

wissenschaftlichen Erkenntnisse kritisch und schöpferisch verarbeitet sind.

BEKKER [8] faßt einige bis heute theoretisch und praktisch quantitativ nachgewiesene Erkenntnisse der Terra-Mechanik für Radtraktoren folgendermaßen zusammen:

- a) Traktorentriebskräfte steigen mit der Masse nur in Reibungsböden (sandigen Böden) an.  
In reibungslosen Böden, wie feuchtigkeitsgesättigte Lehme (Tone) können Triebkräfte nur durch Erhöhung der Bodenaufstandsfläche vergrößert werden.
- b) Die Form der Aufstandsfläche sowie ihre Richtung in bezug auf die Bewegungsrichtung sind genau so wichtig wie die Größe der Fläche und ihre Last.
- c) Lange, schmale Aufstandsflächen sind meist wirksamer als kurze breite. Dies führt zu neuen Reifenkonstruktionen und Reifenkombinationen.
- d) Ein hoher Grad der Elastizität der Reifenkarkasse ist notwendig vom Standpunkt des Leistungsvermögens.
- e) Luftdruckabsenkung hilft nur insoweit, als die Aufstandsfläche vergrößert wird. Dies hängt aber außer von der Last und den Radabmessungen auch vom Boden ab.
- f) Ein Niederdruck- und hochelastischer Reifen wird wie ein starres Rad wirken, wenn der Boden die kritische Festigkeit erreicht hat.
- g) Greifer und Spaten an Rädern sind in homogenen Sandböden praktisch unwirksam.
- h) Die Rodeinsinktiefe hängt von der Form der Aufstandsfläche und auch vom Bodendruck ab.
- i) Räder können in plastischen und fast reibungslosen Böden Gleisbänder nicht oder nur dann ersetzen, wenn ihre Aufstandsflächen oder deren Kombinationen einem übermäßig großen Rad entsprechen.
- j) Für jedes Gelände oder jeden Boden(zustand) gibt es optimale Radabmessungen und Räderanzahl, die die beste Leistung vollenbringen.
- k) Es bestehen quantitative Beziehungen zwischen Konstruktionsparameter und Fahrzeugform einerseits und Bodeneigenschaften andererseits. Das widerlegt den Mythos des alleinseligmachenden Universaltraktors. Jeder Traktor ist nur so gut als seine statistische

Anpassung an das Gelände und an den Boden, in dem er arbeiten soll.

- 1) Der Trend in der Morphologie des Traktors auf der Basis der nachgewiesenen Boden - Fahrzeugbeziehungen verlangt in Zukunft nach einer qualitativen Veränderung der Traktorenkonzeptionen.

#### 4. Vorläufige Aufgaben für Forschung und Lehre

- a) Kritisches Studium des Standes des Wissens und Schaffung eigener Erkenntnisse
- b) Kartographisch-statistische Bodenwertermittlung und deren sinngemäße Datenverarbeitung
- c) Erarbeitung von prognostischen Fahrwerkseinsatz-Leistungen und Möglichkeiten
- d) Ausbildung von Studenten in den Grundprinzipien der Terra-Mechanik

#### 5. Zusammenfassung

Es wurde versucht, einen informatorischen Überblick über die neue Disziplin „Terra-Mechanik“ zu geben und ihre Bedeutung für den Traktorenbau und -einsatz sowie verwandter Fahrzeuge zu skizzieren.

#### Literatur

- [1] BERNSTEIN, R.: Probleme zur experimentellen Motorflugmechanik. Der Motorwagen 1913, 16
- [2] GORJATSCHIKIN, B. P.: Theorie und Praxis der Landmaschine. Moskau 1936
- [3] BEKKER, M. G.: Theory of landlocomotion. Michigan 1956
- [4] REECE, E.: Theorie and Practice of Off-The-Road Locomotion. Proc. Annual Conference of the Institution of Agricultural Engineers 1964 London
- [5] JANOSI, A.: The analytical determination of drawbar pull as a function of slip for tracked vehicles in deformable soils. Landlocomotion Laboratory U. S. Army Ordnance Tank Automotive Command. Detroit, Michigan 1961
- [6] TESSMANN, R.: Zu einigen Gesetzmäßigkeiten der technischen Revolution. Deutsche Zeitschrift für Philosophie, Sonderheft 1965
- [7] HEYDE, H.: Mechanik des Schleppers. Deutsche Agrartechnik (1957) H. 1 bis 4; Landtechnische Forschung, H. 2/1953
- [8] BEKKER, M. G.: Mechanics of Off-the-Road locomotion. London 1962 A 6331

