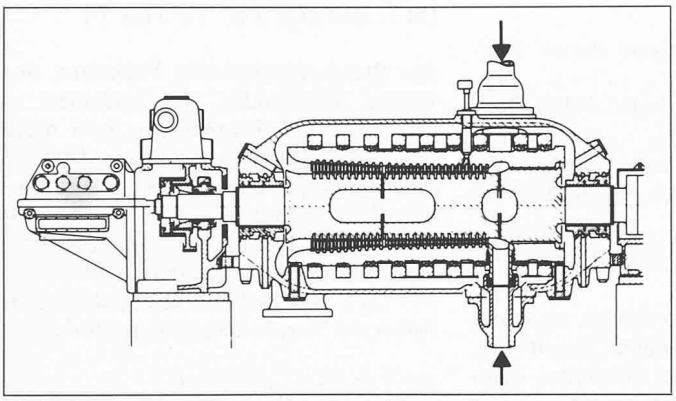
Insgesamt sechs dieser klassischen englischen Vierschornsteiner gab es, die für den Transatlantikdienst bestimmt waren: Die berühmten Cunard-Liners «Lusitania», «Mauretania» und «Aquitania» sowie die White-Star-Schiffe «Olympic», «Titanic» und «Britannic». Offensichtlich sollten diese Schiffe nicht nur einem praktischen Bedürfnis entsprechen, sondern zugleich Symbol der Grösse des britischen Weltreichs sein. Tragisch ist, dass diese Schiffe den Untergang des Weltreiches gewissermassen symbolisch vorweggenommen haben: Drei von sechs haben kein natürliches Ende genommen. Der Name der «Titanic» erinnert an die grösste Schiffskatastrophe der Geschichte. Die «Lusitania» ging als eines der ersten Beispiele des totalen Krieges in die Geschichte ein. Die «Britannic» war zu Beginn des Ersten Weltkriegs noch nicht fertiggestellt und wurde sofort in ein Lazarettschiff umgerüstet. Als solches machte sie einige Fahrten, bis sie in der Ägäis auf eine Mine lief und sank. Zum Glück kamen nur wenige Menschen um. Wie die «Britannic» als White Star Liner hätte aussehen sollen, weiss man von einem Gemälde. Wie ihr Name erwarten lässt, wäre sie das grossartigste dieser sechs Schiffe gewesen. «Titanic» und «Britannic» haben den Hafen von New York nicht ein einziges Mal angelaufen! Ist das nicht erschütternd?

Die Geschichte der Technik ist dadurch gekennzeichnet, dass das Herrlichste, was hätte sein können, nie gewesen ist. Später gab es wohl wieder ein Schiff dieses Namens; es war aber mittelgross und nicht zu vergleichen mit der grossen «Britannic», die noch olympischer als die «Olympic» hätte sein sollen.

Dies war das Luftschiff «Graf Zeppelin» (Bild 3). Ist je Schöneres aus Menschenhand hervorgegangen? Die meisten von Ihnen haben nie ein Zeppelinluftschiff gesehen, nie einen Zeppelin kommen hören. Sie haben es nie erlebt, dass Sie plötzlich aufhorchten: «Der Zeppelin kommt!» Da sind Sie wirklich um ein Erlebnis gekommen. Ein Zeppelinluftschiff, das in hoher Luft majestätisch dahinzieht: Das ist Herrlichkeit.

Prinzipgedanken in der Konstruktion

Die bis jetzt betrachteten Bilder zeigten grossartige Werke der Technik einer vergangenen Epoche. Bild 4 jedoch zeigt ein Beispiel aus der Technik der Gegenwart. Es ist die Schnittzeichnung des Hochdruckteils einer Grossdampfturbine von BBC. Hier ist sogleich ein



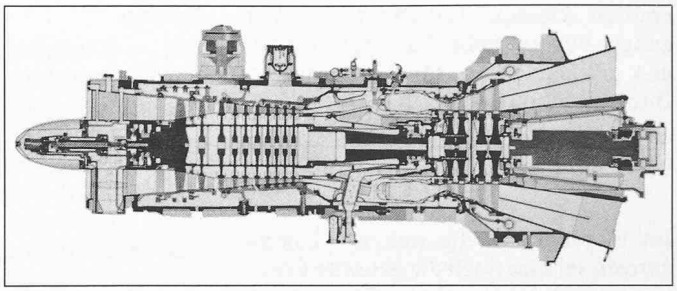


Bild 5. Schnitt durch die Sulzer-Gasturbine Typ 10

Bild 4. Schnitt durch das Hochdruckgehäuse einer BBC-Grossdampfturbine

grosser Unterschied gegenüber der Technik der Vergangenheit bemerkbar:

