

# Methode zur Bewertung von Geräten für die technische Diagnostik

L. Pejša, Prag (ČSSR)

Mit der vorgeschlagenen Methode werden Geräte für die technische Diagnostik bei Standard-Laborbedingungen unter dem Gesichtspunkt des wahrscheinlichen ökonomischen Nutzeffekts im Betrieb bewertet. Der zu erreichende ökonomische Effekt wird durch die Senkung der Betriebskosten der diagnostizierten Maschinen ausgedrückt. Zu seiner Bestimmung werden die Diagnosegenauigkeit und die Anwendungskosten herangezogen.

## 1. Problemformulierung und Lösungsgrundsätze

Die technische Diagnostik entwickelt sich als ein Zweig der Meßtechnik mit folgenden spezifischen Anforderungen und sich daraus ergebenden Anwendungsformen:

- Die gemessenen Diagnosesignale stellen ein breitgefächertes System physikalischer Größen dar, das ein entsprechend breites Sortiment von Verfahren und Geräten erfordert.
- Das Ziel besteht nicht nur in der genauen Messung der Signale, sondern vor allem in der ausreichend genauen Diagnose, die den technischen Zustand des untersuchten Maschinenelements unter dem Gesichtspunkt der konkreten Schädigung charakterisiert.
- Die Informationsquelle im Diagnoseobjekt enthält meistens mehrere Signale. Aus ihnen und deren Kombinationen müssen geeignete Signale ausgewählt werden, wobei es notwendig ist, die geeigneten Anwendungsbereiche einzelner Diagnoseverfahren und -geräte einschließlich ihrer eventuellen Ablehnung abzugrenzen.
- Die objektive Bewertung der Geräte für die technische Diagnostik muß von den ökonomischen Auswirkungen der Diagnosegenauigkeit auf den Betrieb der Maschinen und von den Diagnosekosten ausgehen.

Auf die Diagnosegenauigkeit haben folgende Faktoren Einfluß:

- Auswahl der Methode, d. h. Auswahl der Diagnosesignale, Art ihrer Messung und Auswertung
- Meßgenauigkeit des für die Messung der Diagnosesignale verwendeten Geräts
- Genauigkeit der Bestimmung der Schädigungsgrenzen des technischen Zustands, d. h. des optimalen Werts der Diagnosesignale, bei deren Erreichen die Entscheidung zur Instandsetzung des untersuchten Maschinenelements getroffen wird.

Der ökonomische Nutzeffekt des konkreten Diagnoseverfahrens, an dem die drei angegebenen Faktoren der Diagnosegenauigkeit im Normalfall maßgeblich beteiligt sind, kann objektiv auf der Grundlage einer Methode festgestellt werden, deren Bestandteil die Zuverlässigkeitsuntersuchung ist [1, 2]. Das Prinzip beruht auf dem Vergleich der Gesamtbetriebskosten und der Instandsetzungskosten des Elements bei Anwendung des gegebenen Diagnoseverfahrens mit der Möglichkeit der Betrachtung der Betriebsdauer allein ohne Diagnose.

Die erwähnte arbeitsaufwendige Zuverlässigkeitsuntersuchung ist in jedem Fall durchzuführen, um die Grundcharakteristiken für die Leitung des Instandsetzungsprozesses der Maschinenelemente zu ermitteln. Wenn die

Zuverlässigkeitsuntersuchung für das Standardverfahren schon einmal durchgeführt wurde und es notwendig ist, die Eignung eines anderen Verfahrens zu beurteilen, dann bietet sich eine Lösung an, deren Grundlage ein arbeitsmäßig wesentlich günstigerer Laborvergleich beider Verfahren und die Quantifizierung des ökonomischen Effekts der Einführung des neu zu bewertenden Verfahrens bilden. Das Lösungsprinzip beruht auf der Abgrenzung des direkten Einflusses der Auswahl des Verfahrens und der Gerätegenauigkeit auf die Endgenauigkeit der Diagnose. Das erreicht man mit Hilfe modellierter Meßbedingungen, deren Bestandteil auch die o. g. dritte Komponente der Diagnosegenauigkeit, d. h. die Genauigkeit der Bestimmung der Schädigungsgrenze, ist. Der optimale technische Zustand für die Instandsetzung stellt unter den gegebenen Modellbedingungen eine Konstante dar. Somit ist sein Einfluß in der Vergleichsuntersuchung nahezu unbedeutend.

