

# Thermographie und Holographie — zwei neue Verfahren der Technischen Diagnostik

Dipl.-Ing. L. Brehmer, KDT, Hochschule für Verkehrswesen Dresden

Der Einsatz neuer Werkstoffe, die Einführung neuer Fertigungsprozesse, die intensivere Nutzung vieler Bauteile sowie neue Instandhaltungsstrategien ließen neuartige Diagnoseverfahren entstehen. Dazu gehören die Thermographie und die holographische Interferometrie. Im vorliegenden Beitrag werden die Verfahren und ihr möglicher Anwendungsbereich beschrieben.

## 1. Thermographie

### 1.1. Physikalischer Grundeffekt

Das Verfahren der Thermographie basiert auf der technischen Ausnutzung der Wärmestrahlung, die mit der Oberflächentemperatur des

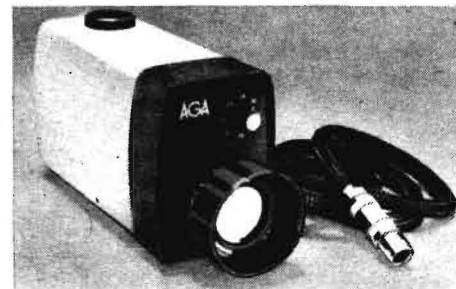


Bild 1. Tragbare Aufnahmekamera Modell 750

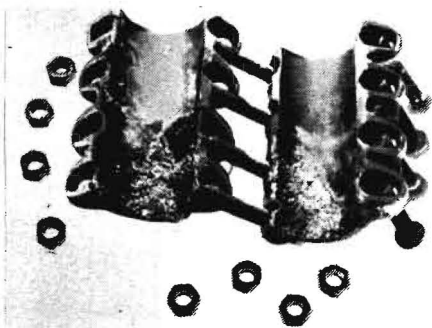
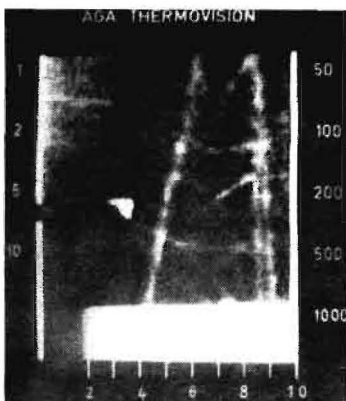


Bild 2. Schadbild einer Freileitungsverbindung

Bild 3. Thermogramm einer Freileitungsverbindung



untersuchten Objekts schwankt. Alle Körper, deren Temperatur über 1°K (-273°C) liegt, emittieren im Infrarotwellenbereich eine elektromagnetische Energie, die als Quanten oder Photonen abgegeben wird. Da die Anzahl der emittierten Quanten eine Funktion der Temperatur ist, kann diese Erscheinung technisch genutzt werden. Auf der Basis einer Oberflächentemperaturmessung oder aus der Bestimmung der Temperaturverteilung kann je nach Einsatzgebiet direkt oder im Vergleichsverfahren über Eichnormale auf Fehler oder unvollkommene Konstruktionen geschlossen werden.

### 1.2. Verfahrenscharakteristik

Die Thermographie weist eine Reihe von Vorteilen auf, die sie zu einer wirksamen Diagnosemethode werden lassen. Konventionelle Temperaturmeßmethoden, wie der Einsatz von Thermoelementen, Temperaturmeßfarben usw., konnten in den Fällen zurückgedrängt werden, wenn ein dynamischer Wärmeabstrahlungsvorgang von einer größeren Körperoberfläche analysiert werden soll oder wenn ein Objekt örtlich schwer erreichbar ist. Eine störende Beeinflussung des zu messenden Körpers durch Meßelemente ist ausgeschlossen, da das Verfahren auf einer Fernabastung beruht und keinen direkten körperlichen Kontakt benötigt.