Während man bei der Dampflokomotive von aussen die Grossartigkeit und Schönheit der Konstruktion sieht, würde man bei dieser Turbine von aussen eine nichtssagende Blechverschalung sehen. Erst die Schnittzeichnung verrät die glänzende konstruktive Gestaltung, doch fürchte ich, sie verrät sie nur dem Ingenieur. Wer nicht Ingenieur ist, sieht vielleicht etwas wie ein Ornament. Der Ingenieur allerdings wird die klassische Klarheit und Richtigkeit dieser Konstruktion bewundern.

Der Rotor mit seinen Laufschaufelreihen und dem Schubausgleichkolben, der Leitschaufelträger mit seinen Schaufelreihen, all dies bildet als Gruppe eine wunderbar gestaltete Einheit. Der Leitschaufelträger besteht aus zwei halbzylindrischen Schalen, denn er muss aus montagetechnischen Gründen geteilt ausgebildet sein, damit man den Rotor einlegen kann. Nun werden aber diese beiden Hälften nicht einfach in der üblichen Weise mittels Flanschen miteinander verschraubt, sondern – und das ist der eigentlich bestimmende Gedanke der Konstruktion – sie werden von Schrumpfringen zusammengehalten. Dies sind Ringe, die zunächst erwärmt werden, wobei sie sich ausdehnen. Dann werden sie über den Laufschaufelträger geschoben, kühlen sich ab und schrumpfen dabei zusammen, wie der Name sagt. Sie umschliessen die beiden Schalenhälften satt und mit grosser Kraft. Die ganze Anordnung wird somit im Querschnitt vollkommen kreissymmetrisch, was Vorteile bringt, die jedem Ingenieur sogleich einleuchten.

Der Gedanke, hier das Prinzip der Schrumpfverbindung anzuwenden, ist keineswegs selbstverständlich; er verlangt auch die Lösung einer Reihe von sekundären Problemen.

Wenn nun ein Ingenieur sagt: «Das ist eine schöne Lösung», so meint er mit «schön» in erster Linie diesen *Gedanken*. Die schöne konstruktive Ausgestaltung hat also ihre Wurzel im Gedanklichen.

Ein zweites Beispiel einer vorbildlichen modernen Konstruktion zeigt das Bild 5, eine Schnittzeichnung durch die Sulzer-Gasturbine Typ 10. *Ferdinand Zerlauth,* Ehrendoktor unserer Hochschule, hat sie entworfen. In wenigen Stichworten charakterisiert, ist diese Konstruktion «leicht und steif». Ein wesentliches Kennzeichen ist die Ringbrennkammer, die im Flugtriebwerkbau schon lange bekannt ist. Hier ist nun eine bauliche Gestaltung gefunden worden, die es erlaubt, die Ringbrennkammer auch bei einer stationären Gasturbine anzuwenden. Das setzt voraus, dass weder die Brennkammer selbst noch die anschliessende Turbine eine horizontale Trennung aufweisen. Vielmehr muss hier alles aus ungeteilten, kreissymmetrischen Werkstücken achsial zusammengefügt werden. Dadurch erst wird die Ringbrennkammer möglich und mit ihr ein Aussengehäuse, das die Gestalt eines einfachen Zylinders ohne grosse Durchbrechungen hat, kompakt und leicht. Besonders klar und schön ist auch der Rotor gestaltet: Leichte Scheiben sind an dünnen Rändern miteinander verschweisst, die einen steifen Zylinder bilden. Jede Einzelheit des Entwurfs verrät *sicheres Gefühl für Formen und Proportionen.* Eine solche Konstruktion hat etwas mit einem Kunstwerk gemein.

Es ist etwas Grosses um den Maschinenbau, besonders um den Grossmaschinenbau und die Grosstechnik überhaupt. Stets war es die Grosstechnik, die mich fasziniert hat. Was soll mir schon ein nützlicher Karsumpel! Den braucht man auch, aber mich interessiert er nicht.