## 2. Benötigte Angaben aus der Zuverlässigkeitsuntersuchung

Die Einhaltung modellierter Laborbedingungen für die Bewertung der neu entworfenen Diagnoseverfahren und -geräte setzt die Kenntnis von Grundangaben aus der Zuverlässigkeitsuntersuchung voraus, die mit Hilfe des Standardverfahrens ermittelt werden. Dazu werden unter normalen Betriebsbedingungen ein ausgewähltes Maschinensystem und seine Elemente unter dem Gesichtspunkt des Auftretens konkreter merklicher Schädigungen, die durch gemessene Diagnosesignale charakterisiert werden, untersucht. Für jeden Typ der Schädigung werden als Ergebnis der Zuverlässigkeitsuntersuchung die nachstehend aufgeführten Daten gewonnen [1, 3]:

$t_r$  ( $S_1, S_2, \dots$ )

technischer Zustand des Elements unter dem Gesichtspunkt der gegebenen Schädigung in Abhängigkeit von den Diagnosesignalen  $S_1, S_2, \dots$ , ausgedrückt durch die relative Nutzungsdauer in h

$S_1, S_2, \dots$

bei der Anwendung des Standardverfahrens gemessene Diagnosesignale, ausgedrückt in den physikalischen Einheiten

$R(t_r)$  Wahrscheinlichkeit des ausfallfreien Betriebs in Abhängigkeit vom technischen Zustand  $t_r$

$\lambda(t_r)$  Ausfallhäufigkeit in Abhängigkeit vom technischen Zustand  $t_r$  in 1/h

$N_h$  Havariekosten (Kosten für die Instandsetzung des Elements, abzüglich der Kosten für die rechtzeitige Instandsetzung  $N_0$ ) in Kčs

$N_0$  Kosten für die rechtzeitige Instandsetzung des Elements unter dem Gesichtspunkt der gegebenen Schädigung in Kčs

$v_c(t_r)$  momentane Kosten zur Veränderung der Betriebsökonomie des Elements in Abhängigkeit vom technischen Zustand  $t_r$  in Kčs/h.

Mit Hilfe einer Optimierungsrechnung werden aus den angegebenen Daten folgende Angaben errechnet, die als Grundlage des geforderten Modells dienen:

$t_{r0}$  Schädigungsgrenzwerte des technischen Zustands, bei deren Erreichen die Instandsetzung ökonomisch am günstigsten ist, ausgedrückt durch die relative Nutzungsdauer in h

$\epsilon_0$  Koeffizient der ökonomischen Verluste, der die Verluste in Abhängigkeit vom Quadrat der Abweichung von der Schädigungsgrenze ausdrückt, in Kčs/h<sup>2</sup>.

Die optimale Instandsetzung und das Prinzip des Einflusses der Abweichung von diesem Optimum sind im Bild 1 dargestellt.

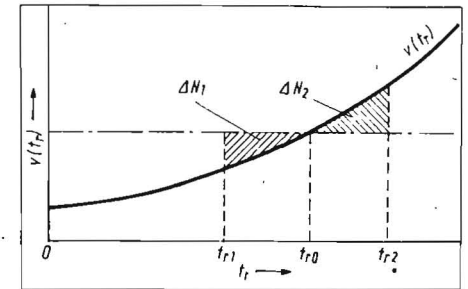


Bild 1. Ökonomische Auswirkungen der Abweichung von der Schädigungsgrenze des technischen Zustands

Im Fall einer vorzeitigen Instandsetzung beim technischen Zustand  $t_{r1}$  kommt es zum Verlust

$$\Delta N_1 = \epsilon_0 (t_{r1} - t_{r0})^2. \quad (1)$$

Im Fall einer verspäteten Instandsetzung beim technischen Zustand  $t_{r2}$  kommt es zum Verlust

$$\Delta N_2 = \epsilon_0 (t_{r2} - t_{r0})^2. \quad (2)$$

## 3. Anforderungen an die Laboruntersuchung

Bestandteil jedes Diagnoseverfahrens, das für die Diagnose eines bestimmten Schädigungstyps angeboten wird, muß der Vorschlag zur Art der Auswertung der gemessenen Signale und deren Bezug zum technischen Zustand des Maschinenelements, charakterisiert durch die gegebene Schädigung, sein. Die geforderte Art der Auswertung kann durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$S' = q(S'_1, S'_2, \dots); \quad (3)$$

$S'$  Koeffizient des technischen Zustands, d. h. angebotene Bewertungsmethode zur Kennzeichnung des technischen Zustands des Elements unter dem Gesichtspunkt der Schädigung

$S'_1, S'_2, \dots$

bei der Anwendung der Bewertungsmethode gemessene Diagnosesignale.

In einem sehr einfachen Fall kann Gl. (3) beispielsweise durch eine lineare Funktion dargestellt werden, in einem anderen Fall kann es sich z. B. um eine komplizierte Korrelationsbeziehung handeln.