Die auf jedem Bild gleichzeitig aufgezeichnete Temperaturskala gestattet eine eindeutige Rekonstruktion und Bewertung der aufgenommenen Wärmebilder. Die Analyse kann in vielen Fällen sehr vereinfacht werden, wenn die Temperaturpegel zwischen zwei wählbaren Isothermen erfaßt werden sollen. Temperaturvorgänge, die im Inneren eines Körpers ablaufen, können mit diesem Verfahren nicht erfaßt werden.

Als weiterer Nachteil muß bei exakten Messungen der Einfluß des Wärmeemissionskoeffizienten der Meßfläche genannt werden.

### 1.3. Arbeitsweise

Ein optisches System tastet das Bildfeld ab und fokussiert die infrarote Strahlung auf einen Detektor, der die emittierten Photonen aufnimmt und in entsprechende elektrische Signale umwandelt. Zur Erzielung höchster Temperaturempfindlichkeit wird das Detektorelement, meist Indiumantimonid (InSb), durch flüssigen Stickstoff gekühlt.

Die von der Kamera (Bild 1) [1] erzeugten elektrischen Signale werden im Wiedergabegerät verstärkt und dienen zur Steuerung des Elektronenstrahls der Bildröhre. Der Elektronenstrahl schwenkt über die Bildschirmfläche in der gleichen Folge wie der Abtaststrahl der Kamera. Durch die hohe Abtastfrequenz wird auf dem Bildschirm ein wirklichkeitstreuere Bild wiedergegeben. Es kann fototechnisch fixiert werden. Das erhaltene Wärmebild wird allgemein als Thermogramm bezeichnet.

### 1.4. Anwendungsmöglichkeiten

Der Anwendungsbereich der Thermographie

läßt sich in zwei Gruppen untergliedern, in aktive und passive Prüfobjekte.

Während bei den passiven Prüfobjekten das Wärmeflußverfahren wirksam wird, d. h. die Prüflinge müssen durch Aufheizung von außen aktiviert werden, erzeugen die aktiven Prüflinge die zu messende Wärmeenergie selbst. Alle physikalisch-chemischen Prozesse in einem geschlossenen Prozeß enden schließlich nach den Hauptsätzen der Thermodynamik in einer Temperaturänderung, so daß aus dieser Änderung diagnostisch auf ablaufende oder abgelaufene Prozesse geschlossen werden kann.

### 1.4.1. Diagnose an aktiven Prüfobjekten

Hohe elektrische Übergangswiderstände verursachen eine Temperaturentwicklung und damit eine erhöhte Temperaturabstrahlung, die zum Nachweis von Korrosionserscheinungen oder fertigungstechnisch bedingten Fehlern genutzt wird. Als Beispiele können aufgeführt werden:

- Prüfung der elektrischen Übergangswiderstände an Freileitungen oder sonstigen Verdrahtungen (Bilder 2 und 3)
- Prüfung hinsichtlich Kaltlötstellen oder sonstiger fehlerhafter Verbindungen in elektrischen und elektronischen Schaltkreisen.

Ferner lassen sich Alterungsvorgänge in elektrischen oder elektronischen Bauelementen (Widerstände, Spulen, Kondensatoren) nachweisen.

Mit Hilfe des Thermogramms können Wärmeverlustquellen an Gebäuden oder an anderen technischen Einrichtungen festgestellt werden, die unmittelbare Hinweise auf mangelhafte Isolierung oder Lunker im Werkstoff geben. In diese Anwendungsgruppe gehört auch die Feuchtigkeitsermittlung in porösen Baumaterialien. Die Verdunstungswärme führt zur Temperatursenkung, die somit einen Aufschluß auf die im Werkstoff befindliche Wassermenge gibt. Die Überlastung oder die falsche Betriebsweise einer Maschine bzw. eines Antriebsorgans äußert sich gewöhnlich in einer erhöhten Wärmeabstrahlung, die über vorhandene Vergleichsnormale eine Bestimmung der Zustandsabweichung zuläßt.

