

arbeitet und gelöst. Hierbei handelte es sich z. B. um folgende Themen:

- Verbesserung der Energieökonomie in Stallanlagen
  - Ausnutzung der Windenergie zur Wasserversorgung von Tieren auf der Weide
  - Einsatz von Robotern im Bereich der Landtechnik einschließlich der notwendigen spezifischen Ausbildung von Studenten für die Robotertechnik
  - Erhöhung der Qualität bei der Überprüfung von Traktoren und Landmaschinen in Verbindung mit der Einführung der technischen Diagnostik in die Landwirtschaftsbetriebe
  - Nutzung der Mikroelektronik zur Lösung von Meß- und Automatisierungsaufgaben.
- Positiven Einfluß auf die Arbeit der Betriebssektion übt eine seit dem Jahr 1978 bestehende Vereinbarung mit der KDT-Betriebssektion des VEB Landtechnischer Anlagenbau (LTA) Rostock aus. Auf dieser Basis hat sich eine fruchtbare Zusammenarbeit entwickelt. Diese Vereinbarung ist die Grundlage für die Unterstützung des VEB LTA Rostock durch Bereitstellung von Kapazität auf konstruktivem Gebiet und Einsatz studentischer Leistungen bei der Lösung betrieblicher Aufgaben. Sie erleichtert auch die rasche Überführung von Forschungsergebnis-

sen in die Praxis. Konkrete Beziehungen wurden auch zur KDT-Betriebssektion des VEB Landmaschinenbau Güstrow eingeleitet, in deren Ergebnis mehrere konstruktive Vorschläge zu material- und energieökonomischen Lösungen der in Güstrow produzierten Stallungstreuer ausgearbeitet wurden. Von Seiten der Betriebssektion wird seit Jahren der Weiterbildung von Mitarbeitern, Studenten und Praktikern besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Hierzu werden jährlich mehrere wissenschaftliche Kolloquien organisiert und durchgeführt, bei denen Wissenschaftler und Praktiker über ihre neuesten Arbeitsergebnisse und Erfahrungen berichten. Diese Veranstaltungen dienen gleichzeitig zur Verbesserung und Erweiterung der Kontakte zu Wissenschaftlern, wissenschaftlichen Einrichtungen, Praktikern und Praxisbetrieben und sind daneben auch zur Erhöhung der Effektivität der eigenen Arbeit von Bedeutung.

Auf dem Gebiet der Weiterbildung durch KDT-Mitglieder der Sektion Landtechnik hat der Lehrgang zur Stallklimagestaltung bereits eine gewisse Tradition erlangt. Hier werden vornehmlich Praktiker mit Methoden und technischen Lösungen zur Klimatisierung von Ställen im Zusammenhang mit den Problemen des sparsamsten Energieverbrauchs

bekannt gemacht. Große Aktivitäten erforderte die Durchführung von Lehrgängen zur Weiterbildung von leitenden Konstrukteuren aus dem Bereich des Rationalisierungsmittelbaus. Durch die große Einsatzbereitschaft der Mitglieder konnte damit ein wesentlicher Beitrag zur Durchsetzung volkswirtschaftlicher Notwendigkeiten geleistet werden. Über ihre Tätigkeit in der Betriebssektion hinaus sind einige Mitglieder auch in zentralen Gremien der KDT, so z. B. in wissenschaftlichen Sektionen, in Fachausschüssen und in der Bezirksfachsektion Land-, Forst- und Nahrungsgütertechnik, vertreten. Sie tragen damit auch über die Sektionsgrenzen hinaus zur Erfüllung zentraler volkswirtschaftlich bedeutungsvoller Aufgaben bei. Ihre Tätigkeit befruchtet gleichzeitig die Arbeit der Betriebssektion und unterstützt die Durchsetzung der Beschlüsse zentraler KDT-Organen.

