

Aktuelle Probleme bei Verbrennungsmotorenölen*

Von P.-D. Dr. M. BRUNNER

Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt, Zürich

1. Einleitung

Die Entwicklung des Motorfahrzeugs wie auch des Flugzeugs geht offensichtlich dahin, Menschen und Frachten zu allen Tages- und Jahreszeiten, bei jeder Witterung, immer schneller, sicherer und komfortabler zu befördern, gleichzeitig aber Unterhaltszeit und -kosten möglichst klein zu halten.

Viele Jahrtausende mußten verstreichen, ehe der Mensch, man kann sagen, fast plötzlich, innerhalb eines Menschenalters, es lernte, die im Erdöl schlummernden kalorischen Energien in geeigneten Maschinen, den Otto- und Dieselmotoren, in jüngster Zeit auch den Gasturbinen, in Energie der Bewegung überzuführen und so nutzbar zu machen.

Die nur schon in den letzten drei Jahrzehnten erfolgte Entwicklung der Verbrennungs-, insbesondere der Ottomotoren ist nun in verschiedener Beziehung sehr bemerkenswert. Oberstes Gebot für einen Motorenkonstrukteur war seit jeher, sowohl eine möglichst hohe *Hubraumleistung* als auch – besonders wichtig bei Flugmotoren – ein möglichst niedriges *Leistungsgewicht*, dabei aber – nicht minder wichtig – einen möglichst kleinen spezifischen, auf eine Pferdekraftstunde bzw. auf einen Tonnenkilometer bezogenen *Kraftstoffverbrauch* zu erreichen.

Ein niedriger Kraftstoffverbrauch trägt außer der Verringerung der Betriebskosten dazu bei, den *Aktionsradius* der Verkehrs- und Transportmittel oder, vorzugsweise bei Flugzeugen, auch die *Nutzlast* zu erhöhen. Wohl die vornehmste Aufgabe für den verantwortungsbewußten Motorenkonstrukteur liegt aber, auf weite Sicht betrachtet, darin, daß mit der besseren motorischen Ausnützung der im Erdöl steckenden Energie die Erdölvorräte selbst nach Möglichkeit geschont werden, eine bei der gewaltig zunehmenden Motorisierung und dem entsprechend anwachsenden Kraftstoffbedarf höchst bedeutsame Zielsetzung.

Wenn heute, verglichen etwa mit dem Jahre 1924/25, Ottomotoren eine fast doppelte, Flugmotoren eine bis dreimal höhere Hubraumleistung, dabei einen um gegen 50 % niedrigeren spezifischen Kraftstoffverbrauch aufweisen, so konnte dieser Fortschritt nur durch eine größere Zahl von parallel vor sich gehenden Einzelentwicklungen realisiert werden. So war es, um nur ein bezeichnendes Beispiel zu nennen, ganz ausgeschlossen,

Hubraumleistung und Kraftstoffverbrauch durch die bekannten Mittel der Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses, der Überladung, der Erhöhung der Drehzahl zu verbessern, ohne gleichzeitig auch der Werkstoffeigenschaften, der Form des Verbrennungsraumes und der Ausgestaltung der verschiedenen beweglichen Motorteile zu gedenken, und im weiteren die Klopffestigkeit des Kraftstoffs sowie insbesondere die maßgeblichen Eigenschaften des *Schmieröls* entsprechend zu verbessern.

Gewöhnlich ist in diesem Wettstreit der Entwicklung der Motorenkonstrukteur der richtungsweisende Teil. Er zwingt, in seinen Konzeptionen der Realität oft weit vorausseilend, den Mineralölchemiker, ständig noch bessere, hochwertigere Kraft- und Schmierstoffe zu entwickeln, damit sie sich den erhöhten Anforderungen als gewachsen erweisen. Natürlich dürfen die ständig höheren Herstellungskosten solcher Betriebsstoffe nicht etwa wieder die erwähnten motorischen Vorteile zunichte machen.

Aber nicht nur der Motorenkonstrukteur trägt, wenn man so sagen darf, die Schuld an der Verschärfung der Anforderungen an die verschiedenen im Fahr- und Flugbetrieb benötigten Betriebsstoffe, insbesondere das *Schmieröl*, sondern es liegen noch ganz andere Gründe dafür vor:

Motorfahrzeug und Flugzeug sollen heute, im Gegensatz zu noch vor vierzig bis fünfzig Jahren, auch unter extremsten klimatischen Bedingungen zuverlässig und wirtschaftlich betrieben werden können. In diesem Zusammenhang sei nur darauf hingewiesen, daß heute das Auto mehr und mehr im Winterverkehr eingesetzt wird und daß mangels Einstellräume zahllose Motorfahrzeuge des Nachts selbst im Winter im Freien parkieren. Im weitern stellen der ausgesprochen intermittierende Betrieb eines großen Teils der Motorfahrzeuge, dann aber auch wieder schnelles Fahren, ferner die im Verhältnis zur Motorleistung immer kleiner werdende Ölfüllung höhere Ansprüche an das Schmieröl. Auch das Flugzeug soll trotz ungünstigster Witterungsbedingungen das ganze Jahr über flugplanmäßig seine Strecken abfliegen können, bei den hohen Steig- und Sinkgeschwindigkeiten in kurzer, oft nur nach Minuten zählender Zeit, von arktischem zu tropischem Klima und umgekehrt wechselnd. Zu allen diesen verschärften Betriebsbedingungen gesellt sich noch der Wunsch, das Überholungsintervall und den Schmierölwechsel bei den Motoren mehr und mehr auszuweiten, um die Unterhaltskosten möglichst niedrig zu halten.