Schönheit der gedanklichen Struktur

Wir sahen bereits, dass die Schönheit einer Konstruktion in einer Konstruktionsidee wurzelt. Ja, dem Gedanklichen an sich kann die Qualität «Schönheit» zukommen. Das gilt in hohem Masse für die Gedankenstrukturen der exakten Wissenschaft. An einem klassischen Beispiel möchte ich das aufzeigen, nämlich am zweiten Hauptsatz der Thermodynamik und seiner Aussage über den Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine. Die Gedankengänge sind hier nur soweit skizziert, dass die theoretische Struktur erkennbar wird.

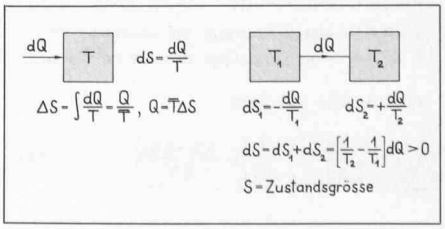
Die mathematische Formulierung des zweiten Hauptsatzes gelingt mit Hilfe einer Grösse S, die als Entropie bezeichnet wird. Man kann sie einführen, indem man die Zufuhr einer Wärmemenge dQ zu einem Körper mit der absoluten Temperatur T betrachtet und aussagt, dass dabei die Entropie des Körpers um den Betrag

$$(1) \qquad dS = \frac{dQ}{T}$$

zunimmt. Dem Vorgang der Wärmezufuhr äquivalent ist es, gegen Zähigkeitskräfte Arbeit an einem Fluidteilchen zu leisten, wobei dieses Fluidteilchen deformiert wird. Stellt man sich vor, die Deformation erfolge mit verschwindend kleiner Geschwindigkeit, so verschwinden die Zähigkeitskräfte. An die Stelle der Arbeit gegen Zähigkeitskräfte muss dann eine entsprechende Wärmezufuhr treten, damit die gleiche Zustandsänderung zustandekommt. Damit sind wir aber zurückgeführt auf den Vorgang der Wärmezufuhr, für den Gleichung (1) den Entropiezuwachs angibt.

Zwar gibt die Gleichung (1) die Entropiezunahme zunächst nur für einen un-

Bild 6. Zur Herleitung der Entropieproduktion durch Wärmeübertragung



endlich kleinen Teilschritt des Vorgangs. Für endliche Zustandsänderungen gilt nach dem Mittelwertsatz der Integralrechnung

$$(2) \quad \Delta S = \int \frac{dQ}{T} = \frac{Q}{\bar{T}}, \quad Q = \bar{T}\Delta S$$

Im Hinblick auf die weiteren Überlegungen sei hier noch die gesamte Entropieänderung angegeben, die aus der Übertragung von Wärme von einem Körper auf einen andern resultiert. Es ist

$$dS_1 = -\frac{dQ}{T_1}, \quad dS_2 = +\frac{dQ}{T_2}$$

(3)

$$dS = dS_1 + dS_2 = \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right] dQ > 0,$$

da ja sicher $T_2 < T_1$.

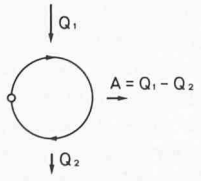
Der zweite Hauptsatz lässt sich damit in folgender Form (Bild 6) aussprechen: *S ist Zustandsgrösse, dS mithin ein vollständiges Differential.*

Aus dem so eingeführten Begriff der Entropie und aus dieser Aussage lässt sich nun eine Konsequenz ziehen bezüglich des Energieumsatzes in einer Wärmekraftmaschine. Eine solche ist ein zyklisch arbeitendes System, das Wärme in mechanische Arbeit umsetzt. Dies sei auch durch ein einfaches Schema in Bild 7 dargestellt.

