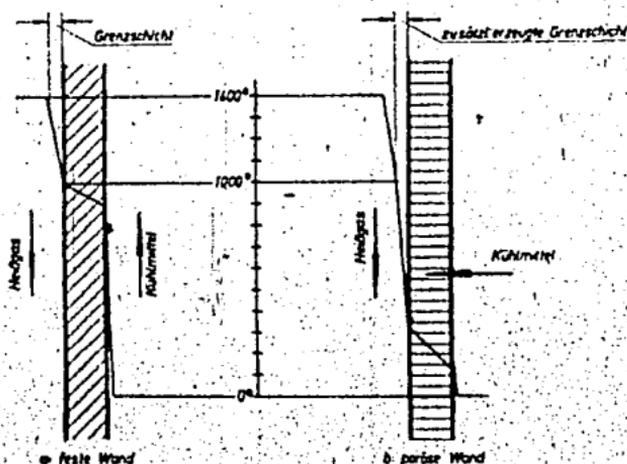


Sonderwerkstoffe für R-Antriebe

Von Otto Lutz

Die Auslaßdüsen von R-Antrieben sind thermisch hoch belastet und müssen deshalb in vielen Fällen gekühlt werden.

Ein wirksames Kühlverfahren besteht in der Ausbildung eines Kühlmittelschleiers auf der thermisch beanspruchten Oberfläche. Diese Kühlmittelgrenzschicht bildet sich dann gut aus, wenn man sie durch Poren im Material zuleitet. Poröse Baustoffe in Verbindung mit einem Kühlmittel haben wir analog dem physiologischen Vorgang Schwitzbaustoffe genannt. In Abbildung 1 ist der Temperaturverlauf bei Schwitzbau-



Abh. 1

Temperaturverlauf in einer festen und einer porösen gekühlten Wand

stoffen dem einer außengekühlten festen Wand gegenübergestellt. Kennzeichnend ist die zusätzliche Grenzschicht, die ähnlich einem Loydenfrostischen Phänomen die Wand vor zu großem Wärmeeinfall schützt, durch Verdampfung die Grenzschicht kühlt und Wärme aus der Wand aufnimmt. Die drei Teilwirkungen ergeben die wiedergegebene erheb-

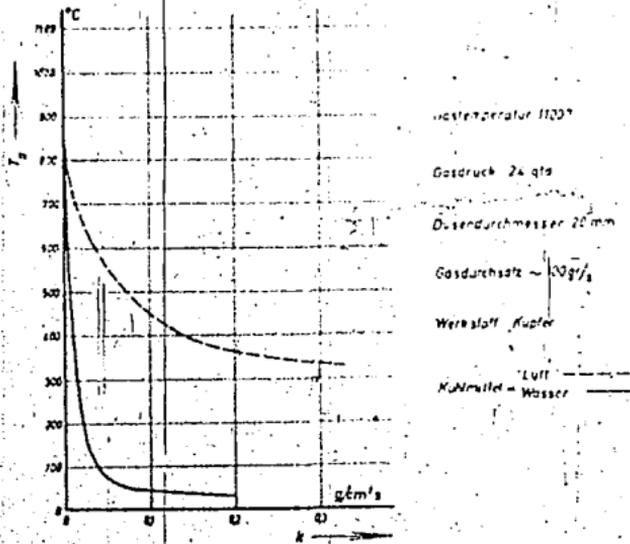


Abb. 2

— Oberflächentemperatur abhängig von der Kühlstromdichte

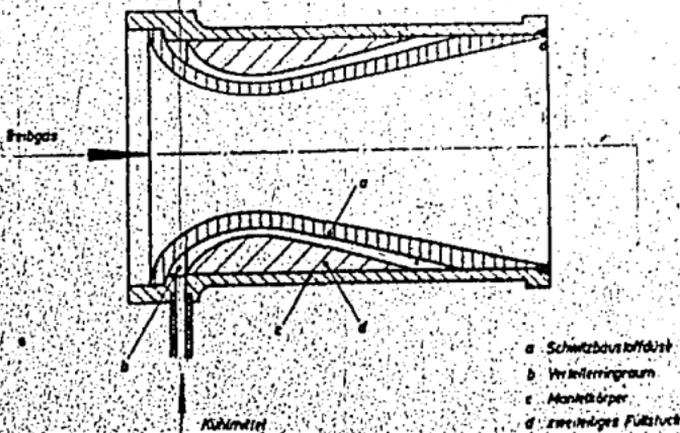


Abb. 3

Schema einer Düse aus Schweißhaustoff

liche Senkung der Oberflächentemperatur, die die Verwendung der Schweißbaustoffe auch bei Temperaturen ermöglicht, bei denen undurchlässige, mantelgekühlte Metalle zerstört werden.