### 1.4.2. Diagnose an passiven Prüfobjekten

Die Messung der Wärmeleitfähigkeit kann zur Feststellung verschiedenartiger Werkstofffehler genutzt werden, hauptsächlich in Klebverbindungen [2]. Dazu werden die zu untersuchenden Werkstoffe (Flugzeugblechkonstruktionen) einem definierten Wärmestrom ausgesetzt, der als Wärmefront im Werkstoff fortschreitet. Trifft diese Wärmefront auf eine Fehlstelle (keine Klebverbindung) wird die Isotherme verzerrt und von der Kamera fixiert. Der Hohlraum wirkt als wärmeisolierende Luftschicht und hält die gleichmäßiger Geschwindigkeit von 0,4 m/s weiterwandernde Wärmefront auf. Zeitlich gesehen ergibt sich ein Temperatursprung bzw. ein örtlicher Nachlauf, der den Fehler defektoskopiert. Eingesetzt wird dieses Diagnoseverfahren vorwiegend zur

Untersuchung von geklebten Blechfeldern und Sandwichkonstruktionen.

## 2. Holographie

### 2.1. Physikalischer Grundeffekt

Die Holographie ist ein linsenloses Abbildungsverfahren, mit dem optische Wellenfronten an einem bestimmten Ort im Raum unter Nutzung aller in der Lichtquelle vorhandenen Informationen, wie Amplituden- und Phasenverteilung, rekonstruiert werden können. Voraussetzung für die Erzeugung eines Hologramms ist kohärentes Licht (Laserlicht), da nur dieses interferenzfähig ist.

Die Fähigkeit kohärenter Lichtwellenzüge, mit gleicher Wellenlänge und Phasenlage bei gegenseitiger Überlagerung miteinander zu interferieren und auf einer Fotoplatte ein Interferenzmuster zu erzeugen, bildet die Grundlage des holographischen Verfahrens. Das aufgenommene Hologramm kann als ein kompliziertes Beugungsgitter aufgefaßt werden, das bei Durchstrahlung mit Laserlicht zwei Beugungsbilder vom aufgenommenen Objekt entstehen läßt, ein reelles und ein virtuelles Bild.

### 2.2. Verfahrenscharakteristik und Arbeitsweise

Im Bild 4 wird die prinzipielle Funktionsweise des Diagnoseverfahrens dargestellt. Das von einer Strahlungsquelle kommende Licht wird durch einen Strahlungsteiler (halbdurchlässiger Spiegel) in zwei Strahlungsbündel, Objektstrahl und Referenzstrahl, zerlegt. Während die Referenzwelle oder Bezugswelle direkt zur Hologrammplatte gelangt, läuft die Gegenstandswelle erst zum Objekt und kommt schließlich gegenüber der Referenzwelle phasenverschoben ebenfalls dort an. Beide überlagern sich und interferieren. Aufbauend auf dieser Tatsache wurde die holographische Interferometrie entwickelt. Dabei werden zwei Aufnahmen von einem Objekt in eine Fotoplatte eingespeichert und durch die Rekonstruktion so überlagert, als würden sie gleichzeitig existieren. Sind die Aufnahmen identisch, so entsteht nur ein rekonstruiertes Objekt. Hat dagegen zwischen den Aufnahmezeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  eine Verformung stattgefunden, so erscheint das Objekt bei der Rekonstruktion mit einem Streifenmuster überzogen, das die vollständige Information über erfolgte Veränderungen enthält. Der Zustand der Oberfläche, ob rauh oder glatt, hat keinen Einfluß auf den Streifenentstehungsmechanismus. Diese Randbedingung ist für den Anwender sehr wesentlich, denn das bedingt, daß für Untersuchungen Originalbauteile eingesetzt werden können. Man kommt also ohne Modelle aus, im Gegensatz zur spannungsoptischen Analyse, wo diese unentbehrlich sind. Das Verfahren reagiert aufgrund seiner extremen Empfindlichkeit schon auf geringste Belastungen (durch Beobachtung von Oberflächenbewegung), die im  $\mu\text{m}$ -Bereich liegen. Eine vollständige Bestimmung des Verschiebungsvektors ist auf rd.  $\pm 0,05 \mu\text{m}$  genau möglich. Form und Anzahl der sichtbaren Interferenzstreifen geben Auskunft über die an der Oberfläche aufgetretenen Verformungen bzw. Verschiebungen. Sie lassen sich qualitativ und mit erheblichem Rechenaufwand unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse der Holographieanordnung auch quantitativ auswerten. Das Verfahren ist damit zurückzuführen auf den Vergleich zweier Oberflächenzustände zu zwei verschiedenen Zeitpunkten bei veränderter Belastung.