## Abgastrübung (Qualmen) des Dieselmotors

Ing. K. H. JENISCH, KDT

Laudwirtschaftliche Traktoren verkehren zwar weniger auf öffentlichen Straßen, das Abgasrauchen ihres Dieselmotors führt daher seltener zu dem nach der StVZO nicht statthaften Belästigen oder Gefährden von Straßenverkehrsteilnehmern, doch ist auch auf dem Acker ein schwarzes Auspuffqualmen nicht nur für Traktorist und Maschinensatzung lästig, sondern auch ein deutlich sichtbarer Beweis für Mängel am Motor und für unwirtschaftlichen Kraftstoffverbrauch. Diese weithin erkennbare Auswirkung eines nicht einwandfreien Motorenzustandes ist kostspielig und keine Empfehlung für die technische Leitung des betreffenden Maschinenparks. Sie darf daher nicht, wie leider so häufig, hingenommen, sondern muß schleunigst ergründet, beseitigt und in Zukunft vorbeugend vermieden werden.

Leider enthalten die z. Z. in der DDR verfügbaren Bücher über Traktoren kaum Hinweise auf die Probleme der Abgastrübung. Lediglich in dem Taschenbuch „Kleines traktor-technisches ABC“ [1] werden unter dem Begriff „Qualmen“ für den Traktoristen in elementarer Weise die verschiedenen Ursachen für das in unterschiedlichen Farbtönen (schwarz, blau, grau, weiß) auftretende Rauchen der Dieselmotoren durch 10 Gründe kurz erklärt. Dem Ingenieur und Technischem Leiter aber obliegt es, sich genauer über die Zusammenhänge und Ursachen klar zu werden, die zu einem offensichtlich fehlerhaften Ablauf des Verbrennungsvorgangs im Dieselmotor führen können. Erst durch diese Kenntnisse kann er wirksame Abhilfemaßnahmen veranlassen, um diesem lästigen und unwirtschaftlichen Zustand der zu seinem Verantwortungsbereich gehörenden Traktoren ein Ende zu bereiten.

Der von der Fabrik oder Werkstatt richtig eingestellte und in ordnungsgemäßem Zustand gehaltene Dieselmotor des Traktors arbeitet normalerweise als Zeichen einer sauberen Verbrennung des eingespritzten Kraftstoffs im ganzen Lastbereich ohne nennenswerte Abgastrübung. Tritt eine solche in Form von Ruß im Auspuff (schwarzes Qualmen) oder von unverbrannten Kraftstoffanteilen im Abgas (bläuliches Qualmen) auf, dann ist das ein deutliches Zeichen für einen gestörten Verbrennungsablauf im Zylinderbrennraum. Seine Ursachen sollten durch intensive Fehlersuche festgestellt und unverzüglich beseitigt werden, denn die dabei auftretenden Ablagerungen im Motor gefährden die Betriebssicherheit, beschleunigen den Verschleiß, und der nicht voll ausgenutzte Kraftstoffverbrauch beeinträchtigt die Wirtschaftlichkeit des Traktorbetriebes. In der Hauptsache sind es zwei Ursachen, die zu einer übergroßen Abgastrübung führen: indirekter oder direkter Luftmangel des Motors und fehlerhafte Einspritzverhältnisse.