* Antrittsvorlesung, gehalten am 23. Januar 1954 an der ETH.

2. Allgemeines über Motorenöl

In der vorliegenden Betrachtung soll, dem Umfang des Gebietes entsprechend, mehr in zusammenfassender Weise dargelegt werden, wie in den letzten Jahren die Entwicklung der Schmieröle für Verbrennungsmotoren, im folgenden kurz als *Motorenöle* bezeichnet, erfolgte, ferner, welche Probleme sich dabei stellten und heute noch stellen und welche Zielsetzungen sich dabei abzeichnen.

Die *Aufgaben*, die heute ein Motorenöl zu erfüllen hat, sind von einer Mannigfaltigkeit, wie sie andere Schmieröle kaum aufweisen. Neben der wichtigsten Aufgabe, die übereinandergleitenden Werkstoffe bis zu Temperaturen von 250°C, bei hohen Gleitgeschwindigkeiten und Anpreßdrücken, durch einen kontinuierlichen, widerstandsfähigen Schmierfilm, der «Vollschmierung» möglichst nahekommend, voneinander zu trennen und so Reibungsverluste, unzulässige Erhitzung und unzulässigen Verschleiß möglichst zu vermindern, soll das Motorenöl auch die abdichtende Wirkung der Kolbenringe gegen die hochgespannten Verbrennungsgase unterstützen. Dabei muß es gleichzeitig die Rolle eines Wärmeableitungsmittels übernehmen, ferner den trotz allen Vorkehrungen unvermeidlichen Metallabrieb fortschaffen und endlich noch als Korrosionsschutzmittel gegen aggressive Verbrennungsgase und Auspuffgaskondensat wirken, ein wichtiger Punkt besonders bei der längeren Stilllegung von Motoren.

Es ist, möchte man fast vermuten, eine gütige, der zunehmenden Motorisierung weitgehend entgegenkommende Vorsehung, daß in den meisten Erdölen neben den als Kraft- und Heizstoffe in Betracht kommenden Komponenten, wie Erd- und Flüssiggasen, Benzin, Petrol, Dieselmotoren usw., sich auch gerade noch geeignete höhermolekulare Verbindungen, ebenfalls vorwiegend aus Kohlenwasserstoffen bestehend, vorfinden, aus denen sich die für den störungsfreien und wirtschaftlichen motorischen Betrieb so wichtigen Schmierstoffe in vollauf hinreichenden Mengen gewinnen lassen. Dabei hat es sich bald gezeigt, daß in diesen Kohlenwasserstoffgemischen mit Molekulargewichten von etwa 300 bis 800 eine Reihe wichtiger Eigenschaften in glücklicher Weise vereinigt sind, wie z. B. geringe *Verdampfbarkeit*, Möglichkeit der Herstellung verschiedener, den besonderen Verwendungszwecken angepaßter *Viskositätsstufen*, befriedigende *Schmierfähigkeit* sowie *thermische* und *oxydative Beständigkeit*; *Indifferenz* gegenüber den im Motorenbau vorkommenden Werkstoffen und den verwendeten Kraftstoffen, ferner befriedigendes *Verhalten in der Kälte*, bei der *Lagerung*, sowie schließlich auch günstige *hygienische Eigenschaften*.

Mit der Verschärfung der Anforderungen an das Motorenöl nach dem Ersten und besonders nach den Zweiten Weltkrieg erwies es sich zunächst als zweckmäßig, unter den verschiedenen Erdölsorten vorzugsweise diejenigen zur Motorenölherstellung anzuwenden, die dank

ihren günstigen physikalisch-chemischen Eigenschaften hierzu besonders geeignet waren, d. h. solche, die günstige Schmiereigenschaften, eine flache Viskositätstemperaturkurve, gekennzeichnet durch einen hohen Viskositätsindex (V.I.) sowie eine hohe Oxydationsbeständigkeit aufweisen. Waren es zunächst die begehrten Öle pennsylvanischer Provenienz, welche den damaligen Anforderungen besonders gut entsprachen, so wurde es mit der inzwischen gewaltig zunehmenden Motorisierung für Krieg und Frieden nur allzubald offensichtlich, daß der tatsächliche Bedarf an hochwertigen Motorenölen die pennsylvanische Produktion um das Zehn- und schließlich um das Hundertfache überstieg. Dank verbesserten Raffinationsverfahren gelang es jedoch, wenn auch meist auf Kosten der Ausbeute, auch aus Erdölen anderer Provenienz durchaus brauchbare, ja für bestimmte Zwecke noch geeignetere Motorenöle herzustellen.

