

Physikalisch-chemische Gesichtspunkte zur Klopfwert-
bestimmung von Kraftstoffen.

Von Prof. Dr. W. Jost, Universität Leipzig.

I. Grundsätzliche Betrachtungen.

Die Frage, ob man die Klopfwertbestimmung von Kraftstoffen durch die Messung einfacher physikalischer Größen ersetzen könne, läßt sich grundsätzlich verneinen; denn es besteht keinerlei direkter Zusammenhang zwischen solchen Größen und der Klopfreaktion.

Umgekehrt ist die Frage, ob es möglich ist, das Klopfverhalten aus allgemeinen physikalisch-chemischen, insbesondere reaktionskinetischen Untersuchungen zu ermitteln, grundsätzlich zu bejahen. Vorauszusetzen für ein derartiges Verfahren wäre:

- 1) daß der Klopfvorgang als solcher geklärt ist,
- 2) daß es für einen gegebenen Kraftstoff möglich ist, die "Klopfreaktion" in einem beliebigen Motor oder in einer Laboratoriumsanordnung hinreichend genau zu ermitteln,
- 3) daß es für einen gegebenen Motor möglich ist, die Variablen genau genug zu ermitteln, welche auf das Klopfverhalten eines beliebigen Kraftstoffes in diesem Motor von Einfluß sind.

Diese drei Punkte sollen hier zunächst kurz diskutiert werden. Dabei führen die Überlegungen automatisch auf die Frage, ob und wie es möglich ist, Klopfwertbestimmungen von einem Motor auf einen anderen zu übertragen.

Zu 1): können wir uns kurz fassen; die Ergebnisse der Arbeiten aus den letzten Jahren zwingen übereinstimmend zu dem Schluß, daß das Klopfen in einem praktisch momentanen Abreagieren des letzten Gemischrestes im Motor besteht. Solange man Ungleichmäßigkeiten in der Temperatur und in der Gemischzusammensetzung vernachlässigt, bleibt der zeitliche Unterschied für das Abreagieren verschiedener Teile des unverbrannten Gemisches sehr klein, von der Größenordnung Längendimensionen: Schallgeschwindigkeit, also einige 10^{-5} sec; für die üblichen Anzeigeeinstrumente bedeutet dies Gleichzeitigkeit. Der

Unterschied rührt daher, daß eine Störung in dem Gas sich nur mit Schallgeschwindigkeit bzw. bei endlichen Amplituden mit zwar darüber liegender, aber nicht größenordnungsmäßig verschiedener Geschwindigkeit ausbreitet, wie z.B. von E.Schmidt diskutiert. Daß das Restgemisch im Motor nahezu momentan abreagiert, wird einerseits aus unmittelbaren Beobachtungen am Motor geschlossen, folgt andererseits aus Messungen über das Selbstzündungsverhalten adiabatisch verdichteter Kraftstoff-Luftmischungen. Diese zünden bei Temperaturen und mit Zündverzügen, wie sie gerade den im Motor herrschenden Verhältnissen entsprechen. Die beim Klopfen beobachteten Stoßwellen sind im allgemeinen eine Folge des Klopfens; es bleibt noch zu untersuchen, ob in einzelnen Fällen Stoßwellen, die ja schon bei der Kompression entstehen könnten, für die Einleitung des Klopfens eine Rolle spielen.

Beim Motor bedingen die Schwankungen in Gemischzusammensetzung und im Strömungszustand, sowie der endliche Wärmeübergang Modifikationen, auf die zurückzukommen sein wird.

Zu 2: Die Ermittlung der Klopfreaktion eines gegebenen Kraftstoffes in einem beliebigen Motor ist noch nicht erledigt durch die Bestimmung der Klopfgrenze des Kraftstoffes in diesem Motor in Abhängigkeit von den in Frage kommenden Variablen, wie Gemischstärke (Luftüberschuß), Ansaugtemperatur, Ansaugdruck, Kompressionsverhältnis, Drehzahl, Kühlmitteltemperatur usw.