Unter dem thermischen Wirkungsgrad verstehen wir die folgende Grösse

$$(4) \quad \eta_{th} = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Bild 7. Schema des Kreisprozesses einer Wärmekraftmaschine



Thermischer Wirkungsgrad $\eta_{th} = \frac{A}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ (4)

ΔS_1 = Entropiezunahme durch Wärmezufuhr
ΔS_r = Entropiezunahme durch Reibung
ΔS_q = Entropiezunahme durch Wärmeübertragung innerhalb des Prozesses
ΔS_2 = Entropieabnahme durch Wärmeentzug

$\Delta S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_r + \Delta S_q$ weil Kreisprozess (5)

$\bar{T}_1 = Q_1/\Delta S_1$ = Mitteltemperatur der Wärmezufuhr
$\bar{T}_2 = Q_2/\Delta S_2$ = Mitteltemperatur des Wärmeentzuges

Aus (1) und (2) folgt:

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_2 \Delta S_2}{\bar{T}_1 \Delta S_1} = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}\left[1 + \frac{\Delta S_r + \Delta S_q}{\Delta S_1}\right] \quad (6)$$

Nun sei

ΔS_1 = Entropiezunahme durch Wärmezufuhr,
ΔS_r = Entropiezunahme durch Reibung,
ΔS_q = Entropiezunahme durch Wärmeübertragung innerhalb des Prozesses,
ΔS_2 = Entropieabnahme durch Wärmeentzug.

Da ein Kreisprozess vorliegt, muss die Entropie nach einem vollen Zyklus wieder ihren Anfangswert erreichen, denn sie ist Zustandsgrösse. Also gilt

$$(5) \quad \Delta S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_r + \Delta S_q.$$

Gemäss Gleichung (2) können Mitteltemperaturen der Wärmezufuhr und des Wärmeentzugs definiert werden als

$$\bar{T}_1 = Q_1/\Delta S_1, \quad \bar{T}_2 = Q_2/\Delta S_2.$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung (5) lässt sich somit der thermische Wirkungsgrad in folgender Form ausdrükken:

$$(6) \quad \eta_{th} = 1 - \frac{\bar{T}_2 \Delta S_2}{\bar{T}_1 \Delta S_1} = 1 - \frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}\left[1 + \frac{\Delta S_r + \Delta S_q}{\Delta S_1}\right].$$

Damit ist eine allgemeine und strenge Formel für den thermischen Wirkungsgrad einer beliebigen Wärmekraftmaschine gefunden, aus der hervorgeht, unter welchen Bedingungen η_{th} möglichst hoch wird:

$\frac{\bar{T}_2}{\bar{T}_1}$ möglichst tief, möglichst hoch,
ΔS_r möglichst klein, also wenig Reibung,
ΔS_q möglichst klein, also wenn innere Wärmeübertragung, dann mit kleinem ΔT.

Die in der Gleichung (6) gegebene Relation steht und fällt offenbar mit der Aussage, dass dS vollständiges Differential sei.

Woher aber nehmen wir die Gewissheit, dass S wirklich Zustandsgrösse, also dS vollständiges Differential ist? Dies wird durch eine Unzahl empirischer Sachverhalte bestätigt. Zwei Beispiele seien herausgegriffen, die als die wichtigsten experimentellen Bestätigungen des zweiten Hauptsatzes gelten können.

Gegeben sei ein beliebiges Fluid einheitlicher Phase. Es sei u die spezifische innere Energie (Energieinhalt pro Masseneinheit), v das spezifische Volumen. Solange keine Phasenänderung vorgenommen wird, beschreiben zwei Funktionen der Art

$$(7) \quad u = u(p, T), \quad v = v(p, T)$$

das thermodynamische Verhalten des Fluids vollständig. Es bedeuten p Druck und T Temperatur, und diese beiden Grössen definieren den Zustand eines Fluids, solange keine Phasenänderungen erfolgen. Für einen unendlich kleinen Teilschritt irgendeines Prozesses, dem ein Fluidteilchen unterworfen wird, lässt sich die Energiebilanz in folgender Form aussprechen (Bild 8):

$$(8) \quad du = -p\,dv + T\,ds,$$

$-p\,dv$ Arbeit, die durch die Druckkräfte am Fluidteilchen geleistet wird,

$T\,ds$ umfasst die Wärmezufuhr und die Arbeit gegen die Zähigkeitskräfte. Beides muss ja gemäss Gleichung (8) eine entsprechende Erhöhung der inneren Entropie zur Folge haben.

Die Entropie ist hier natürlich auch auf die Masseneinheit bezogen, was man durch Kleinschrift anzudeuten pflegt.