Mit der weiteren Entwicklung zeigte es sich aber, daß selbst die pennsylvanischen Öle, die inzwischen ebenfalls in den Genuß verbesserter Raffinationsmethoden gelangten, den ständig höher geschraubten Anforderungen, besonders den von schnelllaufenden Dieselmotoren und Düsentriebwerken gestellten, nicht mehr voll entsprechen konnten. Zudem ergab sich durch die mehr und mehr in den Vordergrund tretende Verwendung des wohl mechanisch widerstandsfähigeren, aber korrosionsanfälligeren Bleibronze-Lagermetalls statt des früher üblichen Weißmetalls die Notwendigkeit, einerseits die Bildung von korrodierend wirkenden sauren Schmierölalterungsprodukten möglichst einzuschränken, andererseits das Lagermetall zu passivieren. Gerechterweise muß allerdings festgehalten werden, daß auch der Kraftstoff an der Bildung korrodierend wirkender Produkte in mehr oder weniger starkem Maße mitbeteiligt ist.

Bevor man jedoch zu einer eigentlichen Radikallösung schritt, nämlich zur Entwicklung eigentlicher vollsynthetischer, oxydationsstabiler Motorenöle von genau bekannter Konstitution, hat man versucht, und dies mit nicht geringem Erfolg, durch Einverleibung bestimmter chemischer Zusätze, sogenannter *Additives*, eine tragbare Zwischenlösung zu erreichen, eine Maßnahme, die sich schon aus rein wirtschaftlichen Erwägungen aufdrängte.

Einnmal wurde es dadurch möglich, Schmierölfraktionen mit von Natur aus weniger günstigen Eigenschaften doch noch zu durchaus brauchbaren Motorenölen aufzuarbeiten, ein besonders bei dem in Kriegszeiten ungeheuer gesteigerten Bedarf nicht zu unterschätzender Vorteil. Sodann ist diese Lösung, von höherer Warte aus betrachtet, gleichbedeutend mit einer besseren Ausnutzung der edleren Schmierölfraktionen des gesamten in der Welt geförderten Erdöls, ähnlich, wie dies auch beim Benzin durch Anwendung von Bleitetraäthyl und der Krackverfahren realisiert wird.

Endlich sei noch auf die Möglichkeit hingewiesen, sachgemäß hergestellte Schmierölregenerate durch erneuten Zusatz geeigneter Additives wieder in durchaus

hochwertige Motorenöle überzuführen, die sich nach unsern Erfahrungen in keiner Weise von bekannten und bewährten Markenölen unterscheiden.

3. Motorenöle mit «Additives»

Unter den wichtigsten Additives, die heute einzeln oder gesamthaft den zur Aufarbeitung von modernen Motorenölen vorgesehenen Mineralölraffinaten zugesetzt werden, sind zu nennen:

1. Mittel, welche den *Stockpunkt* des Öls erniedrigen und ihm eine bessere Fließbarkeit in der Kälte verleihen;
2. Mittel, welche die *Viskositätstemperaturkurve* verflachen, d. h. den Viskositätsindex erhöhen;
3. *Oxydationsinhibitoren*, welche die Bildung von sauren Ölalterungsprodukten und von Schlamm vermindern sollen;
4. *Korrosionsverhindernde Mittel*;
5. *Schlamm dispergierende und säurebindende Zusätze*, sogenannte «Detergents», meist gleichzeitig auch Schwefelsäure bindend;
6. *Schaumverhindernde Mittel*;
7. *Farbstoffe*.

Nicht in allen Fällen ist ein Zusatz aller Additives notwendig, dies schon deshalb nicht, weil in einem einzigen Produkt oft mehrere Wirkungen vereinigt werden können.

Mit der allgemeineren Anwendung solcher Zusätze, die heute nicht mehr wegzudenken sind, ist eine neue Ära auf dem Schmiermittelgebiet angebrochen; dabei konnte es, wie dies meist zu geschehen pflegt, nicht ausbleiben, daß sich verschiedene neue Probleme und Schwierigkeiten ergaben, die selbst wieder zu mannigfachen und zum Teil auch eigentlich grundsätzlichen Untersuchungen Anlaß gaben.

Kälteverhalten. Paraffinfreie naphthenische Schmieröle zeigen beim Abkühlen, selbst auf Temperaturen wesentlich unter 0°C, eine Zunahme der Viskosität, wie man sie auf Grund der Viskositätstemperaturfunktion erwartet. Sie verhalten sich dabei weitgehend wie NEWTONSche Flüssigkeiten. Der Übergang in den Stockpunkt, der Temperatur, wo infolge hoher Viskosität praktisch kein Fließen mehr stattfindet, erfolgt allmählich. Bei paraffinbasierten Ölen dagegen, die aus verschiedenen Gründen¹ oft absichtlich nicht ganz entparaffiniert werden, erfolgt durch *Paraffinausscheidung* eine zusätzliche, meist sprungweise Verdickung des Öls. Die beim weiteren Abkühlen zum Stockpunkt sich zu einem Netzwerk ausbildenden Paraffinkristalle verunmöglichen schließlich ein freies Fließen; die (scheinbare) Viskosität – es handelt sich nunmehr um ein thixotrope Eigenschaften aufweisendes System – hat den Wert von etwa 10 000 cSt