Gl. (3) ist im Prinzip für die Diagnose noch nicht ausreichend. Sie stellt lediglich die Kennziffer des technischen Zustands dar, die un-

mittelbar für die Formulierung der Diagnoseaufgabe genutzt werden kann, was eine Mindestforderung für die Anwendungsmöglichkeit des Verfahrens und auch seine Annahme zur Bewertung bedeutet.

Bei der Formulierung der Schritte der Laboruntersuchung muß man von der o.g. Erkenntnis ausgehen, daß es zu ökonomischen Verlusten infolge der Diagnosefehler im Bereich nahe  $t_{r0}$  kommt. An dem entsprechenden Maschinenelement werden zwei technische Zustände simuliert, mit denen die nachfolgend beschriebene Messung vorgenommen wird:

$$t_{r1} \approx 0,9 t_{r0}$$

$$t_{r2} \approx 1,1 t_{r0}$$

Eine genaue Simulation der Zustände  $t_{r1}$  und  $t_{r2}$  ist nicht notwendig und praktisch auch nicht möglich. Notwendig ist lediglich, daß sie sich im Verlauf der Messung nicht verändern.

#### Meßvorgang

— Bei der Simulation des ungefähren Zustands  $t_{r1}$  werden zunächst die Diagnose mit dem ursprünglichen Verfahren durchgeführt und der Wert des technischen Zustands  $t_{r1j}$  bestimmt. Daraufhin erfolgt die Messung mit dem neu zu bewertenden Verfahren, und mit Hilfe von Gl.(3) wird der Kennwert des technischen Zustands  $S_{1j}'$  bestimmt. Diese beiden Messungen werden unter verschiedenen Bedingungen mehrmals wiederholt, die den in der Praxis vorkommenden Störungseinflüssen ähneln. Am gleichen Element werden z. B. allmählich die Temperatur der Betriebsflüssigkeit, die Umgebungstemperatur, der Staubgehalt, die Feuchtigkeit u. ä. verändert.

Bei den Größen  $t_{r1j}$  und  $S_{1j}'$  stellt der Index  $j$  die Simulation des technischen Zustands, der Index  $i = 1, 2, \dots, n$  die Simulation der Meßbedingungen dar. Von jeder angegebenen Meßgröße werden also  $n$  konkrete Werte gewonnen, die weiterverarbeitet werden.

— Bei der Simulation des ungefähren Zustands  $t_{r2}$  wird der Vorgang wie beim Zustand  $t_{r1}$  wiederholt. Dabei werden  $n$  Werte der Größen  $t_{r2i}$  und  $S_{2i}'$  gewonnen.

#### 4. Auswertung der Meßwerte

Vorausgesetzt wird, daß zufällige Fehler einer wiederholten Diagnose bei unverändertem Zustand desselben Elements größen- und anzahlmäßig symmetrisch um den Mittelwert verteilt sind. Demnach können mit Hilfe folgender arithmetischer Mittel die Mittelwerte des Systems konkreter Meßgrößen ausgedrückt werden:

$$\bar{t}_{r1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{r1i}$$

$$\bar{t}_{r2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{r2i}$$

$$\bar{S}_{1'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{1i}'$$

$$\bar{S}_{2'} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{2i}'$$

Bei der Auswertung wird weiter vorausgesetzt, daß in einem relativ kleinen Bereich der technischen Zustände  $t_{r1}$  und  $t_{r2}$  bei der Bewertungsmethode die Abhängigkeit der Diagnose

des technischen Zustands  $t_r'$  von der Kennziffer  $S'$  als linear betrachtet werden kann:

$$t_r' = a + b S'; \quad (4)$$

$t_r'$  Diagnosegröße, die mit dem neu zu bewertenden Verfahren mit Hilfe der Kennziffer des technischen Zustands  $S'$  festgelegt wurde

$a, b$  Konstanten:

$$a = \frac{(\bar{t}_{r1} \bar{S}_{2'}) - (\bar{t}_{r2} \bar{S}_{1'})}{\bar{S}_{2'} - \bar{S}_{1'}}$$

$$b = \frac{\bar{t}_{r2} - \bar{t}_{r1}}{\bar{S}_{2'} - \bar{S}_{1'}}$$

Bei jeder einzelnen Messung wird der Diagnosefehler wie folgt quantifiziert:

$$H_{ji} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{rji}' - t_{rji}'; \quad (5)$$

$H_{ji}$  diskreter Wert des absoluten Fehlers der Diagnose, der durch das neu zu bewertende Verfahren bestimmt wurde, in  $h$

$j$  Simulationsindex des technischen Zustands des diagnostizierten Elements

$i$  Simulationsindex zufälliger Störeinflüsse der Messung

$t_{rji}'$  konkrete Diagnosegröße in  $h$ , die mit dem neu zu bewertenden Verfahren bei simuliertem technischen Zustand  $j$  und Störeinfluß der Messung  $i$  bestimmt wurde.