Die übliche Klopfwertbestimmung im Prüfmotor kommt darauf hinaus, daß man eine aus Brennstoff- und Motoreigen-schaften kombinierte Größe mißt. Diese Größe hat praktischen Wert, sowie man dafür sorgt, daß die gewonnene Klassifizierung der Kraftstoffe sich im Mittel der Klassifizierung im praktischen Motor hinreichend anpaßt, und solange die Verhältnisse von Motor zu Motor nur soweit variieren, daß die Abweichungen des Klopffverhaltens vom Mittel nicht zu groß werden. Das trifft z.B. für die CFR-Motor-Methode und ihre Anwendung auf Automobil-Motoren zu.

Die Schwierigkeiten, die einer so einfachen Klassifizierung für die Anwendung in Flugmotoren entgegenstehen,

sind hinreichend bekannt.

Das allgemeine Rezept, dieser Schwierigkeiten Herr zu werden, ist so einfach, wie eine praktische Ausführung z.Zt. schwierig ist: man eliminiere die Faktoren, die bei der Klopfwertbestimmung von dem zufälligen Prüfmotor herrühren, und berücksichtige statt dessen die Faktoren, die für den zu verwendenden Motor charakteristisch sind. Die praktische Seite werden wir später erörtern; zunächst noch einige grundsätzliche Bemerkungen. Eliminiert man die von dem Prüfmotor herrührenden Faktoren, so muß eine reine Brennstoffeigenschaft zurückbleiben; diese reine Brennstoffeigenschaft ist dann natürlich auch genau so gut ohne Verwendung irgend eines Motors, also z.B. nach unserer Methode der Zündung durch adiabatische Verdichtung und Bestimmung der Zündverzögerung in Abhängigkeit von den in Frage kommenden Variablen zu bestimmen. In letzterem Falle verbleiben gar keine grundsätzlichen Schwierigkeiten. Im ersteren Falle - Verwendung eines Prüfmotors - müßte man von der Charakterisierung der Bedingungen durch Motor- und Betriebsangaben (wie Ansaugtemperatur, Überladedruck, Kühlmitteltemperatur) zu klaren physikalischen Kennzahlen übergehen. Dies führt auf

3) die Ermittlung der Variablen, die in einem Motor auf das Klopfen von Einfluß sind, nämlich in erster Linie Druck und Temperatur des unverbrannten Gemisches in ihrer zeitlichen und (bei der Temperatur) ihrer räumlichen Verteilung. Die Diskussion der zusätzlichen praktischen Schwierigkeit, des Einflusses von zufälligen Unregelmäßigkeiten in Strömungszustand, Gemischzusammensetzung und Temperatur werde wieder zurückgestellt. Der Druckverlauf ist grundsätzlich mittels Indikatoren erhältlich, wenn auch die Genauigkeitsansprüche vielleicht etwas höher sind, als sie an die üblichen Meßmethoden gestellt werden. Für die Ermittlung der Temperaturen ist noch viel grundsätzliche Arbeit zu leisten, wofür von Wert sind Messungen mittlerer Temperaturen, von Kolben- und Zylindertemperaturen und aller den Wärmeübergang betreffenden Größen, in Abhängigkeit von allen in Frage kommenden Variablen, ferner natürlich alle Versuche zu direkten

(lokalen und momentanen) Temperaturmessungen und schließlich Druckmessungen in Kombination mit Messungen des Füllungsgrades, für Betrieb ohne und mit Zündung.

Dies ist natürlich ein Programm auf lange Sicht. Hier wird man die grundsätzliche Einwendung machen, daß es so noch keinesfalls möglich sei, die unregelmäßigen Schwankungen innerhalb des Motors mit zu erfassen, und daß deshalb an eine praktische Nutzbarmachung derartiger Messungen und Überlegungen nicht zu denken sei. Demgegenüber ist festzustellen, daß man solche Einflüsse tatsächlich nicht durch einfache physikalische Messungen wird festlegen können, daß man aber im allgemeinen schon sehr weitgehende Angaben darüber besitzen wird, wenn man an dem interessierenden Motor das Klopferverhalten eines einzigen Kraftstoffes in Abhängigkeit von allen in Frage kommenden Variablen durchgemessen hat.