¹ Ein Eutzug mehr oder weniger hoher Anteile an festen paraffinartigen Verbindungen, die einen V.I. von im Mittel etwa 200 aufweisen, ist gleichbedeutend mit einer unerwünschten Erniedrigung des V.I. des Öls, ganz abgesehen von der geringeren Ausbeute an Schmieröl selbst.

erreicht oder gar überschritten, so daß das Anlassen eines Fahrzeug- oder Flugmotors ernsthaft in Frage gestellt wird. Da jedoch die in den Lagern und Kolben- gleitbahnen herrschenden Scherfälle wesentlich größer sind als die bei den üblichen laboratoriumsmäßigen Bestimmungen im Kapillar-Viskosimeter herrschenden, könnte man vermuten, daß unter solchen Bedingungen selbst bei einer scheinbaren Viskosität von 10 000 cSt der Start noch leicht erfolgen würde, da unter dem im Motor herrschenden Scherfälle sich die Viskosität auf annähernd diejenige des Öls in den Poren des Paraffingerüsts reduziert, im günstigsten Falle auf diejenige, wie sie durch Extrapolation der bei 20–100°C ermittelten Viskositätskurve auf die betreffende Kaltstarttemperatur erhalten wird.

Diese Vermutung, welche die zusätzliche Verdickung des Motorenöls durch Paraffinausscheidung als für den Kaltstart nicht so bedeutungsvoll erscheinen läßt, hat sich leider nach unsern Beobachtungen in der Praxis nicht bestätigt. Bei der bei tiefer Temperatur stark verminderten Klemmenspannung und Kapazität der Starterbatterie dreht der Motor nur sehr langsam durch, wodurch sich offenbar das zu einer wirksamen Verminderung der scheinbaren Viskosität nötige hohe Scherfälle nicht innert nützlicher Frist ausbilden kann. Die zunehmende Entladung der Batterie führt sodann bald zu einer entsprechenden Erniedrigung der Anlaßdrehzahl pro Minute, was wiederum das Scherfälle vermindert, damit aber die Reibungswiderstände nicht im erwarteten Maß verringert. Der Start muß deshalb mißlingen.

Den Bemühungen der Schmierölchemiker ist es jedoch gelungen, eine solche unerwünschte Ausscheidung von Paraffinkristallen zwar mengenmäßig nicht oder nicht wesentlich zu vermindern, jedoch letztere am gegenseitigen Verfilzen zu verhindern, so daß der Kristallbrei noch eine gewisse Fließbarkeit beibehält. Durch Zusatz von sogenannten *Stockpunkterniedrigern*, die vermöge ihrer chemischen Konstitution und der dadurch bedingten Löslichkeitseigenschaften im richtigen Moment an den ausfallenden Paraffinkristallen adsorbiert werden, kann das Kälteverhalten bzw. die Fließbarkeit von nicht vollständig entparaffinierten Schmierölen ohne Benachteiligung der übrigen Eigenschaften wesentlich verbessert werden. Erfreulich ist dabei, daß die früher auf diesem Gebiete herrschende Empirie in jüngster Zeit eigentlicher wissenschaftlicher Forschung Platz gemacht hat. Dank derselben wurde es möglich, die verschiedenen Zusammenhänge zu erkennen, die zwischen chemischer Konstitution des Stockpunkterniedrigers und seiner Wirksamkeit bestehen, insbesondere des Einflusses der Länge des Alkylrestes der Estergruppen bei Zusätzen auf Polyacrylesterbasis. Solche Produkte verdicken das Öl zwar etwas, bewirken aber gleichzeitig eine willkommene Erhöhung des V.I. Selbstverständlich wirken sie nur bei paraffinhaltigen Schmierölen, nicht aber bei naphthenischen, die einen sogenannten Viskositätsstockpunkt zeigen.

Viskositätsverlauf. In verschiedener Beziehung von besonderer Wichtigkeit, sowohl bei der Verwendung des Motorenöls in Flug- als auch in Fahrzeugen, ist ein möglichst flacher Verlauf der Viskosität mit der Temperatur, der in einem hohen «Viskositätsindex» zum Ausdruck kommt. Nicht nur wird dadurch (ein genügend tiefer Stockpunkt vorausgesetzt) ein besseres *Startvermögen* bei tiefen Wintertemperaturen erzielt, sondern das Öl wird nach dem Start auch rascher an die Schmierstellen gepumpt. Andererseits wird es bei den hohen Lager- und besonders den noch höheren Kolbentemperaturen wieder nicht allzu dünnflüssig, womit sowohl der Schmierfilm tragfähiger bleibt als auch ein besseres Abdichtungsvermögen gewährleistet wird. Im allgemeinen ist bei gleicher Viskositätsstufe auch die *Verdampfbarkeit* solcher Öle geringer, eine Eigenschaft, die sich in einem günstigen, niederen Ölverbrauch äußert. Es ist deshalb nicht von ungefähr, daß gerade die pennsylvanischen Öle, welche diese Eigenschaften von Natur aus in besonders hohem Maße aufweisen, so begehrt sind.