Die Nachmessung der Oberflächentemperatur von Schweißbaustoffen mittels eines in die Oberfläche eingesinteren Thermoelements ergab den in Abbildung 2 wiedergegebenen Temperaturverlauf abhängig von der Kühlstromdichte. Bei einer Gastemperatur von 1100°C und einer Strömungsgeschwindigkeit von 600 bis 700 m/s wird bei 0,01 g Kühlmittel je Sekunde und cm^2 die Wandtemperatur auf 100°C herabgesetzt. Die ebenfalls wiedergegebenen Temperaturen für Luft als Kühlmittel beweisen die Wirksamkeit der Schmelzschichtbildung.

Aus Metallpulvern lassen sich durch Sintern Körper ausreichender Festigkeit und geeigneter Porosität herstellen, so daß die Auslaßdüse nach der Art der Abbildung 3 hergestellt werden kann. Die innere Wand

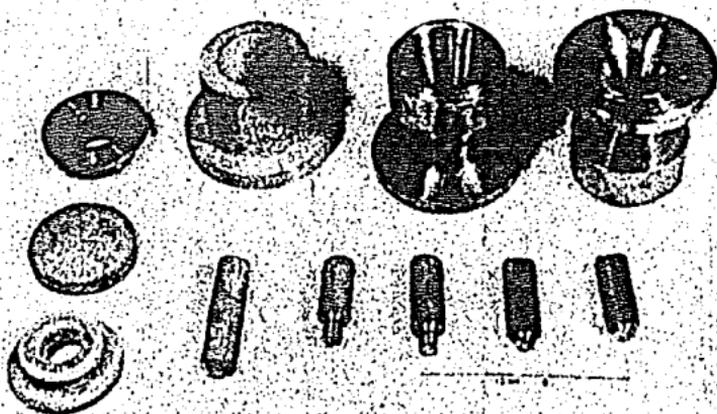


Abb. 4
Entwicklung von Schweißbaustoff-Düsen

besteht hier aus Schweißbaustoff, das abdichtende Gehäuse aus Stahl. Die entsprechende Schweißdüsenentwicklung bis zur Lavaldüse, beginnend mit Blenden, ist aus Abbildung 4 zu ersehen.

Die erforderliche Kühlstromdichte für Auslaßdüsen aus Kupfer in Abhängigkeit von der Gastemperatur gibt für verschiedene Pecletische Zahlen Abbildung 5 wieder. Bei einem Brennkammerdruck von 36 kg/cm^2

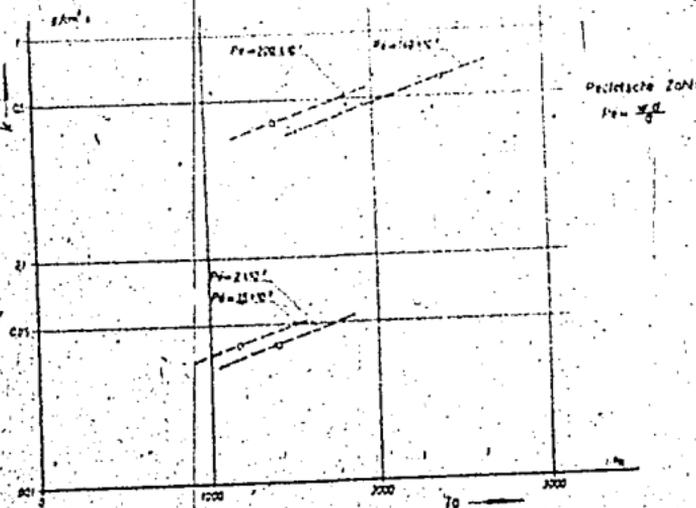


Abb. 5

Benötigte Kühlstromdichte in Abhängigkeit von der Gastemperatur

und 2400°K Gastemperatur ($P_e = 140 \times 10^5$) wurden im Dauerbetrieb $0,6\text{ g/cm}^2\text{ s}$ Kühlmittel verbraucht. Auf den Heißgasdurchsatz der Düse bezogen ergibt sich, daß der Kühlstrom bei dieser Düse weniger als 2% des durchgesetzten Gasgewichts betragen muß, Werte, die eigentlich bei jeder Konstruktion tragbar sein müßten, um so mehr, wenn man berücksichtigt, daß die Wärmeaufnahme des Kühlmittels dem thermodynamischen Prozeß zum Teil wieder zugute kommt.

