

Empirie nicht zu lösen. Es ist erforderlich, über die grundlegenden Zusammenhänge auch wissenschaftlich Klarheit zu schaffen.

Da der flüssige Sauerstoff sich durch die dauernde Wärmeaufnahme von außen stets im Sieden befindet, ist der Zustand im Sauerstofftank mit dem eines Dampfkessels zu vergleichen, der von außen angeheizt wird.

Über die Verhältnisse bei der Verdampfung von Flüssigkeiten besteht nun rechnerisch völlige Klarheit. Die gesamten Berechnungen im Dampfmaschinenbau beruhen auf dieser „Thermodynamik der Dämpfe“.

Es zeigt sich nun leider, daß die Berechnungsmethoden des Dampfmaschinenbaues sich für die Verhältnisse im Sauerstofftank nicht einfach übertragen lassen. Das liegt nicht etwa daran, daß der Sauerstoff andere Gesetze befolgt als das Wasser. Es sind vielmehr hier nicht die Voraussetzungen gegeben, auf denen die Lehre von den Dämpfen ihre Schlüsse aufbaut.

Das grundlegende Axiom der Dampfthermodynamik, auf dem alle weiteren Folgerungen basieren, besagt, daß in einem geschlossenen Gefäß die Temperatur des entwickelten Dampfes solange mit der der siedenden Flüssigkeit übereinstimmt, als auch nur noch ein Tropfen Flüssigkeit vorhanden ist. Erst wenn die gesamte Flüssigkeit verdampft ist, kann die zugeführte Wärme zur Erhitzung des Dampfes führen.

Die Höhe der Siedetemperatur, die im „ungesättigten“ Zustand also sowohl für den Dampf als auch für die Flüssigkeit gilt, ist eine eindeutige Funktion des Druckes, die auch für Sauerstoff bekannt ist.

Da im Sauerstofftank Flüssigkeit und Dampf nun stets in unmittelbarer Berührung stehen, so wäre auch hier dieser Zusammenhang zu erwarten. Die Erfahrung lehrt aber, daß dieses nicht der Fall ist. Versuche von Gruschka* ergaben, daß flüssiger Sauerstoff, in einem geschlossenen Gefäß sich selbst überlassen, bei seinem langsamen Druckanstieg völlig ungleichmäßig durchgewärmt wurde. Zunächst traten allein zwischen den oberen und unteren Schichten der Flüssigkeit schon Temperaturdifferenzen von über 10° auf; dann aber erwies sich auch der Dampf als erheblich wärmer als die Flüssigkeit. Vor allem aber stieg der Druck viel schneller an, als die Sättigungstemperatur zu folgen vermochte. Wurde umgekehrt ein weiterer Druckanstieg durch Öffnen eines Entlüftungshahnes verhindert, so nahm die Temperatur der Flüssigkeit weiter zu. Der Druck- und Temperaturablauf erfolgte dabei von Versuch zu Versuch nur dann ungefähr gleich, wenn der gleiche Behälter verwendet wurde. Allgemeingültige Gesetzmäßigkeiten über die bei dem Druckanstieg vorliegenden Verhältnisse aufzustellen, erscheint daher unmöglich.

Die Tatsache, daß der Sauerstoff bei verhindertem Druckanstieg eine fortschreitende Durchwärmung erfährt, ist nun von großer praktischer Bedeutung für die Frage des Druckzusatzes. Je näher die Flüssigkeitstemperatur dabei nämlich an die Sättigungstemperatur herankommt, um so heftiger wird bei Beginn der Entleerung der Tanks (d. h. bei Brennbeginn) die Verdampfung einsetzen und um so weniger Zusatzgas wird also nötig werden.

Es ist also als praktische Handhabungsregel zu beachten: Bei flugfähigen Aggregaten kann die Kapazität des Druckzusatzaggregats kleiner und dieses somit leichter gehalten werden, wenn etwas mehr Sauerstoff als erforderlich getankt und der Überschuß vor dem Zünden bei dem Betriebsdruck der Tanks abblasen gelassen wird.