Die außerordentlich scharfen Anforderungen, wie sie heute der Winterbetrieb des Motorfahrzeugs mit sich bringt, verlangen nach Ölen von möglichst tiefer Viskosität bei der zu erwartenden Kaltstarttemperatur, damit die durch die tiefe Temperatur ohnehin schon stark geschwächte Batterie den Motor auf die zum erfolgreichen Anlassen nötige Drehzahl zu bringen vermag. Nach kurzer Betriebszeit herrschen jedoch an den Kolben wieder ähnliche Temperaturen wie beim Sommerbetrieb, so daß eine bestimmte Mindestviskosität auch wieder nicht unterschritten werden darf, damit Abnutzung und Ölverbrauch nicht allzustark ansteigen. Ein hoher V. I. ist deshalb gerade für die Schweiz mit ihren schroffen Temperaturwechseln von größter Bedeutung; ein solcher ermöglicht auch, die zu führenden Motorenölviskositätsgrade stark einzuschränken, und die Zeit liegt sicher nicht allzufern, wo allgemein im Sommer und Winter dasselbe *Universalöl* verwendet werden kann, z. B. ein SAE-10/20-Öl von etwa 30–40 cSt/50°C und einem V. I. von mindestens 120, besser um 150 herum. Ein derartiges Öl – es beginnen bereits solche im Handel zu erscheinen – weist z. B. bei –30°C erst eine Viskosität von etwa 3500–4000 cSt auf, so daß, zum mindesten aus Viskositätsgründen, einem erfolgreichen Kaltstart nichts im Wege steht. Andererseits ist bei 250°C die Viskosität erst auf 1,5 cSt gesunken, einen Wert, auf den bei dieser Temperatur auch die Viskosität eines SAE-30/40-Öls von 70 cSt/50°C und einem V. I. = 100 absinkt.

Leider ist es nun nicht möglich, durch Raffination mit selektiv wirkenden Lösungsmitteln in wirtschaftlicher Weise Öle von derart hohem V. I. herzustellen, nicht einmal aus den pennsylvanischen, so daß sich die Frage stellte, wie hier, abgesehen von der eigentlichen Synthese chemisch definierter Verbindungen mit Schmierölcharakter, weitere Verbesserungen erzielt werden könnten.

Ein beinahe schon als klassisch anzusprechendes Verfahren zur Herstellung von Motorenölen hohen Viskositätsindexes ist das belgische *Elektronverfahren*. Es ergibt gleichzeitig Schmieröle mit vorzüglichen schlamm-dispergierenden Eigenschaften. Die in Wasserstoffatmosphäre vorgenommene Behandlung des compoundingierten Öls mit stillen elektrischen Entladungen, unter Mitwirkung von Protonen und Elektronen, führt hier zum Aufbau hochmolekularer, im Öl kolloidal gelöster Verbindungen, welche die Viskositätsstufe erhöhen, gleichzeitig aber die gewünschte Verflachung der Viskositätskurve herbeiführen.

Mit der Entwicklung der Polymerisationstechnik auf dem Gebiete der organischen Kunststoffe und der Herstellung von Polymeren hoher thermischer und chemischer Beständigkeit, von bestimmten, durch das mittlere Molekulargewicht und die Verteilungsfunktion gegebenen Löslichkeits-eigenschaften, lag es nahe, dem Mineralölraffinat zur künstlichen Erhöhung des V. I. Polymere geeigneter Konstitution zuzusetzen. Die besondere Kunst ist dabei, solche Polymere ausfindig zu machen, die auch bei tiefer Temperatur mit dem Öl stabile Mischungen ergeben, es nicht allzu stark verdicken, jedoch seine Viskositätstemperaturkurve möglichst stark verflachen. Zudem müssen solche Zusätze chemisch und thermisch sehr beständig und vor allem mechanisch, gegen Scherwirkungen, widerstandsfähig sein. Andernfalls wäre mit einem starken Rückgang des V. I. während des Betriebes des Motors zu rechnen.

Mit dem Einverleiben solcher meist auf Basis von Polyisobutylen und Polyacrylsäureester aufgebauten Polymeren geeigneten mittleren Molekulargewichts, die zu einer Erhöhung des V. I. um 20 bis 50 und mehr führen, haben sich verschiedene Fragen ergeben, die auch heute noch der Abklärung harren, dies, obschon solche Zusätze bereits jahrelang praktisch angewandt werden. Es erhebt sich z. B. die Frage, ob der höhere V. I. solcher mit Polymeren versetzten Ölen auch zu einem niedrigeren Ölverbrauch führt, wie dies bei Mineralölen mit zunehmendem natürlichem V. I. (bei gleicher Viskositätsstufe bei z. B. 50°C) beobachtet wird. Die Beantwortung dieser Frage bereitet insofern Schwierigkeiten, als die durch den Zusatz bewirkte Verdickung des Öls, die sich auch in einer höheren Viskosität des Öls an den oberen Kolbenpartien äußert, nicht zugleich auch einer verringerten Verdampfbarkeit entspricht, welche einen wichtigen verbrauchsbeeinflussenden Faktor darstellt. Öle mit künstlich erhöhtem V. I. lassen demzufolge etwa einen Verbrauch erwarten, welcher nur wenig geringer ist, als ihn das zusatzfreie Basisöl aufweisen würde.