Bisher wurden hauptsächlich Schwitzbaustoffe aus Kupfer und Eisen untersucht, doch können auch andere Metalle verwendet werden, vor allem Aluminium. Die Festigkeit der Schwitzbaustoffe ist ungefähr im Verhältnis der jeweiligen Porosität geringer als die nichtporöser Werkstoffe. Aus Stahl lassen sich neuerdings Schwitzbaustoffe mit über 50 kg/mm^2 Zugfestigkeit herstellen.

Bei der Entwicklung der Schwitzbaustoffe sind wir vom nichtmetallischen keramischen Baustoff ausgegangen, doch traten beim Einbau in die Stahlkonstruktion durch die verschiedene Wärmedehnung große Schwierigkeiten auf, so daß man zum metallischen Schwitzbaustoff übergehen mußte. Da die Verwendung nichtmetallischer Baustoffe an sich große Vorteile brächte, wurde versucht, diese Werkstoffe mit der Metallkonstruktion durch Schweißen zu verbinden. An die Keramik werden Zonen aus Metall angesintert, wobei die Verbindungsstelle Zwischenschichten

mit wachsenden Anteilen des Metalles hat, so daß die durch die Materialverschiedenheit auftretenden Spannungen langsam abgebaut werden. Abbildung 6 zeigt einen derartigen keramischen Körper, an dessen oberem und unterem Ende ein Kopf aus reinem Metall angesintert ist; das Mittelstück besteht aus einer Mischung von Kupfer und Oxydkeramik. Die Zugabe des Kupfers erhöht die Temperaturwechselbeständigkeit der Oxydkeramik, so daß mit dieser Anordnung Schwierigkeiten behoben

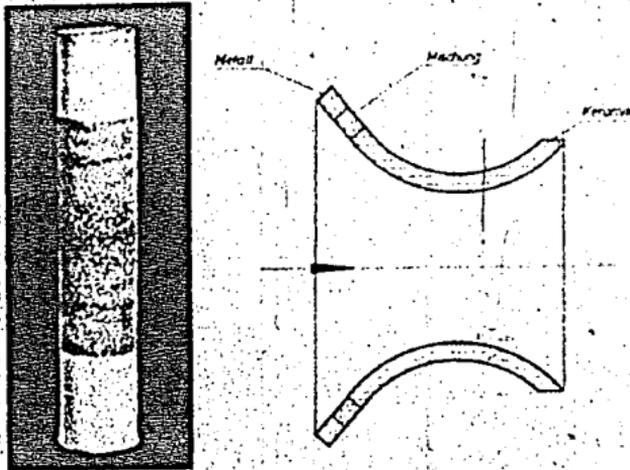


Abb. 6
Probekörper und Düse aus Verbundwerkstoff

werden können, die durch eine zu geringe Temperaturwechselbeständigkeit hervorgerufen werden. Mit dieser Art von Verbundwerkstoffen dürften sich viele Einbauschwierigkeiten bei Keramiken beheben lassen, so daß diese in größerem Maße verwendbar werden als bisher.

Eine geeignete Weiterentwicklung der Verbundwerkstoffe wird zu einem Material führen können, das ohne Kühlung hohen Temperaturen gewachsen ist; vor allem eröffnen sich hier auch Aussichten für Turbinenschaufeln.

Die geschilderten Arbeiten führt mein Mitarbeiter Meyer-Hartwig durch, von dem auch die ursprüngliche Idee der Schwitzbaustoffe stammt.

Aussprache

Busemann: Meine Herren! Ich danke dem Vortragenden. Er hat uns gezeigt, daß selbst der einfache Aufbau eines Brennräume noch keine Gewähr dafür ist, daß auch die Ähnlichkeitsverhältnisse sich einfach bauen lassen, daß es im Gegenteil hier sehr viel schwieriger ist, Ähnlichkeitsbeziehungen als im Motor herzustellen. Der zweite Teil des Vortrags befaßte sich schon mit Stofffragen, insbesondere mit Verbrennungsfragen. Ich möchte nun fragen, ob zum ersten Teil eine Aussprache erwünscht ist, also zu der Frage der Kennzahlen.