Bild 4 Aufnahme eines Hologramms; a Laser, b Strahlungsteiler, c Blende, d Hologrammplatte, e Referenzwelle, f Objektwelle, o Objekt

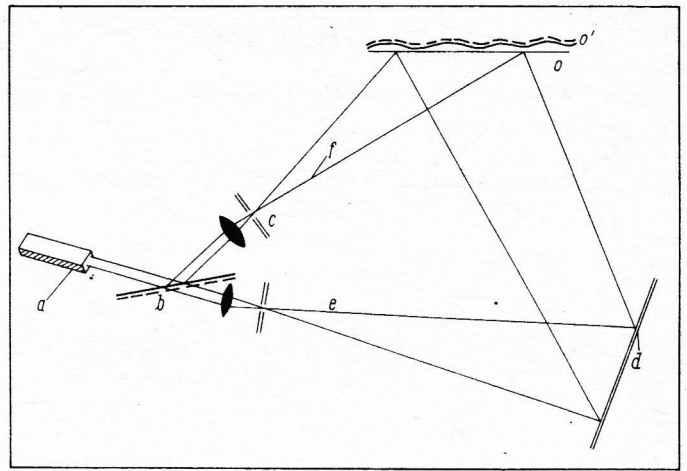


Bild 5 Hologramm zur Ermittlung der Spannungsverteilung



### 2.3. Anwendungen in der Technik

In Abhängigkeit von der aufgetragenen Belastungsart (statisch, periodisch oder impulsförmig) unterscheidet man zwischen

- Verformungsanalyse
- Schwingungsanalyse
- Bewegungsanalyse.

#### 2.3.1. Verformungsanalyse

Die Oberfläche kann auf verschiedene Weise einer Belastung unterworfen werden. Zu dieser Gruppe zählen die mechanische, die thermische und die Druckbeanspruchung. Mit der Druckbeanspruchung sollen vor allem Bauteile untersucht werden, in denen sich ein Über- oder Unterdruck aufbauen läßt. Hierzu gehören:

- Prüfung von Glasfaser-Kunststoff-Behältern oder Rohren auf Klebefehler, Blasen, Hohlräume, Faserrisse usw. Dabei ist 1% der Bruchlast ausreichend, um Unregelmäßigkeiten im Hologramm zu erkennen, die unter Anwendungsbedingungen zu Bauteilschäden führen können.
- Prüfung von Hochleistungsreifen zur Diagnose von inneren Reifenschäden, z. B. Trennung der Karkasse vom Gummi. Oftmals sind kleine Fehler selbst unproblematisch, kennt man ihre Wachstumsgeschwindigkeit. Durch regelmäßige Prüfung kann diese ermittelt und daraus die Restnutzungsdauer bestimmt werden.

Bei der thermischen Belastung beruht die Untersuchungsmethode auf der Änderung der Oberflächenstruktur, hervorgerufen durch unterschiedliche Wärmeausdehnung im Werkstoff oder an gelösten Verbindungen zwischen zwei

Werkstoffen unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit.