Im weitem verhält sich ein mit Polymeren aufgedicktes Öl nun nicht mehr wie das Basisöl als NEWTONsche Flüssigkeit, sondern es zeigt, je nach der Menge des Zusatzes, eine mehr oder weniger ausgesprochene *Strukturviskosität*. Bei sehr hohem Schergefälle – bei hoher Drehzahl und kleinem Spiel der Gleitflächen kann es gegen 10^6 sec^{-1} betragen – fällt demzufolge die «schein-

bare» Viskosität des verdickten Öls temporär fast auf die Viskosität des zusatzfreien Basisöls bei der betreffenden Temperatur zurück. Die auftretenden Reibungsverluste entsprechen somit annähernd der Viskosität des Basisöls bei der betreffenden Temperatur und nicht der in den üblichen Viskosimetern bei niedrigerem Schergefälle bestimmten und auf hohe Temperatur extrapolierten. Dieses Verhalten ist insofern als Vorteil zu werten, als infolge geringerer Reibungsverluste bei gleicher Motorleistung ein etwas geringerer spezifischer Treibstoffverbrauch erwartet werden kann. Nach UMSÄTZER gestatten überdies strukturviskose Öle eine etwas höhere Belastbarkeit, bzw. ergeben bei gleicher Belastbarkeit eine längere Lebensdauer der Lager.

Ein weiterer Vorteil sowohl der elektrionisierten als auch der mit genau bekannten Polymeren versetzten Öle liegt, wie neuere amerikanische Versuche ergeben haben, darin, daß zufolge der relativ starken Verdickung des Basisöls schon durch geringe Zusätze solcher Mittel eine entsprechende Menge an Bright-Stock eingespart werden kann. Da Bright-Stock die Rückstandsbildung und insbesondere auch den Oktanbedarf in einem Ottomotor mehr erhöht als die geringe Menge der dem Öl zugesetzten Polymeren, wirkt sich eine Verringerung oder gar eine Eliminierung desselben nur vorteilhaft aus. Bei sehr dünnflüssigen Ölen (SAE-5- und SAE-10W) kann einer durch den Mangel an Bright-Stock sich eventuell ergebenden höheren Motorabnutzung durch Zusatz besonderer schmierfähigkeits erhöhender Additives begegnet werden.

Trotzdem wurde bei Fahrzeugmotorenölen schon die Frage aufgeworfen, ob sich ein durch Zusatz von Polymeren auf 120 und darüber erhöhter V. I. in der Praxis überhaupt derart günstig auswirke, wie auf Grund der im Laboratorium mit den üblichen Viskosimetern durchgeführten Viskositätsbestimmungen zu erwarten wäre. Dabei wurde darauf hingewiesen, daß einerseits gewisse Polymere das Öl bei tiefer Temperatur stärker verdicken, als auf Grund einer Extrapolation der Viskositätswerte auf z. B. -30°C zu erwarten wäre, andererseits, wie erwähnt, bei den hohen Schergefällen bei einem mit hoher Drehzahl laufenden Motor die scheinbare Viskosität des aufgedickten Öls fast wieder auf diejenige des dünnflüssigeren Basisöls zurückfällt. Es ist deshalb möglich, daß die tatsächlich im Motor zur Auswirkung gelangende Viskositätskurve wesentlich steiler verläuft als erwartet, d. h. der effektive V. I. wesentlich unter dem im Laboratorium bestimmten liegt und fast wieder denjenigen des zusatzfreien Basisöls erreicht. Interessant ist immerhin, daß bei Flugmotorenölen ein Zusatz von Polymeren zur V. I.-Erhöhung noch nicht als zweckmäßig erachtet, sondern ein natürlicher V. I. von 90 bis 95 gefordert wird.

Schmierfähigkeit. Die scharfe Raffination der Schmierölfraction des Erdöls mit Lösungsmitteln zur Erzielung von Motorenölen, die einerseits einen möglichst hohen V. I., andererseits eine geringere Neigung zur Rückstands-

bildung im Motorinnern ergeben, hatte, wie es sich in der Folge zeigte, den Nachteil, daß dem Öl auch aktive Stoffe entzogen wurden, die teils als natürliche Schmierfähigkeitsverbesserer, teils auch als Oxydationsinhibitoren wirkten. Die Folge davon war, daß bei gleicher Viskosität die Tragfähigkeit eines Schmierfilms bis zum Anfressen der Gleitflächen wie auch die Oxydationsstabilität des Raffinats geringer wurden. Die Fortschritte, die aber inzwischen auf dem Gebiete der Schmierfähigkeitsverbesserer und Oxydationsinhibitoren gemacht wurden, ließen es als aussichtsreich erscheinen, dem Raffinat Wirkstoffe solcher Art nachträglich zuzusetzen, und zwar noch erheblich wirksamere und stabilere, als sie im rohen Schmieröldestillat selbst vorhanden sind.