Schelp: Ich möchte darauf hinweisen, daß ähnliche Verhältnisse ja auch bei TL-Triebwerken vorliegen. Auch bei diesen Brennkammern ist bisher nur eine Kennzahl eingeführt worden, die den Ansprüchen nicht absolut gerecht wird. Sie ist von der Kesseltechnik übernommen worden und wird in $\text{kg/PS} \times \text{h}$ angegeben, wobei natürlich bekannt ist, daß die Brennraumlänge eine entscheidende Rolle spielt. Wahrscheinlich sind das dieselben Vorgänge, wie sie auch bei den R-Triebwerken vorliegen. Ich wäre dankbar, wenn eine wesentliche Vereinfachung der ganzen Begriffsbestimmungen möglich wäre, und zwar im Hinblick auf das gesamte Triebwerksgebiet.

Madelung: Zur Frage der Kennwerte möchte ich auf etwas hinweisen, was so banal ist, daß ich um Entschuldigung bitten muß, daß ich es überhaupt erwähne. Ich denke dabei an die Schreibweise für den Betriebsstoffverbrauch, der meist in $\text{kg/PS} \times \text{h}$ oder $\text{g/kg} \times \text{sec}$ angegeben wird. Warum so kompliziert, was man auch einfach schreiben kann, nämlich als eine Länge oder eine Zeit! Die Länge ist die Höhe, auf die der verbrauchte Brennstoff sein Gewicht gehoben haben würde. Die Zeit ist die, während welcher der verbrannte Brennstoff sein Gewicht tragen könnte.

In dieser Form schreiben wir die bekannten Formeln der Flugmechanik viel einfacher als in der üblichen Schreibweise.

Busemann: Bei den R-Antrieben sind drei Darstellungen für die Verbrauchszahl in Anwendung gekommen: 1. die Verbrauchszahl ausgedrückt durch den Brennstoffverbrauch, bezogen auf Schubkraft und Zeiteinheit, 2. deren Kehrwert mit der Dimension einer Zeit und 3. der erzeugte Impuls geteilt durch die ausgestoßene Masse, also eine Geschwindigkeit. Die dritte Darstellung geht aus der zweiten hervor, wenn man sie mit der Erdbeschleunigung multipliziert. Alle Darstellungsarten sind durchaus anschaulich zu deuten, doch braucht man für die anschauliche Deutung der Zeit das Erdschwerefeld, in dem die in der angegebenen Zeit verbrauchte Masse ein Gewicht bedeutet, das ihrem Schub entspricht. Die Geschwindigkeit erhält man dagegen durch Anwendung des absoluten Maßsystems, also unabhängig vom Schwerfeld, und sie ist direkt die mittlere Austrittsgeschwindigkeit der Verbrennungsgase. Die meisten Forschungsstellen arbeiten heute an Prüfständen und haben sich bei dieser Tätigkeit daran gewöhnt, die verbrauchten Mengen zu messen und im Verhältnis zu dem erzeugten Impuls anzugehen, z. B. in Gramm pro Kilogramm und Sekunde.

E. Schmidt: Ich möchte zu den Ausführungen von Herrn Schelp noch sagen: Man wird bei dem Verbrennungsvorgang, dessen Geschwindigkeit wesentlich eine Frage der Mischung und des Turbulenzzustandes ist, nicht auskommen mit Angaben über die äußeren Verhältnisse des Brennräume, sondern man muß noch einen Weg suchen, um den Turbulenzzustand, also um die Größe der Energie, die in turbulenter Mischbewegung

in dem hineingebrachten Gemisch vorhanden ist, sowie die Art ihrer Verteilung auf große und kleine Wirbel zu kennzeichnen. Ich glaube, daß wir nur auf dem Wege zu einer wirklichen Beurteilung der Verbrennungsgüte eines Brennraumes kommen können. Es ist vielleicht Aufgabe der Forschung, nach geeigneten Größen zu suchen, welche als Maß für diesen Turbulenzzustand geeignet sind.

Lutz: Ich möchte zu den Ausführungen des Herrn Madelung bemerken: So einfach kürzen sollte man ja eigentlich nicht, denn das eine ist eine Kraft, die erzeugt wird, und das andere eine Masse, die man dazu verbraucht hat.

Madelung: Eine Menge!