### 1. Indirekter Luftmangel

Der Dieselmotor arbeitet bekanntlich im gesamten Belastungsbereich infolge seines (im Gegensatz zum Ottomotor) ungedrosselten Ansaugens stets mit Luftüberschuß ( $\lambda = 1,3 \dots 1,4$ ), wird also bei gutem mechanischen Zustand und richtiger Einstellung der Einspritzanlage normale Verbrennung und daher kaum eine Abgastrübung aufweisen. Die durch den Saughub im Zylinder zur Verfügung gestellte Luftmenge bleibt — und damit auch der Verdichtungsdruck — praktisch jedesmal konstant, da sie lediglich durch die Abmessungen des Ansaugkanals und -ventils begrenzt wird [2]. Beim „Gasgeben“ ver-

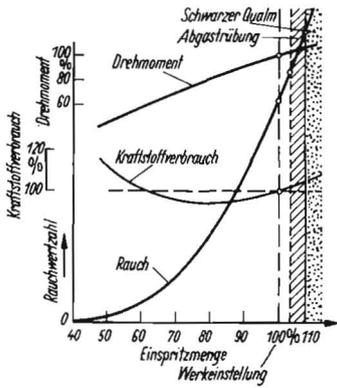


Bild 1  
Drehmoment, spezifischer Kraftstoffverbrauch und Rauchentwicklung in Abhängigkeit von der eingespritzten Kraftstoffmenge  
(nach BAILY und BATES)

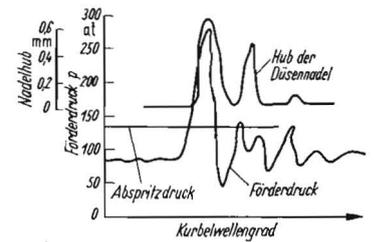
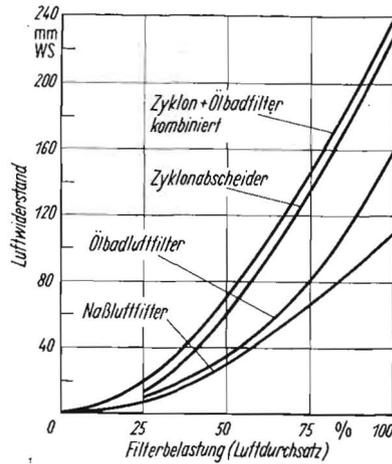


Bild 3  
Druck- und Hubverlauf über dem Kurbelwellenfortschritt beim „Nachspritzen“

Bild 2  
Mittlere Luftwiderstände [mm WS] verschiedener Luftfilterbauarten in Abhängigkeit vom Luftdurchsatz

größert sich nur die eingespritzte Kraftstoffmenge, so daß sich der Luftüberschuß bis zur Höchstleistung des Motors immer mehr verringert. Er darf aber beim Dieselmotor nicht unter  $\lambda = 1,25$  absinken, weil sich dann durch örtliche Luftmangelzonen im Brennraum ein verschlechtertes Ausbrennen des Kraftstoffs mit entsprechender Rußbildung ergibt. Aus diesem Grund wird die Vollasteinspritzmenge durch einen Regelstangenanschlag an jeder Einspritzpumpe werkseitig so begrenzt, daß ausreichend hohe Luftüberschußzahlen gesichert bleiben und die „Rauchgrenze“ nicht überschritten wird.

Sobald diese Einstellung durch Abnutzung der Regelorgane, oder Lockerung des Regelklemmstücks, oder etwa willkürlich verändert und versucht wird, aus dem Motor durch überdosierte Einspritzmengen eine möglichst hohe Leistung herauszuholen, steigt nicht nur der spezifische Kraftstoffverbrauch, sondern auch die Rauchkurve steil an (Bild 1). Bei dieser Überlastung des Motors wachsen ebenfalls die Werte des Mitteldrucks  $p_c$  und verursachen zugleich höhere Vollasttemperaturen und dadurch einen stärkeren Kraftstoffverfall, der zusätzlich die Verbrennung stört und die Rußbildung fördert. Der Traktorist muß also angehalten werden, diese hohen Mitteldruckwerte und damit zugleich Rauchwerte zu vermeiden, indem er Steigungen und wachsende Fahrwiderstände nicht durch „Gasgeben“ bei sinkender Drehzahl zu überwinden trachtet, sondern rechtzeitig auf einen niedrigeren Gang herunterschaltet.