An dieser Stelle soll nicht unerwähnt bleiben, daß Einzelmitglieder und auch die Betriebssektion aufgrund ihrer sehr guten Arbeit mit hohen Auszeichnungen der KDT geehrt wurden. Daraus erwächst die Verpflichtung, auch zukünftig in Gemeinsamkeit mit der Leitung der Sektion Landtechnik die von der Gesellschaft gestellten Aufgaben in Angriff zu nehmen und zu lösen. AK 4310

## Schädigende Einflüsse auf das Festigkeitsverhalten der Kolben-Zylinder-Baugruppe von Dieselmotoren

Dozent Dr.-Ing. S. Bludzuweit, KDT

### 1. Einleitung

Dieselmotoren haben sich unter den Energieumwandlungsmaschinen durch ihren hohen Wirkungsgrad hervorgehoben und eine breite Anwendung in mobilen Maschinen und stationären Anlagen gefunden. Die Kolben-Zylinder-Baugruppe, im wesentlichen bestehend aus Zylinderkopf, Zylinderbuchse und Kolben, hat vornehmlich die Aufgabe, den Brennraum bei der Energieumwandlung gegenüber der Umgebung abzugrenzen (Brennraumbauteile) und mechanische Energie auf das Triebwerk zu übertragen. Die dabei auftretenden Verschleißvorgänge zwischen Zylinderbuchse und Kolben bzw. Kolbenringen oder zwischen Kolbenbolzen und Kolbenbolzenlagerungen sollen im vorliegenden Beitrag nicht behandelt werden. Dazu kann auf eine umfangreiche Darstellung in der Literatur [1, 2] verwiesen werden.

Eine andere Art der Schädigung o. g. Bauteile kann durch Ermüdung oder Sprödbruch infolge mechanischer, thermischer und chemischer Beanspruchung erfolgen. Die folgenden Ausführungen beschränken sich auf diese Schädigungsvorgänge.

### 2. Belastung und innere Beanspruchung

Die Gesamtbelastung der Brennraumbauteile ist durch die Zustandsgrößen im Zylinder und die konstruktive Gestaltung der einzelnen Bauteile gegeben. Im Bild 1 werden die komplexen Beanspruchungsverhältnisse an einer Brennraumwand zur Erläuterung sche-

matisch und stark vereinfacht dargestellt. Danach wirken Gasdruck und thermische Belastung mit veränderlicher Amplitude und Frequenz. Ihr zeitlicher Verlauf wird durch die Motordrehzahl und das abgeforderte Drehmoment bestimmt. Beide Größen sind wesentlich von den Einsatzbedingungen der Traktoren und Landmaschinen abhängig. Die Bestimmung der Temperaturfelder erfolgte auf experimentellem und rechnerischem Weg [3, 4]. Bei unzulänglicher Pflege und Wartung der Kühlmittel und Kühlsysteme können Ablagerungen auf den Brennraumwänden auftreten, die zu bedeutsamen Temperaturerhöhungen gegenüber dem Konstruktionszustand führen. Im Bild 2 ist der Einfluß der Schichtdicke von kühlraumseitigen Ablagerungen auf die Bauteiltemperaturen in einer Brennraumwand dargestellt. Die Messung der Bauteiltemperaturen erfolgte mit Ni-Cr-Ni-Thermoelementen. Zur Berechnung wurde im stationären Fall die Methode der finiten Elemente (FEM), im instationären Fall das Bilanzierungsverfahren gewählt [5]. Ausgangspunkt ist im betrachteten Beispiel die Laplacesche Gleichung für rotationssymmetrische Wärmeleitprobleme ohne Wärmequellen:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r k_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( r k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (1)$$

Für die gedachte Aufteilung des Kontinuums werden Viereck-, Dreieck- und Balkenelemente benutzt. Die Wärmeleitfähigkeiten  $k_r$

und  $k_z$  können als lineare Funktion der Temperatur angegeben und die Randbedingungen 1. bis 3. Art gewählt werden.

Im instationären Fall wird von der Fourierschen Differentialgleichung folgender Form ausgegangen:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \Delta T \quad (2)$$

Charakteristische Temperaturverteilungen in einer Brennraumwand werden im stationären und instationären Belastungsfall im Bild 3 dargestellt.

In den durchgeführten Untersuchungen wurden rein-elastische und elastisch-plastische Berechnungen nach der FEM vorgenommen. Eine für Brennraumwände charakteristische Ausbildung des Spannungszustands mit entsprechendem Eigenspannungszustand bei Entlastung ist im Bild 4 wiedergegeben. Bild 5 zeigt die mechanisch und thermisch verursachten Spannungen in einer Brennraumwand in Abhängigkeit von der Leistung. Die Ermittlung der Orte maximaler innerer Beanspruchungen in Abhängigkeit von den wesentlichen Betriebsbedingungen ist eine notwendige Voraussetzung für die Vorhersage des Schädigungsverhaltens der Brennraumbauteile.