Da das in die Tanks geleitete Zusatzgas stets wärmer ist, als der auf dem Sauerstoff lagernde Dampf, so zieht dieses sich bei dem Hineinströmen in den Sauerstofftank zusammen. Ist das Zusatzgas (also Stickstoff) in komprimierter Form untergebracht wie bei dem ersten hier entwickelten Zusatzgerät, so ist also nicht das volle Normalvolumen des Gases verwertbar, sondern nur ein Teil davon. Ist der Zusatzstickstoff aber

gar in flüssiger Form untergebracht, wie bei dem Vorlage-system, so würde der Stickstoff einfach bei dem Hineinströmen in den Sauerstofftank flüssig bleiben und überhaupt kein Zusatzgas entwickeln. Damit dieses nicht eintritt, muß der aus der Vorlage tretende flüssige Stickstoff einen Verdampfer durchwandern. Wegen der Rückkühlung des Gases im Sauerstofftank ist dieser Verdampfer zweckmäßig so reichlich zu bemessen, daß er das Gas zunächst auf mindestens 100° C erwärmt. Aus der bekannten Größe der Verdampfungswärme läßt sich dann die hierzu erforderliche Wärmekapazität des Verdampfers leicht errechnen. Über die praktische Durchführung dieser Verdampfungseinrichtung wurde schon berichtet.

Auch die von außen dem Sauerstoff zufließende Wärme läßt sich nach den üblichen Methoden der Wärmeübergangsrechnung nicht berechnen. Es bildet sich hier ein ständiger dünner Dampfmantel zwischen Flüssigkeit und Behälterwand aus (Leidenfrostsches Phänomen), der den Wärmeübergang entscheidend verschlechtert. Auch durch den sich an der Außenwand bildenden Schneebelag werden die Verhältnisse erheblich beeinflußt. Man kann also nur von Fall zu Fall praktische Erfahrungswerte durch Einführung von effektiven Übergangszahlen festlegen.

Endlich ist noch einiges zu der Frage des Druckzusatzes bei später evtl. zu bauenden Hochdruckraketen zu sagen.

Bei $p_k = 51,35$ ata liegt für Sauerstoff der kritische Druck. Bei völlig homogener Durchwärmung von Flüssigkeit und Dampf entspricht diesem Druck eine kritische Temperatur von $t_k = 119^{\circ}$ C. Oberhalb dieser Temperatur ist Sauerstoff im flüssigen Zustand nicht mehr denkbar. Die der Flüssigkeit zufließende Wärme geht also von diesem Punkt ab ausschließlich in Verdampfungswärme über.

Tatsächlich findet auch schon erheblich unterhalb des kritischen Druckes eine sehr lebhaft zunehmende Verdampfung statt, die sich in einem raschen Anstieg des Druckes äußert. Würde man also eine Flüssigkeitsrakete mit einem Tankdruck betreiben, der nicht sehr weit unter dem kritischen Druck liegt, so hätte man die grundsätzliche Möglichkeit, durch die Sauerstoffverdampfung die gesamte Druckentwicklung ohne Zuhilfenahme von Verdampfungsvorrichtungen zu bestreiten. Durch eine einfache ungesteuerte Stickstoffvorlage könnte dabei auch der Druck im Brennstofftank ergänzt werden; ein Verdampfer wäre hier ebenfalls nicht erforderlich.

Auf der anderen Seite besteht aber bei einem solchen Betrieb stets die Gefahr, daß der Druck dabei unbeabsichtigt zu rasch steigt. Wird z. B. nur wenige Sekunden zu spät gezündet, so kann der Druck in der Zwischenzeit leicht um mehrere Atmosphären zunehmen. Es wäre also bei derartigen Aggregaten eine automatische, durch den Druckanstieg zu betätigende Zündung notwendig, die sich freilich mit einem Kontaktmanometer oder dgl. leicht bewerkstelligen ließe.

Ob sich eine derartige Lösung des Druckzusatzproblems mit befriedigender Betriebssicherheit ergeben wird, kann nur die Praxis entscheiden. Im Augenblick erscheint die Entwicklung derartiger Geräte jedenfalls noch verfrüht.

Tankdrücke von über 50 ata sind natürlich überhaupt nicht möglich. Wollte man Raketen mit derart hohen Betriebsdrücken bauen, so wäre also nur eine Förderung des Sauerstoffes mit pumpenähnlichen Vorrichtungen möglich.

4. Das zusammengebaute Aggregat

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte zusammengebaute Aggregat ist ein reines Studienobjekt, das noch nicht im Hinblick auf einen bestimmten Verwendungszweck geschaffen wurde. Ausgehend von der Erfahrung, daß bei einer so neuen Erfindung nur sehr kleine und vorsichtige Schritte die Entwicklung sicher fortzutragen vermögen, sollte dieses Gerät nur die

* Gerhard Gruschka, Zugversuch und Verlauf der Festigkeitskurven von Stählen bei Tieftemperaturen. Dissertation an der Technischen Hochschule zu Berlin vom 30. Juni 1932.