Wenn man Gleichung (8) nach ds auflöst sowie du und dv durch die Differentiale dp und dT ausdrückt, findet man

$$ds = \frac{du + p\,dv}{T} = \frac{1}{T}\left[\frac{\delta u}{\delta p}dp + \frac{\delta u}{\delta T}dT + p\left(\frac{\delta v}{\delta p}dp + \frac{\delta v}{\delta T}dT\right)\right],$$

oder anders geordnet

$$(9) \quad ds = \left[\frac{1}{T}\frac{\delta u}{\delta p} + \frac{p}{T}\frac{\delta v}{\delta p}\right]dp + \left[\frac{1}{T}\frac{\delta u}{\delta T} + \frac{p}{T}\frac{\delta v}{\delta T}\right]dT.$$

Ist ds ein vollständiges Differential, wie der zweite Hauptsatz behauptet, so gilt auch

$$(10) \quad ds = \frac{\delta s}{\delta p}dp + \frac{\delta s}{\delta T}dT.$$

Die Gleichungen (9) und (10) können nur gleichzeitig gelten, wenn $\delta s/\delta p$ und $\delta s/\delta T$ mit den entsprechenden, in Gleichung (9) in eckigen Klammern geschriebenen Ausdrücke identisch sind.

Da aber

$$\frac{\delta}{\delta T}\left(\frac{\delta s}{\delta p}\right) = \frac{\delta}{\delta p}\left(\frac{\delta s}{\delta T}\right),$$

folgt sogleich

$$(11) \quad \frac{\delta}{\delta T}\left[\frac{1}{T}\frac{\delta u}{\delta p} + \frac{p}{T}\frac{\delta v}{\delta p}\right] = \frac{\delta}{\delta p}\left[\frac{1}{T}\frac{\delta u}{\delta T} + \frac{p}{T}\frac{\delta v}{\delta T}\right],$$

was nach kurzer Zwischenrechnung auf

$$(12) \quad \frac{\delta u}{\delta p} = -p\frac{\delta v}{\delta p} - T\frac{\delta v}{\delta T}$$

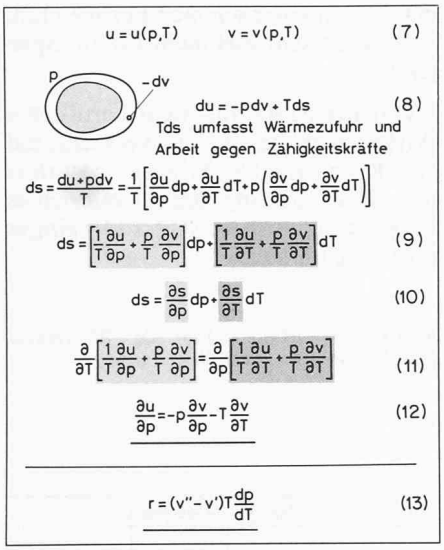


Bild 8. Herleitung der Gleichung von Clausius

führt, eine Relation, die als «Gleichung von Clausius» bekannt ist. Ihre linke Seite ist bestimmt durch die Funktion $u(p,T)$ allein, ihre rechte durch die Funktion $v(p,T)$ allein. Die Gleichung von Clausius sagt damit aus, dass diese beiden Funktionen nicht voneinander unabhängig, sondern in bestimmter Weise aufeinander abgestimmt sind. Dies lässt sich experimentell überprüfen, und es bestätigt sich ausnahmslos, dass die Relation streng erfüllt ist.

Bei dieser Überlegung war vorausgesetzt, dass das Fluid keine Phasenänderung erleide. Man kann nun umgekehrt gerade den Prozess der Phasenänderung betrachten – also z. B. der Verdampfung oder der Kondensation – und eine völlig analoge Untersuchung anstellen. Dies führt auf die folgende, ohne Herleitung angegebene Relation

$$(13) \qquad r = (v'' - v')\, T\, \frac{dp}{dT},$$

r Verdampfungswärme,
v'' spezifisches Volumen des Dampfes,
v' spezifisches Volumen der Flüssigkeit, alle Werte bei gegebener Temperatur T.

Von der Temperatur T hängt der Dampfdruck p ab (gemäss der Dampfdruckkurve), und dp/dT ist die Steigung der Dampfdruckkurve. Diese Relation ist die Gleichung von Clausius und Clapeyron. Sie verknüpft Grössen miteinander, die der Messung zugänglich sind, und sie wird ebenfalls durch die experimentellen Ergebnisse ausnahmslos bestätigt.