Im allgemeinen ist bei der Schmierung eines gut eingelaufenen, mechanisch in Ordnung befindlichen und betriebswarmen Ottomotors eine besonders stark erhöhte Schmierfähigkeit des Motorenöls zwar erwünscht, aber nicht unbedingt erforderlich. Unsere Versuche haben z. B. gezeigt, daß bei mit Bleibenzin betriebenen Motoren im Schmieröl schon nach kurzer Betriebszeit ein grauer Schlamm anfällt, vorwiegend aus festen Bleiverbindungen bestehend, die, so unerwünscht sie sonst sind, wenigstens den Vorteil zeigen, die Tragfähigkeit des Schmierfilms ganz beträchtlich zu erhöhen und damit die Anfreßgefahr stark beanspruchter Motorteile erheblich herabzusetzen. Indessen zeigen auch verschiedene heute dem Motorenöl beigemischte Inhibitoren und «Detergents» die unbeabsichtigte, aber natürlich gerne in Kauf genommene Begleiterscheinung, daß sie seine Schmierfähigkeit erheblich verbessern, so daß schon das Frischöl eine gegenüber gewöhnlichem Regular-Mineralöl erhöhte Schmierfähigkeit aufweist. Öle mit solchen Zusätzen eignen sich demzufolge besonders für Rennmotoren und abnorm hoch beanspruchte Motoren im allgemeinen, dann auch in den Fällen, wo ein schonendes Einfahren eines fabrikneuen Motors nicht möglich oder nicht erwünscht ist. In allerneuester Zeit werden Schmieröle mit erhöhter Schmierfähigkeit für zahlreiche amerikanische Automotoren, die mit hydraulischen Ventilstößeln ausgerüstet sind, zur Verringerung der Abnutzung von den Motorenfabriken besonders empfohlen.

Kürzlich hat das in seiner Wirkung den kolloidalen Graphit erheblich übertreffende kolloidale *Molybdändisulfid* als Motorenölsatz viel von sich reden gemacht. Während seine schmierfähigkeits erhöhende und die Abnutzung vermindernde Wirkung unbestritten ist, erheben sich jedoch auch hier die schon beim Graphit aktuell gewesenen Fragen aufs neue, nämlich die Frage der Neigung zur Sedimentierung in den verschiedenen modernen Motorenölen mit den chemisch oft recht verschiedenen Additiven sowie den Altölen verschiedenen Alterungs- und Verschmutzungsgrades. Ferner stellt sich die Frage, ob nicht der größte Teil dieses dispergierten Zusatzes mit der Zeit durch die heute vielfach

angewandten wirksamen Ölfilter dem Ölkreislauf bald entzogen wird, alles Fragen, die noch der experimentellen Abklärung bedürfen.

Dispergier- und Neutralisationszusätze. Trotz der erhöhten Oxydationsfestigkeit, der geringeren Neigung zur Verschlammung und der erhöhten Schmierfähigkeit befriedigen diese als Premium-Öle bezeichneten Motorenöle bei sehr starker Beanspruchung des Motors nicht ganz, vor allem nicht bei schnellaufenden Dieselmotoren. Bei letzteren ist die Verschmutzung des Öls durch ölfremde Bestandteile, z. B. Ruß, von nicht vollständig verbranntem Kraftstoff herrührend, stärker als beim Benzinmotor; dazu kommt hier noch die größere Neigung zur Bildung mehr oder weniger harter Beläge und zum Kolbenringverkleben. Dieses Verhalten wird, wie auch die stärkere Abnutzung von Zylindern und Kolben, wieder begünstigt durch die Schwefelsäure, die sich bei der Verbrennung schwefelhaltiger Dieseltreibstoffe bei Luftüberschuß bildet. Alle diese Faktoren führen zu einer erheblichen Verschlammung des Öls und Verschmutzung des Motorinnern, damit aber auch zu erhöhter Gefahr von Motorstörungen.

Glücklicherweise ist es auch hier gelungen, durch schlamm dispergierende und schwefelsäurebindende Motorenölzusätze wirksame Abhilfe zu schaffen. Diese meist auf Basis öllöslicher metallorganischer Barium- oder Calciumverbindungen, oft noch gemischt mit Zink-dithiophosphat als Inhibitor aufgebauten Additives, die sogenannten *Detergents* oder *Inhibitor-Detergent-Kombinationen*, werden dem Basisöl in Mengen von 2–20% zugesetzt und bilden ohne Zweifel einen wichtigen Markstein in der Entwicklung der Motorenöle. Wer je einmal Gelegenheit hatte, demontierte Fahrzeugdieselmotoren zu inspizieren, welche das eine Mal mit einem vorzüglichen Premium-Öl, das andere Mal mit einem eigentlichen «Heavy-Duty»-Öl mit aktiven Detergents geschmiert worden waren, wird ohne Zweifel von dem gewaltigen Unterschied in der Sauberkeit des Motors stark beeindruckt werden.