II. Praktische Gesichtspunkte.

Die Folgerung für die Praxis aus dem Vorangehenden dürfte sein: man muß hier, wie in sehr vielen anderen Fällen, gleichzeitig auf zwei Wegen vorgehen. Den größtmöglichen Fortschritt, aber erst auf lange Sicht und mit viel Aufwand, wird man erzielen durch systematische Verfolgung der vorstehend skizzierten Gedanken; deshalb wird dieser Weg unbedingt nötig sein. Zur Erfüllung der Forderung der Praxis nach schnellen, wenn auch begrenzten Fortschritten, bleibt der Weg des Probierens, wobei die theoretischen Überlegungen wenigstens Fingerzeige für die einzuschlagende Richtung und für die Vermeidung überflüssiger Arbeit liefern können.

Wir sind hier einer Anregung von Dr.v.Philippovich gefolgt und haben versucht, ob es möglich ist, als erste Annäherung die Charakterisierung des Motorzustandes (d.h. die Angabe seines Zustandes durch definierte physikalische Größen) zu ersetzen durch eine Eichung des Motors durch mindestens zwei Kraftstoffe hinreichend verschiedener Charakteristik. Die Behandlung dieser Frage durch Herrn Dr. Rögner hat ergeben, daß von einem bestimmten Näherungsstandpunkt aus tatsächlich so eine Charakterisierung des Motors mög-

lich sein sollte.

Es ist schon darauf hingewiesen worden, daß man zur Berücksichtigung der im praktischen Motorbetrieb auftretenden Schwankungen (des Strömungszustandes, der Gemischzusammensetzung, der Temperatur), sowie des Wärmeüberganges einen jeden Motor mit mindestens einem Bezugskraftstoff eichen muß. Man kann nun fragen, ob sich nicht wenigstens ein Teil der Messungen physikalischer Größen am Motor ersetzen läßt durch Eichung des Motors mit mehr als einem Bezugskraftstoff. Dieser Weg erscheint tatsächlich nicht aussichtslos, wenn man bestimmte Annäherungen als zulässig betrachtet. Ob man so zu praktisch brauchbaren Resultaten gelangt, kann natürlich nur der Versuch zeigen und wir hoffen, in absehbarer Zeit in der Lage zu sein, an Hand von Versuchen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt hier genauere Aussagen zu machen.

Falls es gelingt, den Zustand eines Motors durch Eichmessungen mit mindestens zwei Bezugskraftstoffen wesentlich verschiedener Charakteristik hinreichend genau zu charakterisieren, dann scheint es sinnvoll zu fragen, ob man unter Benutzung dieser Daten Klopffwertbestimmungen eines Kraftstoffes an einem Motor auf einen anderen Motor übertragen kann. Diese auf Herrn Dr. v. Philippovich zurückgehende Fragestellung ist bei uns auf Grund des vorhandenen Materials eingehend diskutiert worden. Es scheint - auf Grund des immerhin sehr beschränkten Materials - daß eine Übertragung der Klopfgrenzkurve im p - ϵ -Diagramm von einem Motor auf einen anderen möglich ist; dies wäre natürlich an weiterem Material zu überprüfen und das benutzte heuristische Verfahren gegebenenfalls zu modifizieren. Es sei aber bemerkt, daß die Übertragung der praktisch wichtigsten λ -Überladungs-Grenzkurve von einem Motor auf den anderen zunächst noch nicht gelingt. Dies hängt vermutlich u.a. damit zusammen, daß die Zusammensetzung des klopfenden Anteils von Motor zu Motor infolge wechselnder Restgaszumischung, ungleichmäßiger Gemischbildung usw. stark schwankt und man gar nicht entsprechende λ -Werte miteinander vergleicht. Hier kann erst weiteres experimentelles Material eine Entscheidung bringen.