Die Tatsache, dass die Erfahrung die Gleichungen (12) und (13) durchwegs bestätigt, gibt uns die Gewissheit, dass tatsächlich das Differential der Entropie ein vollständiges Differential ist, d. h. also, dass der zweite Hauptsatz, so wie wir ihn formuliert haben, ein strenges Naturgesetz ist. Daraus aber ergibt sich zwingend die angegebene Formel für den thermischen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine.

Und nun betrachten Sie die grossartige Schönheit der *gedanklichen Struktur*, die sich vor uns ausbreitet. Man beachte auch, dass wir damit eine gesicherte Aussage machen konnten, selbst über jede Wärmekraftmaschine, die noch erfunden werden könnte.

Aus dieser theoretischen Struktur geht auch die Unmöglichkeit der restlosen Umsetzung von Wärme in Arbeit in einer Wärmekraftmaschine hervor; die vielen Erfinderlinge werden also der Natur kein Schnippchen schlagen können. Und wenn wir einmal rein hypothetisch die Annahme treffen, es finde doch einer den Dreh, Wärme vollkommener in Arbeit umzusetzen, als es der zweite Hauptsatz zulässt, so müssten wir sagen: Dies wäre eine Katastrophe, denn dadurch würde ja die Schönheit der Wissenschaft zerstört.

Ein Wesenszug der Schönheit

Wenn wir von der Schönheit einer gedanklichen Struktur reden, wird da nicht das Wort «Schönheit» in einem übertragenen Sinn verwendet? Ist das nicht etwas ganz anderes als eine Schönheit der äusseren Erscheinung oder, allgemeiner gesagt, eine Schönheit, die sich in irgendeiner Weise der sinnlichen Wahrnehmung darbietet? Ich glaube es nicht, denn mir scheint, da sei eine tiefliegende Gemeinsamkeit.

Der Schöpfer einer Theorie kann nicht etwas Beliebiges willkürlich zusammenkombinieren. Gedanklich befriedigt die Theorie erst dadurch, dass sie zwingend ist. Bedeutet dies, dass der Wissenschafter keinerlei Freiheit habe und nicht mehr tun könne, als ein Gegebenes aufzufinden?

Jeder, der selbst wissenschaftlich arbeitet, weiss, das dem nicht so ist, und die Werke der wissenschaftlichen Literatur verraten, wieviel Freiheit der Wissenschafter wirklich hat. Die gleiche Materie kann, von verschiedenen Autoren dargestellt, so verschieden gestaltet werden, dass es schwerhält, die materielle Gleichheit der Aussage wiederzuerkennen.

Eine Theorie ist das Werk der schöpferischen Freiheit des Wissenschafters. *Souveräne Freiheit in strengster Bindung*, das ist das Grossartige, das uns in der Wissenschaft begegnet; es macht ihre Schönheit aus.

Ist es etwas anderes beim wohlgeratenen technischen Werk, das durch seine Schönheit fasziniert? Der Konstrukteur ist streng gebunden an die Bedingungen der Funktion, an die verschiedenen Gegebenheiten, an die Naturgesetze, die alles beherrschen. Und gerade an diesen Bedingungen entwickelt sich seine schöpferische Freiheit. Ich halte diese innige Verquickung von Freiheit und Bindung für ein Kennzeichen jedes wahrhaft grossen Werkes des Menschengeistes, das Anspruch auf Schönheit erhebt. Der freie Hochflug des Geistes ist unabdingbar. Das Willkürliche, Zufällige und somit Chaotische würde aber niemals befriedigen, sondern unser Geist sucht die Bestätigung seiner selbst in der strengen Bindung.

Tieferer Sinn der Schönheit

Es mag scheinen, dass ich hier über Dinge von sekundärer Bedeutung gesprochen habe. Ist denn Schönheit nicht ein Luxus ohne eigentliche Wichtigkeit? Dem möchte ich des bestimmtesten widersprechen, und zwar vorab in einem ganz allgemeinen Sinn.

Das Erlebnis der Schönheit gehört zu dem, was unserem Leben erst Sinn gibt. Das gilt von der Schönheit in der Natur, in der Kunst, in der Musik, in der Sprache und in unabsehbar vielen anderen Dingen. Aber auch in der Wissenschaft, auch in der Technik hat die Schönheit ihren Platz. Wo man ihr diesen Platz nicht zubilligt, da herrscht jene platte Geisteshaltung, die uns in die Sinnlosigkeit hineintreibt.