### 3. Werkstoffschädigung und Lebensdauer vorhersage

Die einfachste Schädigungsvorstellung für ein Werkstoffelement geht auf die Miner-Hypothese zurück, die in den letzten Jahren

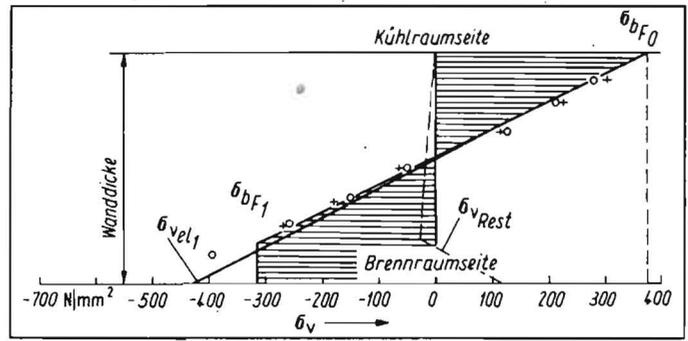
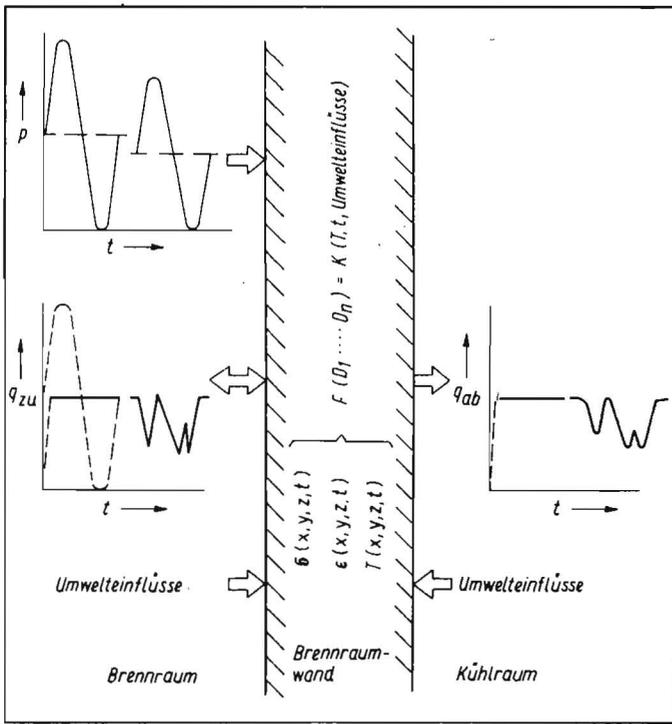


Bild 4. Beanspruchungsverlauf über die Bauteilwanddicke;  
 o — o bei elastischem Materialverhalten  
 + — + bei elastisch-plastischem Materialverhalten

Bild 1. Schematische Darstellung der Beanspruchungsverhältnisse an einer Brennräumwand;  
 p Druck, q Wärmestrom,  $\sigma$  Spannung,  $\epsilon$  Dehnung, T Temperatur, D Schädigung, t Zeit

Bild 3. Temperaturverlauf über die Brennräumwand eines Zylinderdeckels bei Laständerung

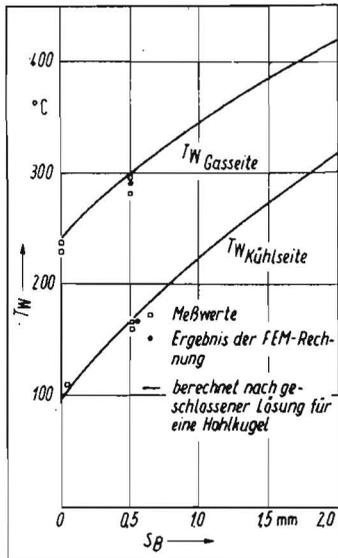
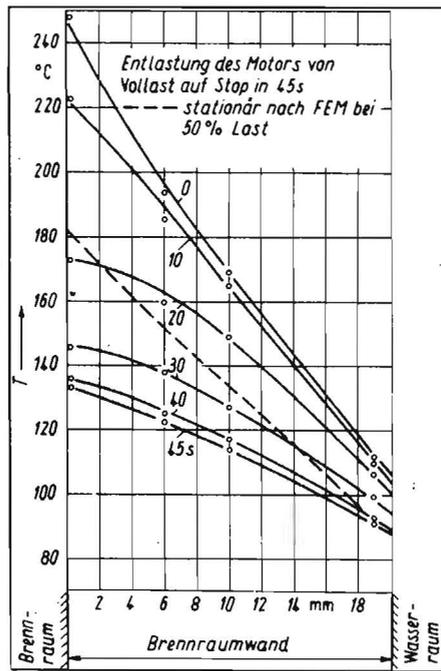