## 2. Direkter Luftmangel des Motors

Der für den Dieselmotor erforderliche Luftüberschuß kann aber nicht nur indirekt, sondern auch schon durch ungereinigte Luftfilter direkt beeinträchtigt sein. Diese erzeugen bereits in ordnungsgemäßen Zustand einen nach Bauart verschiedenen mittleren Luftwiderstand, der mit vermehrtem Luftdurchsatz, also mit zunehmender Motorleistung und damit Filterbelastung ansteigt (Bild 2). Mit wachsender Verschmutzung des Luftfilters wird aber dessen Widerstand noch bedeutend größer, wodurch der Liefergrad der Luftansaugung wesentlich herabgesetzt wird. Der Luftüberschuß wird schon bei Teillast immer geringer ( $\lambda < 1,2$ ), und der Motor beginnt schwarz zu qualmen, ganz abgesehen von dem gleichzeitig einsetzenden Leistungsabfall. Das unterstreicht also die unbedingte Notwendigkeit, regelmäßig die vorgeschriebene Pflege des Luftfilters durchführen zu lassen, nach dessen Reinigung ein vorheriges Qualmen des Motors meist schon verschwindet.

## 3. Fehlerhafte Einspritzverhältnisse

Während die beiden geschilderten Ursachen für eine Abgastrübung infolge Luftmangels noch durch den Traktoristen und

die Pflegestation zu vermeiden oder auch zu beseitigen sind, sollten Qualmerscheinungen — aus Veränderungen im Einspritzsystem entstanden — nur durch die Werkstatt oder Prüfdienstgruppe untersucht und beseitigt werden. In den meisten Fällen ist diese Fehlersuche mit einer Demontage der Düsenhalter, des Zylinderkopfs oder am Einspritzsystem verbunden.

### 3.1. Nachspritzen

Das konstruktiv durch den Pumpenocken festgelegte Ende des Einspritzvorgangs muß sehr exakt eingehalten werden. Wird nämlich Kraftstoff noch später während des beginnenden Expansionshubes in die dann schon sehr heißen Verbrennungsgase eingespritzt („Nachspritzen“), dann tritt ein Crackvorgang ein. Dabei zerfallen, wie wir aus der organischen Chemie wissen, die langkettigen Kohlenwasserstoffmoleküle in den hohen Temperaturen, und es bildet sich nebenbei unerwünschter Kohlenstoff (Petrolkoks), der nur langsam abbrennt und daher größtenteils als feste schwarze Rußpartikel in den Auspuff gelangt.

Vor allem bei höheren Drehzahlen verursacht dieses Nachspritzen eine Abgastrübung, wenn die Einspritzmenge am größten, aber die Zeit zum vollständigen Verbrennen am kürzesten ist. Das erklärt auch einen der Gründe, warum die heutigen Dieselmotoren mit höherer Betriebsdrehzahl mehr zum Qualmen neigen als ältere langsam drehende Motoren.

Anlaß zum Nachspritzen ist, richtige Einstellung der Pumpenocke vorausgesetzt, die Elastizität und Druckschwungung der Kraftstoffsäule in der Druckleitung zwischen Druckventil der Pumpe und Düsenadelkegel. Erreicht der zweite oder sogar der dritte Schwingungsstoßdruck noch einmal die Höhe des an der Düse eingestellten Abspritzdrucks, dann wird die Düsennadel nochmals angehoben und weiterer Kraftstoff in den bereits in Gang befindlichen Verbrennungsvorgang hineingespritzt (Bild 3). Eine zu weiche, zu lange oder nicht starr genug befestigte Druckleitung kann diese Erscheinung noch unterstützen.

Abhilfe verschafft einmal das Heraufsetzen des Abspritzdrucks durch stärkeres Anspannen der Düsen-Druckfeder, je nach Düsentyp durch Anziehen der Einstellschraube oder durch Unterlegen weiterer Distanzringe. Damit wird bezweckt, daß die Druckspitzen der nachfolgenden Schwingungsstöße in der Druckleitung den Federdruck nicht mehr erreichen und überwinden können. Die Düsennadel öffnet sich nicht ein zweites Mal. Zum gleichen Resultat führt das Herabsetzen der Druckspitzen der Schwingungsstöße, indem der Drosselwiderstand der Düse beim eigentlichen Ausspritzen etwas verringert wird. Das erzielt man bei der Mehrlochdüse durch vorsichtiges Aufweiten der engen Düsenbohrungen. Oft ist

aber deren Widerstand nur darauf zurückzuführen, daß sich an ihnen trompetenartige Koksablagerungen gebildet haben, die das Austreten des Kraftstoffstrahls behindern und die es zu entfernen gilt.