Unser Wirken hat stets zunächst äusserliche, vordergründige Ziele. Diese sind es, von denen in der Öffentlichkeit gesprochen wird, die anerkannt sind, denn zu viele können nur diese trivialen Dinge sehen. Dahinter aber verbirgt sich, vollends beim schöpferischen Menschen, etwas ganz anderes, im Grunde stets Irrationales, was in Tat und Wahrheit aber an der Wurzel unseres Wirkens liegt und seinen tieferen Sinn überhaupt erst ausmacht.

Dieser tiefere Sinn kann nicht einfach in einer Wirtschaft gesucht werden, die Wohlstand schafft, denn Wohlstand gibt an sich noch keinen Sinn. Wohlstand kann insofern indirekt sinnvoll sein, als er die Voraussetzung sein kann zur Entfaltung dessen in uns, das unserem Leben Sinn gibt. Dieses Echte hat immer bis zu einem gewissen Grade irrationalen Charakter, denn nur aus dürrer Vernunft ist kein Sinn zu gewinnen. Auch ist es stets individuell. Die Gesellschaft kann unserem Tun keinen Sinn geben oder gar vorschreiben. Offizielle Sinngebungen, die getragen sind

vom Konsens der Mittelmässigkeit, sind Plattheiten und Unwahrhaftigkeiten.

Die Ehrfurcht vor dem Geist aber verlangt, dass der Geist in seiner Gesamtheit akzeptiert werde, in seiner jeweils individuellen Ausprägung und mit dem Irrationalen, das in seiner Tiefe liegt.

Warum suchen wir beispielsweise die Wahrheit? Das gründet im Irrationalen, denn leben können wir doch gewiss, auch ohne die Wahrheit zu wissen. Warum wollen Menschen ein grosses Werk schaffen, wo doch dies sie geradezu daran hindert, sich dem Lebensgenuss hinzugeben? Wo sich der Menschengeist zur Geistestat aufschwingt, liegt dahinter immer etwas, das an der Oberfläche sichtbare Zweckmässigkeit, reine Wirtschaftlichkeit, einfaches Suchen nach irgendwelchen Vorteilen übersteigt. Auch dort, wo Zweckmässigkeit und Wirtschaftlichkeit unabdingbar sind, trifft dies zu. Aus dieser Wurzel entspringt auch der Wille, das was man tut, in einer schönen Form zu tun, und das ist sehr viel mehr als nur Spielerei.

Wenn ich heute auf mein berufliches Wirken zurückblicke und versuche, auf eine Kurzformel zu bringen, worum es mir eigentlich ging, dann treffe ich es am ehesten, wenn ich sage: «Mir ging es um die Schönheit.»

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *W. Traupel*, Schiedhaldenstrasse 44, 8700 Küsnacht.

Fortlaufende Untersuchung der Fahrbahn

Von Leopold Pflug und Serge Oesch, Lausanne

Allgemeines

Für das Leben und die Volkswirtschaft einer Nation ist der *Unterhalt des Strassennetzes* von entscheidender Bedeutung; ohne Strassen gibt es weder Personen- noch Gütertransport innerhalb des Landes; «via vita est» sagten schon die Römer, die es wissen mussten: Ihr politischer, wirtschaftlicher und kultureller Einflussraum entsprach nämlich einem Netz von 150 000 km ausgezeichnet gebauten und gepflegten Strassen [1].

In dieser Hinsicht spielt die periodische Untersuchung des Fahrbahnzustandes eine wesentliche Rolle. Die Art, die Häufigkeit und das Ausmass der Unterhaltsarbeiten werden massgebend durch die Beobachtung von Aussehen und Form *des Belags* festgelegt, weshalb diese Beobachtung durch zahlenmässig erfassbare Kriterien erhärtet werden muss. Durch die Betrachtung der Oberflächenverformung sowie des Fahrbahnquerschnittes kann die abnehmende Qualität eines Belages oder einer Fahrbahn verfolgt werden.