Bild 2. Wandtemperatur  $T_w$  an den Oberflächen einer Brennräumwand in Abhängigkeit von der Belagschichtdicke  $s_B$  auf der Kühlraumseite



von praktischer Bedeutung ist die positive Wirkung von Inhibitoren auf den Abbau der korrosiven Wirkung des Kühlwassers und die damit verbundene Erhöhung der Lebensdauer (Bild 8). Die ständig verbesserte Prüftechnik und vervollkommnete Prüfverfahren führen zu einem verstärkten Nachweis von Rissen in Bauteilen. Der bisherige Grundsatz, Risse nach Erkennung sofort nachzubessern oder das Bauteil auszuwechseln, gerät immer mehr mit materialökonomischen Anforderungen in Konflikt. Zur Lösung dieses Widerspruchs hat die Technische Bruchmechanik [7, 8] in den letzten Jahren wesentliche Grundlagen geschaffen, so daß heute folgende Fragen gestellt werden können:

- Bei welcher Nennbeanspruchung bzw. bei welcher Rißlänge (Tiefe) ist ein Rißfortschritt zu erwarten?
- Mit welcher Geschwindigkeit pflanzt sich der Riß fort?
- Wann ist ein kritischer Zustand erreicht, bei dem eine spontane Rißausbreitung (Sprödbruch) erfolgt?

In der Bruchmechanik spielt der Spannungsintensitätsfaktor  $K = f(\sigma_0, l, B)$ , der eine Funktion der Nennspannung  $\sigma_0$ , der Rißlänge  $l$  und der Bauteilgeometrie ist, eine dominierende Rolle. Für eine unendlich ausgedehnte Scheibe mit einem Innenriß der Länge  $l$  ergibt sich z. B. der Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  bei einer Nennspannung  $\sigma_0$  zu

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi l} \quad (7)$$

(Die Spannungsintensitätsfaktoren  $K_{II}$  und  $K_{III}$  ergeben sich analog zu Gl. (7) bei entsprechenden Schubbeanspruchungen.)

Nach der Darstellung im Bild 9 muß ein kritischer Wert  $\Delta K_T$  für die Schwingbreite der Spannungsintensität überschritten werden, wenn sich der Riß fortpflanzen soll. Eine stabile Rißfortpflanzung ist im Bereich  $\Delta K_T \leq \Delta K < \Delta K_c$  vorhanden. Instabile Rißausbreitung tritt bei  $\Delta K = \Delta K_c$  ein. Auf Brennräumbauteile aus Graugußlegierungen kann die linear-elastische Bruchmechanik (LEBM) angewendet werden. Danach läßt sich das Rißwachstum im stabilen Bereich

oberhalb der Grenzlastspielzahl verschiedene Modifizierungen erhalten hat (Bild 6). Die lineare Schadensakkumulation betrachtet einen abstrakten Schaden  $D$ , der zu Beginn der Schädigung den Wert 0 hat und zum Zeitpunkt des Bruchs den Wert 1 erreicht. Danach ergibt sich der Schadenszuwachs  $dD$  in einer differentiell kleinen Lastspielzahl  $dn$  im Wöhlerversuch zu

$$\frac{dD}{dn} = \frac{1}{N}; \quad (3)$$

$N$  Bruchlastspielzahl  
 $n$  aktuelle Lastspielzahl.  
 Die Integration über die Lebensdauer  $L$  führt zu

$$D = 1 = \int_0^L \frac{dn}{N} \quad (4)$$

Bei überlagerter Beanspruchung aus mehreren Anteilen führt der Grundgedanke der linearen Schadensakkumulation zur Addition von  $n$  Einzelschädigungen

$$dD = \sum_{i=1}^n \frac{\partial D_i}{\partial n_i} dn_i \quad (5)$$

und beim Erreichen der Gesamtlebensdauer zu

$$D = 1 = \sum_{i=1}^n \left( \int_0^{L_i} \frac{dn_i}{N_i} \right) \quad (6)$$

Von Gnilek [6] werden Wege gezeigt, wie beliebige Belastung-Zeit-Funktionen berücksichtigt werden. In diesem Beitrag kann darauf nicht weiter eingegangen werden. Der erhebliche Einfluß korrosiver Medien auf die Lebensdauer eines metallischen Werkstoffs geht aus Bild 7 hervor [4]. Interessant und