Diese schädlichen Koksbildungen an den Düsen entstehen entweder durch „Nachbrennen“ und dadurch eintretende Überhitzung der Düsenkörper oder bei normalen Düsens Temperaturen dann, wenn der Kraftstoffstrahl am Ende des Einspritzens nicht schlagartig abgeschnitten wird und die Düse daher nachtropft. Dieser Mangel kann auf eine gebrochene Düsendruckfeder oder auf eine undichte oder übermäßig eingeschlossene Düsennadel zurückzuführen sein. Durch das Nachtropfen überzieht sich der Düsenkörper mit Kraftstoff, der dann durch die Explosionsflamme verkocht, so daß sich nach und nach eine Ablagerung aufbaut, die also mittelbar ebenfalls Anlaß zum Qualmen des Motors sein kann.

### 3.2. Verschlepptes Einspritzende

Ebenso rauchfördernd wie das Nachspritzen wirkt ein zu spätes Einspritzende, durch das ebenfalls Kraftstoffteile in den bereits aufgeheizten Brennraum gelangen und daher dort cracken. Der dabei entstehende Kohlenstoff kann in der kurzen Zeit zwischen spätem Einspritzende und Öffnungsbeginn des Auslaßventils nicht mehr vollständig verbrennen.

Scheidet als Ursache des zu späten Einspritzendes eine veränderte (falsche) Pumpenockenstellung aus, die sich ja bei der im TPD vorgesehene Kontrolle des Kraftstoffförderbeginns herausstellen würde, dann kann die Ursache auf ein Versagen des automatischen Spritzzeitverstellers zurückzuführen sein. Gerade bei Motordrehzahlen über  $1600 \text{ min}^{-1}$  hinaus, bei denen dann auch die Einspritzmengen größer werden, ergibt sich ein wachsender Spritzverzug, d. h. die in Grad Kurbelwelle gemessene Zeitspanne zwischen Förderbeginn der Pumpe und tatsächlichem Öffnen der Düsennadel wird immer größer, weil die Laufzeit der Druckwelle von der Pumpe zur Düse in Sekundenteilen konstant bleibt. Auf die Wirkung eines Spritzverstellers, der den ganzen Fördervorgang vorverlegt und dadurch den Spritzverzug wieder ausgleicht, kann daher bei höheren Drehzahlen nicht verzichtet werden.

Das Einspritzende wird noch dadurch hinausgezögert, daß im schneller drehenden Dieselmotor auch die Dauer des eigentlichen Abspritzvorgangs im Verhältnis zum Kurbelwellenfortschritt zunimmt. Das ist auf den Fließwiderstand in Kanälen und Düse zurückzuführen. Mehrlochdüsen mit ihren engen Bohrungen sind in dieser Hinsicht für Motoren mit höheren Drehzahlen wenig geeignet.

### 3.3. Schwacher Kraftstoffstrahl

Dieselmotoren mit Vorkammer benötigen einen sehr schlanken, zusammengefaßten Kraftstoffstrahl, der von der Zapfendüse aus den Nebenraum gezielt und sehr rasch durchschlagen muß. Der größere Teil der Kraftstoffmenge soll nämlich in den Überströmkanal und anschließenden Hauptraum befördert werden, wo er ausreichend Luft zur raschen Verbrennung vorfindet. Fehlt diese Durchschlagkraft des Strahls, weil die Düse nachleckt oder verkocht ist oder der Einspritzdruck nachgelassen hat, oder weicht die Strahlrichtung ab, dann sind die konstruktiv vorgesehene Gemischbildung und der Verbrennungsablauf gestört und verzögert, woraus sich die entstehende Abgastrübung erklärt. Das zeigt die Wichtigkeit der im Traktorenprüfdienst (TPD) vorgesehene Kontrolle des Förderdrucks der Einspritzpumpe und des Abspritzdrucks.