Hierzu gehört die Prüfung von geklebten oder gelöteten Strukturen, Sandwichkonstruktionen und Gummi-Metall-Verbindungen (z. B. Schwingungsisolatoren in der Kraftfahrzeugindustrie).

Da die Möglichkeiten der Aufbringung einer mechanischen Belastung sehr vielfältig sind, soll hier diese Problematik nicht weiter erörtert werden. Die Auswahl ist von der Geometrie des Bauteils und von der zu erwartenden Art des Defekts abhängig. Anwendungsmöglichkeiten sind:

- Ermittlung von Beulspannungen in Blechen schon bei geringster Verformung
- Ermittlung von Montagefehlern, die sich als Bauteilspannungen auswirken (z. B. an Getriebedeckeln, Pumpen und Turbinen, aber auch an kleineren Bauelementen)
- Ermittlung von Bauteilspannungen zur materialökonomischen Gestaltung von Verbrauchsgütern, z. B. Flaschen, Gläser (Bild 5)
- Bauteilprüfung auf Risse, Lunken und sonstige Fehlstellen  
Neben Rissen lassen sich bereits Anrißkeime feststellen, die sich als Oberflächenverzeichnungen widerspiegeln.

#### 2.3.2. Schwingungsanalyse

Wird ein schwingender Körper holographisch analysiert, so überzieht sich der Gegenstand im Hologramm ebenfalls mit einem Interferenzmuster, aus denen sich die Schwingungsknotenlinien ablesen lassen. Dabei zeichnet sich jede Eigenschwingungsform durch ihre Knotenlinien aus. Materialfehler wirken sich unmittelbar auf die Eigenfrequenz und auf die Schwingungsform aus. Infolge der Änderung der Knotenlinien treten Verzeichnungen im Hologramm auf. Als Belastungsgröße wird in vielen Fällen die Ultraschallerregung gewählt. Damit können relativ große Oberflächen interferometrisch aufgezeichnet werden, da diese durch die Plattenwellenfortpflanzung bei niedrigen Frequenzen verformt werden. Repräsentative Beispiele dafür sind:

- Prüfung von Triebwerksschaufeln  
Anrisse oder verstärkte Erosion führen zu völlig anderen Schwingungsbildern im Vergleich mit einem Schaufelnorm.
- Prüfung von Flugzeugkonstruktionsbaugruppen auf das Vorhandensein von Losteilen oder auf Ermüdungserscheinungen im Werkstoff.

Fortsetzung auf Seite 14

# Erfahrungen beim Auswerten von Hauptüberprüfungen an Traktoren

Dipl.-Ing. G. Giese, KDT, VEB Kreisbetrieb für Landtechnik Görlitz-Niesky

In den letzten Jahren wurden bei der Durchsetzung der Hauptüberprüfungen von Traktoren wesentliche Fortschritte erzielt. Die Hauptüberprüfung als eine Möglichkeit der Technischen Diagnostik ist definiert [1]. Die bei der Hauptüberprüfung durchzuführenden Arbeiten sind für jeden Traktorentyp technisch und technologisch bestimmt [2]. Für die Gestaltung der Arbeitsplätze in Diagnosestationen und für die Ausrüstung von Prüffahrzeugen gibt es viele Vorschläge [3] [4].

Trotz dieser guten Voraussetzungen gibt es von seiten der Praktiker Tendenzen zur formalen Durchführung der Hauptüberprüfungen (geringe technologische Disziplin) und teilweise Ablehnung, weil als Ergebnis eine Restnutzungsdauerprognose erwartet wird, die nicht gegeben werden kann [5]. Allen Praktikern sollten anwendungsbereite Vorschläge für die Arbeit mit den Prüfergebnissen aus der Hauptüberprüfung zur Verfügung stehen, ohne die Arbeit an der Restnutzungsdauerprognose zu vernachlässigen.