Immerhin soll nicht verschwiegen werden, daß diese eigentlich recht ölfremden metallorganischen Additives auch nicht eitel Freude brachten. Öle mit Zusätzen dieser Art erfordern eine besondere Pflege und überlegte Anwendung. Einmal sind diese Zusätze meist wasserempfindlich, verlangen deshalb trockene Lagerung, fallen bei intermittierendem Fahrbetrieb oft frühzeitig aus und werden wirkungslos, bilden mit Spuren von Wasser (z. B. ins Schmieröl gelangendes Auspuffgaskondensat) Schlamm, geben unter Umständen zu erhöhter Verschmutzung im Verbrennungsraum, eventuell auch zu Glühzündungen und damit zur Erhöhung des Oktanbedarfs der Ottomotoren Anlaß. Aus diesem Grunde haben sich für die Schmierung von Flugmotoren eigentlich HD-Öle noch nicht allgemein einführen können. Endlich können sich Schwierigkeiten ergeben wegen mangelnder Verträglichkeit der verschiedenen im Handel befindlichen Additives.

Immerhin ist es bereits gelungen, in unablässiger Weiterentwicklung verschiedene der genannten Nachteile der HD-Öle auszumerzen, so daß heute einer allgemeineren Anwendung derselben für Viertakt-Otto- und besonders für schnellaufende Dieselmotoren nichts mehr im Wege steht.

Dem Materialprüfer allerdings bereiten die verschiedenen Motorenöl-Additives schon beim Frischöl, weit mehr noch beim gebrauchten Öl nicht geringe zusätzliche Schwierigkeiten, sowohl bei der Analyse selbst als auch bei der Beurteilung der Analysenergebnisse. Mehr und mehr ergibt sich deshalb die Notwendigkeit, die übliche laboratoriumsmäßige, chemisch-technische Schmierölprüfung durch kostspielige und zeitraubende Prüfstandsversuche sowie praktische Versuchsfahrten zu ergänzen, soll die *Wirkung* dieser verschiedenen Additives und nicht nur ihre *Anwesenheit* auch nur einigermaßen zuverlässig erfaßt werden.

4. Synthetische Motorenöle

Mit der weiteren Verschärfung der Betriebsbedingungen, mit welcher bei der zukünftigen Entwicklung der Motoren zu rechnen ist, werden die Chancen für eine weitgehende Anwendung vollsynthetischer Öle ständig größer. Bereits schon vor einigen Jahren sind in Deutschland mit Erfolg vollsynthetische Motorenöle auf Basis verzweigten Polyäthylens, in den USA solche auf Polyalkylenglykolbasis praktisch ausprobiert worden. Eine allgemeinere Anwendung derselben scheiterte jedoch zufolge des Zweiten Weltkrieges, zum Teil aber auch am hohen Gestehungspreis und nicht zuletzt an der Tatsache, daß mittlerweile die Öle auf Mineralölbasis durch die erwähnten Zusätze derart verbessert wurden, daß sie vorläufig den gestellten Anforderungen recht gut zu genügen vermochten.

Indessen hat sich bei stark beanspruchten Flugzeugdüsentriebwerken, z. B. beim «Comet» (de Havilland) u. a., bereits die Notwendigkeit ergeben, vollsynthetische Schmieröle, wie anzunehmen ist, auf Basis inhibierter Sebacinsäureester, anzuwenden. Dieselben sind dank ihrer außerordentlich flachen Viskositätskurve ($V.I. = 150$ bis 160) und hohen Kältebeständigkeit bei -50°C noch flüssig, andererseits verdampfen sie zufolge ihres im Verhältnis zur Viskosität außerordentlich niedrigen Dampfdruckes in den nach dem Abstellen der Turbine gegen 230 – 250°C heiß werdenden Lagern praktisch nicht, ergeben dabei auch keine schädlichen Rückstände und übertreffen die Schmierfähigkeit selbst der besten Mineralraffinate um ein beträchtliches. Zur Anwendung in Kolbenmotoren sind sie noch zu kostspielig, es sei denn, daß ihrer Regenerierung besondere Aufmerksamkeit geschenkt werde.

Wie auf vielen anderen Gebieten, z. B. auch den Kunststoffen, können wir bezüglich der Motorenöle feststellen, daß zufolge der immer größer werdenden Anforderungen, die an Motor und Betriebsstoff gestellt werden, dem Techniker die von der Natur zur Verfügung

gestellten Produkte selbst nach tiefgreifenden Veredlungsverfahren und Einverleibung besonderer Wirkstoffe nicht mehr genügen, so daß er nach eigentlichen *vollsynthetischen Produkten* Ausschau halten muß, die mit den Mineralöl-Kohlenwasserstoffen chemisch nichts mehr gemein haben. Als gutes Vorzeichen bei dieser Entwicklung kann aber der Umstand betrachtet werden, daß es dank der neueren Entwicklung der Erdöl-

chemie möglich sein wird, diese rein synthetischen Öle trotz ihrer von den Erdöl-Kohlenwasserstoffen zum Teil beträchtlich abweichenden Konstitution, ebenfalls auf Erdöl als primärem Ausgangsmaterial aufzubauen; ein Umstand, der sich auf die Herstellungskosten solcher Produkte nur günstig auswirken und ihnen in nicht allzu ferner Zeit eine allgemeinere Anwendung sichern dürfte.