Der *Verformungs- oder Abnützungsgrad der Fahrbahn,* und somit seine Zulässigkeit in bezug auf die einschlägigen Normen, wird in jedem Querschnitt durch zwei wichtige Kenngrössen definiert:

- die Muldentiefe T und
- die Wassertiefe t gemäss SNV-Norm 640520a.

Für den verantwortlichen Ingenieur ist es von grösster Bedeutung, diese Parameter sowie ihre räumliche und zeitliche Entwicklung zu erfassen. Er ist deshalb auf eine leistungsfähige aber kostengünstige Untersuchungsmethode angewiesen. Die Auslegung einer entsprechenden Messausrüstung soll durch ihre Flexibilität die Anpassung an veränderliche Anforderungen erlauben; es kann nämlich wünschenswert und wirtschaftlich vertretbar sein, in einer ersten Phase die zu prüfende Strecke vorerst rein *qualitativ* zu untersuchen. Bei diesem ersten Schritt vermag der fahrende Praktiker sehr schnell die gesunden Bereiche von denjenigen zu unterscheiden, die als schadhaft zu betrachten sind.

Eine zweite *quantitative* Phase wird der Detailuntersuchung der offenbar schadhaften Zonen gewidmet sein. Zu diesem Zweck nimmt eine Messeinrichtung die Querschnitte zahlenmässig auf und wertet sie aus, indem Muldentiefe T und Wassertiefe t berechnet werden. Die Messausrüstung kann anschliessend die gewonnenen Werte einer Strassen-Datenbank zuführen, wo sämtliche Kenndaten für das verwaltete Strassennetz zusammengetragen werden. Zu diesem Zweck hat unser Labor eine *optische Messeinrichtung* konzipiert und entwickelt, die die Feinuntersuchung der Strassenoberfläche ermöglicht. Die Aufzeichnung der Feintopographie erfolgt kontinuierlich in Echtzeit (Real Time).

Die Messmethode

Die angewandte Methode ruht auf dem *Moiré-Verfahren;* es werden ein Referenz- und ein der untersuchten Oberfläche angepasster Linienraster übereinandergelegt, so dass die Form oder die Verformung der geprüften Oberfläche lückenlos erfasst werden können [2, 3].

Für die Fahrbahnuntersuchung wird der Oberflächenraster von einem Dia-

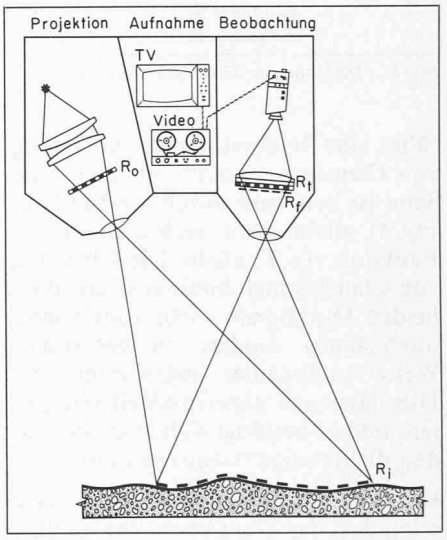


Bild 1. Prinzip der Messung

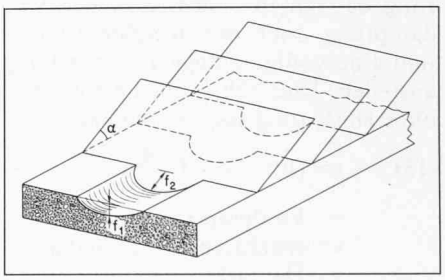


Bild 2. Verbesserung der Empfindlichkeit durch schräge Ebenen

positiv auf die Strasse abgebildet (Bild 1). Das Bild dieses Rasters (R_f) wird in der Bildebene des Aufnahmegerätes mit dem Referenzraster superponiert, so dass ein Moiré-Effekt entsteht. Die Moiré-Streifen sind - dank einer angepassten optischen Kombination - die Höhenkurven der untersuchten Oberfläche. Die geeignete Wahl der geometrischen Parameter ermöglicht es, diese Höhenkurven auf eine vorbestimmte Ebene zu beziehen. Durch diesen besonderen Umstand können kleine Höhenabweichungen von der Bezugsebene sichtbar gemacht werden: Die untersuchte Zone wird durch eine Anzahl N von schrägen Ebenen geschnitten (Bild 2). Diese optische Einteilung dient also