## 1. Möglichkeit zur Arbeit mit den Prüfergebnissen

Bei der Hauptüberprüfung wird eine Vielzahl von Mängeln an den Traktoren festgestellt. Da alle Traktoren nach dem gleichen Verfahren überprüft werden und die Prüfergebnisse in gleicher Weise erfaßt werden, können alle Mängel eindeutig lokalisiert werden. Von Bedeutung ist, daß „Mängel“ erfaßt werden und nicht nur der „Schadzustand“. Bei der Auswertung der Mängel kann nicht nur das Ziel verfolgt werden, daraus die Restnutzungsdauer zu ermitteln. Vielmehr muß nach den Ursachen der Mängel geforscht werden, um diese zu beeinflussen bzw. völlig zu beseitigen. Die praktische Auswertung von Prüfergebnissen zeigt eindeutig, daß nicht nur technisch bedingter Verschleiß zu einem bestimmten

Schadzustand führt. Ein wesentlicher Teil der festgestellten Mängel kann vermindert bzw. vermieden werden durch

- größere Disziplin bei der Durchführung der Pflegearbeiten
- rechtzeitiges Wechseln von Verschleißteilen
- Sicherung der erforderlichen Qualität bei allen Pflege- und Instandsetzungsarbeiten
- ständig richtige Einstellung der verstellbaren Parameter.

Die Auswertung einer Vielzahl von Hauptüberprüfungsprotokollen zeigt, daß die Qualität der Pflege noch ungenügend ist. Außerdem wird noch nicht genügend erkannt, daß durch die Kontrolle und Einstellung folgender Baugruppen und Parameter die Nutzungsdauer der Baugruppen wesentlich verlängert werden kann:

- Feststell- und Betriebsbremse
- Fahrkupplung
- Radlagerspiel und Spur
- Gummifeder der Motoraufhängung (ZT 300)
- Motordrehzahl.

Viele Mängel sind auch auf die nicht ausreichende Bereitstellung von Ersatzteilen und Baugruppen zurückzuführen. Bei den vom VEB Kreisbetrieb für Landtechnik (KfL) Görlitz-Niesky überprüften Traktoren werden seit 2 Jahren diese in der praktischen Arbeit beeinflussbaren Kriterien analysiert. Im Bild 1 ist ein Beispiel für die Darstellung der Mängelhäufigkeit nach ausgewählten Kriterien nach dem System der ZiS-Erfolgsspinne aufgezeigt. Die dargestellten Werte sind das Ergebnis einer Auswertung der Hauptüberprüfungen aller Traktoren eines Typs in einer Kooperativen Abteilung Pflanzenproduktion (KAP) und damit nicht repräsentativ. Diese Auswertungen liegen für alle Traktorentypen aus allen KAP und LPG Pflanzenproduktion vor.

Infolge der ersten Analyse dieser Art im Jahr 1974 konnten folgende Schlußfolgerungen abgeleitet werden:

- Verbesserung der Qualität der Wartungs- und Pflegearbeiten
- planmäßige Teilinstandsetzung der Traktoren auf der Grundlage der Ergebnisse der Hauptüberprüfung
- stärkere Einflußnahme auf die Ersatzteil- und Baugruppenplanung und -bereitstellung.

Zur Wertung der Ergebnisse wurden die Überprüfungs-kriterien in Gruppen zusammengefaßt (Tafel 1), wobei die Gruppierung nach der eingeschätzten Abhängigkeit erfolgte.

Die Trenddarstellung im Bild 2 gestattet folgende Aussagen:

- Die Qualität der Pflege wurde erhöht (Bewertungsgruppe A). Als gut kann die Pflege jedoch erst bezeichnet werden, wenn diese Mängel vollständig beseitigt sind.
- Bei den überwiegend von der Ersatzteilversorgung abhängigen Kriterien gibt es keine wesentliche Verbesserung gegenüber dem vorangegangenen Jahr (Bewertungsgruppe B)
- Die von der Einstellung der Einspritzpumpe abhängigen Kriterien (Bewertungs-

gruppe C) zeigen eine Verschlechterung des Zustands, was dem sparsamsten Umgang mit Dieselmotorkraftstoff entgegenwirkt.