Lutz: Wenn wir später einmal mit Kilopond und Kilogramm rechnen, dann erledigt sich diese Frage ganz von allein. Es ist dasselbe wie bei der Förderhöhe eines Verdichters, wo man auch nicht die Arbeitsdimension mg durch die Massendimension kz dividieren sollte, denn die Maßzahl einer bezogenen Arbeit müßte unabhängig davon sein, ob die Arbeit am Äquator oder an den Polen geleistet wird. Zu der Frage der gebildeten Verhältniszahlen: Es ist klar, daß es innerlich gesehen, ein grobschlächtiges Verfahren ist, aber der Ingenieur braucht nun einmal eine Sprache, die ihn befähigt, sich untereinander zu verständigen; und von den Abmessungen und Werten, die für einen Brennraum maßgeblich sind, kann man tatsächlich gewisse Werte, die auch anschaulich sind, als Verhältniswerte bilden. Ich habe mit Absicht vermieden, den einen oder anderen Wert besonders hervorzuholen, weil der Boden, auf dem wir heute stehen, noch zu unsicher ist. Daß man Unterschiede machen muß bezüglich der einzelnen verwendeten Verfahren, ist auch verständlich. Aber es ist vielleicht noch nicht allgemein bekannt, daß zwischen den heute verwendeten Verfahren keine sehr großen Unterschiede mehr bestehen. Natürlich wird man, wenn man einen Brennraum vergleicht, angeben müssen, mit welchem Verfahren er betrieben worden ist. Insgesamt sollten die Betrachtungen nur eine Diskussionsgrundlage geben und einen Anfang darstellen auf dem Weg der Beurteilung der weiteren Entwicklung.

von Philippovich: Wurde das Luft-Kraftstoff-Verhältnis bestimmt?

Lutz: Es ist nur durch die Schubmessung und die Verbrauchsmessung bestimmt worden.

E. Schmidt: Es wurde eben von Kilopond und Kilogramm gesprochen. Ich möchte zur Diskussion stellen, ob man nicht auf dem R-Gebiet sich an die Unterscheidung zwischen Kilopond und Kilogramm, also Kilogrammkraft oder Kilogrammgleichgewicht einerseits und Kilogrammmasse andererseits gewöhnen sollte. Man würde dann eben mit vier Maßeinheiten rechnen. Dagegen bestehen keine Bedenken, denn die Wahl von gerade drei Maßeinheiten — Länge, Zeit und Masse oder Länge, Zeit und Gewicht — ist durchaus willkürlich und in keiner Weise tiefer begründet, wie etwa die Dreizahl der Raumkoordinaten. Man könnte, wenn man wollte, ebensogut mit zwei Maßeinheiten, z. B. mit Länge und Zeit allein, auskommen und daraus alle anderen Einheiten ableiten. Man brauchte nur außer dem Trägheitsgesetz der Mechanik noch ein weiteres nicht weniger allgemeines Gesetz, nämlich das der allgemeinen Massenattraktion heranzuziehen und käme von drei auf zwei Einheiten. Statt willkürlich drei Grundeinheiten zu verwenden, kann man ebensogut auch mit vier Grundeinheiten rechnen, also neben dem Kilogramm auch das Kilopond einführen. Zum Teil wird das schon gemacht; und man vermeidet dann die Zweideutigkeit der Bezeichnung Kilogramm. Mein Vorschlag wäre also, im ganzen R-Triebwerkswesen das Kilopond neben dem Kilogramm als Einheit zu verwenden.

Herr Madelung betont nochmals die Vorteile der von ihm vorgeschlagenen Kennwerte in der praktischen Rechnung.

Busemann: Ich glaube, daß wir diese Anregungen zur Kenntnis nehmen sollten, ohne in eine Aussprache darüber einzutreten, denn es hat sich schon an anderen Stellen herausgestellt, daß gerade die Auffassungen über die Grundbegriffe zu verschiedenartig sind, daß gewöhnlich eine endlose Aussprache ohne wesentliche Klärung herauskommt.

Wagner: Ich bin mit Herrn Madelung der gleichen Ansicht, daß es bei Raketen zweckmäßig ist, als Maß der spezifischen Leistungsfähigkeit den Impuls geteilt durch das Gewicht zu wählen. Die sich so ergebende Sekundenzahl gibt die Zeit an, die die Rakete ihr Eigengewicht ruhend tragen kann. Diese Zeit hat aber auch eine andere, praktisch wichtigere Bedeutung; sie ist nämlich stets die Steigzeit bis zur Gipfelhöhe, wenn man ruhenden Start voraussetzt und senkrechten Anstieg bei Vernachlässigung des Luftwiderstands nimmt. Der Geschwindigkeitsverlauf ist dabei völlig gleichgültig. Ich würde daher meinen, daß man diese Sekundenzahl zweckmäßigerweise die Steigzeit nennen soll.