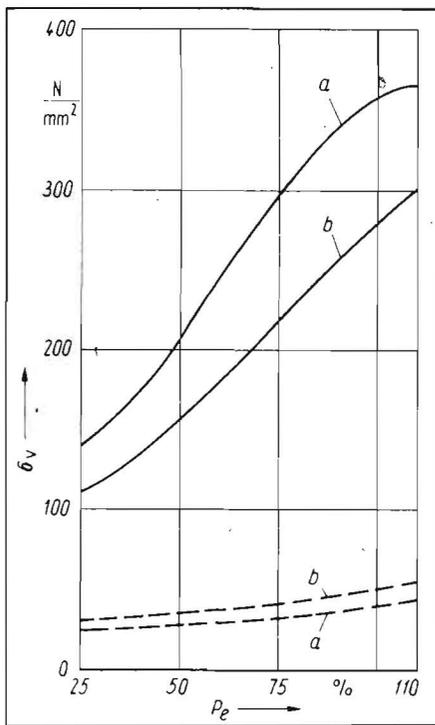


Bild 5. Abhängigkeit der Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  von der Motorleistung  $P_e$ :  
 a Brennraumseite, b Kühlraumseite  
 — Beanspruchung aus dem Temperaturfeld  
 - - - Beanspruchung aus dem Zünddruck

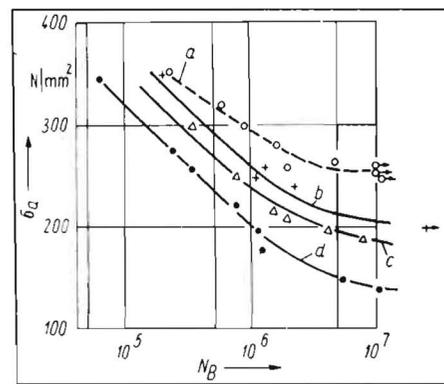
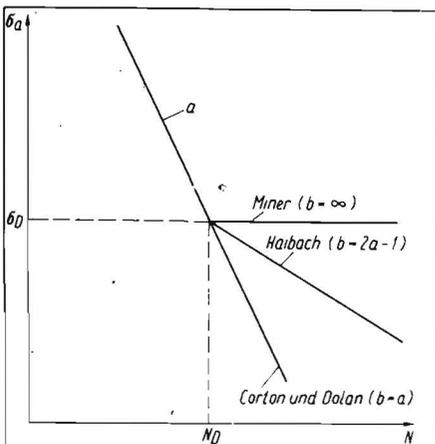


Bild 7. Medieneinfluß auf die Bruchlastwechselzahl  $N_B$  von Cr-Mo-Stahl bei zyklischer Beanspruchung [4]

Kurve	Medium	Temperatur °C	Frequenz $\text{min}^{-1}$
a	Luft	Raumtemperatur	3 400
b	Leitungswasser	Raumtemperatur	3 400
c	Leitungswasser	90	3 400
d	Leitungswasser	90	110

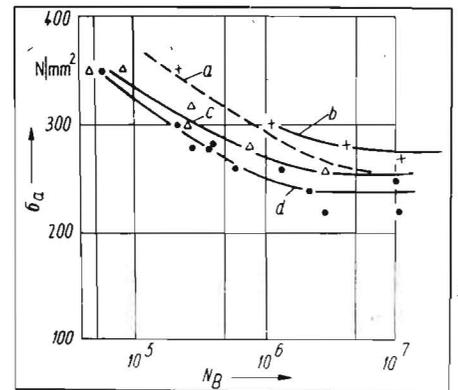


Bild 8. Einfluß von Nitrid-Inhibitoren auf die Bruchlastwechselzahl  $N_B$  eines Cr-Mo-Stahls [4]

Kurve	Medium	Temperatur °C	Frequenz $\text{min}^{-1}$
a	Luft	Raumtemperatur	3 400
b	inhibiertes Wasser	Raumtemperatur	3 400
c	inhibiertes Wasser	90	3 400
d	inhibiertes Wasser	90	110

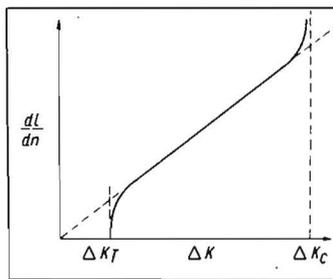


Bild 9. Charakteristisches Rißwachstum (Koordinatenachsen logarithmisch geteilt)