Die Auswertung der Hauptüberprüfungen nach dem dargelegten Vorschlag zeigt, daß mit der zielstrebigsten Durchsetzung der Pflegeordnung weitere Reserven für die Verfügbarkeit der Technik erschlossen werden können. Dabei ist die Auswertung der analysierten Aussagen ständig in den Kollektiven (Bedienpersonal, Pflegepersonal, Instandsetzungskollektive, Kollektive in den Versorgungseinrichtungen) erforderlich.

## 2. Vorschläge für die Organisation der Hauptüberprüfungen

Mit der zunehmenden Kompliziertheit der Maschinen steigen die Anforderungen an die Aussagekraft der Überprüfungen (Prüfmittel, Prüfspezialisten). Eine Lösung bietet dafür die

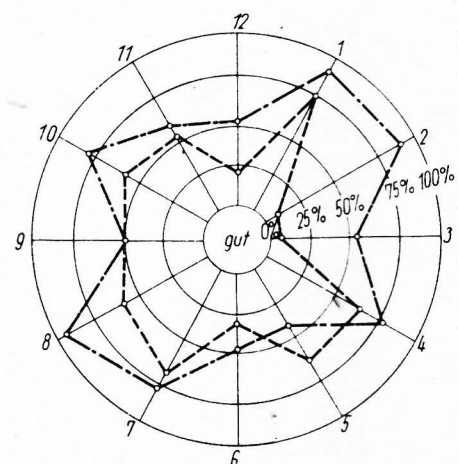


Bild 1

Entwicklung des Anteils der Traktoren mit Mängeln nach Mängelkriterien bei der Hauptüberprüfung in einer KAP; 1 Ventilspiel, 2 Einspritzdüsen, 3 Filter, 4 Lenkung, 5 Vorderachse, 6 Fahrzeugkupplung, 7 Bremsen, 8 Fahrgestell, 9 Anhängerkupplung, 10 Elektroanlage, 11 Ölstand, 12 Räder

— 1974  
- - - 1975

Tafel 1. Zusammenstellung einiger Überprüfungs-kriterien nach Bewertungsgruppen

| Bewertungsgruppe | Überprüfungs-kriterium   | Abhängigkeit  |
|------------------|--|---|
| A                | Ventilspiel<br>Einspritzdüsen<br>Filter<br>Ölstand                                   | Wartung und Pflege  |
| B                | Lenkung<br>Vorderachse<br>Fahrkupplung<br>Bremsen<br>Anhängerkupplung<br>Fahrgestell | Qualität der Instandsetzung, Ersatzteilversorgung, Pflege |
| C                | Motordrehzahl<br>Rauchgastrübung   | Einstellung der Einspritzpumpe                            |

Fortsetzung von Seite 13

## 2.4. Akustische Holographie

Eine neuartige Diagnosemethode, die noch nicht völlig ausgereift ist und hier nur erwähnt werden soll, bildet die akustische Holographie. Mit diesem Verfahren ist eine geometrietreue Darstellung von inneren Fehlern möglich, die keine Auswirkungen auf die Oberfläche zeigen, wie Risse, Lunken, Absplinterungen und Blasen in Metallen, Plaste- und Keramikerzeugnissen. Neben der Fehlergröße kann die Fehlertiefe und die Fehlerschräglage in dickwandigen Erzeugnissen bestimmt werden. Zwei unterschiedlich arbeitende Verfahren werden angewendet, wobei sich das Scanning-Verfahren (abtastende akustische Holographie) im technischen Bereich durchgesetzt hat.

## Literatur

- [1] AGA-Prospekt zur Thermovision, Druckschrift 558.035.
- [2] Brehmer, L.: Technische Diagnostik in der Flugzeuginstandhaltung. Techn.-ök. Information d. ziv. Luftfahrt 11 (1975) H. 2.

A 1504