Es muß auch beachtet werden, daß Dieselmotoren mit höherer Verdichtung ( $\epsilon > 20$ ) leichter zum Rauchen neigen, wenn nicht dafür gesorgt wurde, daß durch höheren Einspritzdruck der vermehrte Widerstand überwunden wird, den die größere Dichte der Luft dem Kraftstoffstrahl entgegensetzt. Um so mehr muß gerade bei hochverdichtenden Motoren der allge-

mein gültige Grundsatz bewahrt werden, durch rechtzeitiges Herunterschalten einen Drehzahlabfall zu vermeiden, weil der Einspritzüberdruck dem Quadrat der Pumpendrehzahl fast proportional ist [3, S. 314 bis 319]. Demnach geht dieser stark zurück, wenn die Motordrehzahl z. B. um die Hälfte sinkt. Es ist offensichtlich, daß dann der Einspritzüberdruck zu niedrig wird (u. U. den an der Düse eingestellten Abspritzdruck gar nicht mehr erreicht), um noch eine ausreichende Ausflußgeschwindigkeit für einen genügend durchschlagkräftigen Strahl erzielen zu können. Es entsteht also bei zu niedrigen Motordrehzahlen eine völlig unzureichende Gemischbildung und Verbrennung im Vorkammermotor, die natürlich nicht mehr rauchlos sein kann.

## 4. Ungenügende Verdichtung

Rasches und vollkommenes Verbrennen des eingespritzten Kraftstoffs wird durch Einhalten des konstruktiv festgelegten Verdichtungsdrucks begünstigt, der mindestens  $35 \text{ kp/cm}^2$  erreichen sollte. Läßt er mit der Zeit nach, was sich ja mit einem sog. Kompressionsdruckprüfer feststellen läßt [4], so wird sich der offensichtlich schlechte mechanische Zustand der den Brennraum umschließenden Motorteile ebenfalls durch eine zunehmende Abgastrübung bemerkbar machen. Durch den geringeren Mitteldruck  $p_e$  bleiben die Brennraumtemperaturen niedriger, wodurch die Verbrennung langsamer abläuft und ein Teil des Kraftstoffs bis zum Öffnen des Auslaßventils nicht mehr vollständig verbrennen kann.

## 5. Maß der Abgastrübung

Der Grad des Qualmens, d. h. die Dichte des Dieselauchs, kann zwar auch mit Geräten, sog. Rauchgastestern, gemessen werden, die mit Schwärzung von Filterpapier arbeiten. Im praktischen Betrieb kann aber der „Rauchwert“ durch visuelle Beobachtung der Schwärzung festgestellt werden, wobei die Stufung 1. unsichtbar (absolut rußfreies Abgas), 2. eben noch sichtbar (schwache Auspufftrübung), 3. rauchender Auspuff (zulässiger Grenzwert ist hier überschritten), 4. störende Qualmbildung und 5. Sichtbehinderung (schwarze undurchsichtige Rußwolken) üblich ist.

## 6. Zusammenfassung

Güte und Vollständigkeit der Verbrennung im Dieselmotor und damit die restlose Ausnutzung des Kraftstoffs können an der Rauchfreiheit der Abgase beurteilt werden. Trüben sich diese mehr und mehr oder besonders beim Beschleunigen bis zur Qualmbildung, dann ist das ein Signal für abnormalen Verbrennungsablauf. Für dessen Ursachen gibt es vielfältige Möglichkeiten, die im einzelnen — geordnet nach den Hauptgründen Luftmangel und fehlerhafte Einspritzverhältnisse — erörtert wurden, um Anhaltspunkte für die zu treffenden Abhilfemaßnahmen zu geben.

## Literatur

- [1] JENISCH, K. H.: Kleines traktortechisches ABC. Deutscher Landwirtschaftsverlag Berlin 1964
- [2] BLUMENTHAL, R.: Technisches Handbuch Traktoren. 2. Auflage. VEB Verlag Technik Berlin 1961, S. 75 (3. Aufl. erscheint 1966)
- [3] INOSEMZEW, N. W.: Wärmekraftmaschinen, Bd. 1, Verbrennungsmotoren. VEB Verlag Technik Berlin 1954, S. 314 bis 319
- [4] THUM, E.: Verschleißbestimmung bei Ackertraktoren. In: EICHLER, RUDOLPH u. a.: Grundlagen der Instandhaltung von Landmaschinen und Traktoren. 2. Auflage. VEB Verlag Technik Berlin 1966, S. 127

A 6315