Bild 6. Vergleich verschiedener linearer Schadensakkumulationshypthesen (Koordinatenachsen logarithmisch geteilt)

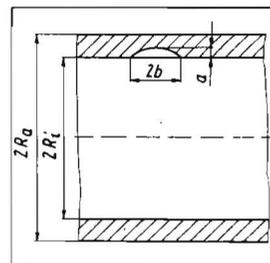


Bild 10. Zylinderbuche mit halbelliptischem Oberflächenriß;  
 $R_o = 70 \text{ mm}$ ,  $R_i = 60 \text{ mm}$ ,  $\sigma_{a2} = 210 \text{ MPa}$ ,  
 $K_{Ic} = 635 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^{1/2}$ , Werkstoff GGL 20

nach der empirischen Beziehung von Paris und Erdogan beschreiben:

$$\frac{dl}{dn} = C \Delta K^m; \quad (8)$$

$C, m$  Werkstoffkonstanten.

Von besonderer Bedeutung ist die Vorhersage des kritischen Zustands bei Bauteilen mit Anriß. Am Beispiel einer angerissenen Zylinderbuche nach Bild 10 soll der maximale Zylinderdruck  $p_z$  bestimmt werden, mit dem der Motor noch betrieben werden kann, ohne daß ein spontaner Bruch auftritt. Ohne auf die Ableitung der folgenden Beziehung [9] eingehen zu können, bestimmt sich der kritische Druck näherungsweise zu:

$$p_{zkr} \approx \frac{K_{Ic} \left[ \frac{3\pi}{8} + \frac{\pi}{8} \left( \frac{a}{b} \right)^2 \right] 2(R_o - R_i)}{1,12 \sqrt{\pi a} (R_o + R_i)} = 6,2 \text{ MPa}. \quad (9)$$

Auf ähnlichem Wege kann bei gegebenem Druck  $p$  die kritische Rißgröße ermittelt werden.

#### 4. Zusammenfassung

Im Beitrag wurde über die Ermittlung und Vorhersage von Schädigungsvorgängen an Brennraumbauteilen von Dieselmotoren durch Ermüdung oder Sprödbbruch berichtet. Der Einfluß von kühlraumseitigen Ablagerungen auf die Erhöhung der Temperaturen in den Brennraumwänden wurde am Beispiel erläutert. Über die Minderung der dynamischen Festigkeitseigenschaften der Bauteile durch Wasser und über ihre Verbesserung durch Anwendung von Inhibitoren wurde berichtet. Im Zusammenhang mit der rechnerischen Vorhersage der Lebensdauer erfolgte eine Abschätzung des Einflusses eines vorhandenen Risses auf das Festigkeitsverhalten einer Zylinderbuche.

#### Literatur

- [1] Stibbe, J.: Ermittlung von technisch-ökonomisch begründeten Schadensgrenzwerten der Zylinder-Kolben-Gruppe für Fahrzeug-Viertakt-Dieselmotoren. PVB Charlottenthal, Abschlußbericht 1973 (unveröffentlicht).
- [2] Holzer, K. A.: Zylinderverschleiß in Verbren-

- nungsmotoren. München: R. Oldenbourg 1952.
- [3] Sitkei, G.: Heat transfer and thermal loading in internal combustion engines (Wärmeübertragung und thermische Belastung von Verbrennungsmotoren). Budapest: Akademiai Kiado 1974.
- [4] Bludszuweil, S.: Ermittlung des Festigkeitsverhaltens der Brennraumbauteile großer Dieselmotoren. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Sektion Landtechnik, Forschungsbericht 1983 (unveröffentlicht).
- [5] Reißmann, C.: Das Bilanzierungsverfahren für finite Elementarbereiche und seine Anwendung in der Baumechanik. Wilhelm-Pieck-Universität Rostock, Dissertation B 1974.
- [6] Gnilek, W.: Lebensdauerberechnung der Maschinenelemente. Berlin: VEB Verlag Technik 1980.
- [7] Schwalbe, K.-H.: Bruchmechanik metallischer Werkstoffe. München/Wien: Carl-Hanser-Verlag 1980.
- [8] Blumenauer, H.; Pusck, G.: Technische Bruchmechanik. Leipzig: VEB Dt. Verlag für Grundstoffindustrie 1982.
- [9] Göldner, H.: Anwendung der Bruchmechanik zur Beurteilung der Sprödbrechtsicherheit. IfL-Mitteilungen, Dresden 22 (1983) 5, S. 157-165.