Die einzelnen Diagnosefehler werden bei tatsächlichen technischen Zuständen  $t_{r1}$  und  $t_{r2}$ , die dem Normwert  $t_{r0}$  nahe und um ihn symmetrisch verteilt sind, bestimmt. Man kann voraussetzen, daß die Diagnosefehler des technischen Zustands  $t_{r0}$  die gleiche Häufigkeitsverteilung haben. Auf dieser Grundlage kann aus den Angaben  $H_{ji}$  mit bekannten Methoden die Wahrscheinlichkeitsdichte der absoluten Meßfehler  $f(H)$  ausgedrückt werden. Danach ist es nur noch notwendig, jedem Wert des absoluten Fehlers der Diagnose  $H$ , der mit der Wahrscheinlichkeit  $f(H) dH$  auftritt, die entsprechenden ökonomischen Verluste  $\Delta N$  zuzuordnen, die infolge dieser fehlerhaften Bestimmung des Schädigungsgrenzwerts entstanden sind, und die Integration durchzuführen. Das Prinzip dieses Vorgangs ist im Bild 2 dargestellt. Auf der Grundlage der Gln. (1) und (2) ergeben sich:

$$\Delta N = \epsilon_0 H^2 f(H) dH$$

$$N = \epsilon_0 \int H^2 f(H) dH \quad (6)$$

$$N = \epsilon_0 \sigma^2 \quad (7)$$

$N$  wahrscheinliche ökonomische Verluste, die infolge des Diagnosefehlers entstanden sind, in K€s

$\epsilon$  Koeffizient der ökonomischen Verluste in K€s/h<sup>2</sup> (vgl. Abschn. 2)

$\sigma^2$  Streuung des Zufallsfehlers der Diagnose, bestimmt mit dem neu zu bewertenden Verfahren, in  $h^2$ .

Für die Anwendung der Gl. (7) soll betont werden, daß die Streuung  $\sigma^2$ , gegebenenfalls die Standardabweichung  $\sigma$ , grundsätzlich in Einheiten der relativen Nutzungsdauer, d. h. meistens in  $h$ , und nicht in physikalischen Einheiten des Diagnosegeräts angegeben werden. Deshalb war der o.g. Meßvergleich nötig, der die Umwandlung der Meßgröße  $S'$  in die rela-

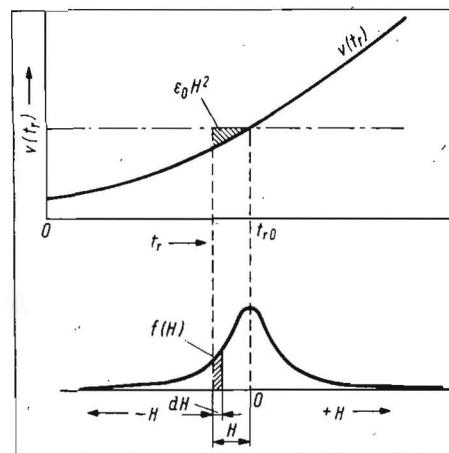


Bild 2. Ökonomische Auswirkungen der Häufigkeitsverteilung der Diagnosefehler

tive Nutzungsdauer  $t_r'$  mit Hilfe der Gl. (4) ermöglicht.

Für den Fall, daß bei unverändertem Diagnoseverfahren nur unterschiedlich genaue Meßgeräte verglichen werden, für die wohl die Standardabweichung  $\sigma_1$  des Meßfehlers der Kennziffer  $S'$ , nicht aber die Standardabweichung des Diagnosefehlers in den Einheiten der relativen Nutzungsdauer  $t_r$  bekannt sind, wird auf der Grundlage von Gl. (4) eine einfache Umrechnung vorgenommen:

$$\sigma = b \sigma_1 \quad (8)$$

Mit Hilfe der Gln. (7) und (8) kann die unmittelbare ökonomische Auswirkung der Genauigkeitsveränderung des Meßgeräts quantifiziert werden, ohne weitere Untersuchungen durchführen zu müssen. Die wahrscheinlichen Verluste  $N$  in Gl. (7) stellen den absoluten Wert der infolge des Zufallsfehlers bei der Bestimmung des optimalen Instandsetzungszeitpunkts entstandenen Verluste dar. Es erweist sich aber als vorteilhaft, diese einmaligen Verluste, die beim Schaden des Elements entstanden sind, als für die gesamte Nutzungsdauer des Elements wirkende Kosten auszudrücken und gemeinsam mit den Kosten für die Anwendung ein geeignetes Kriterium für die Gesamtbeurteilung des gegebenen Diagnoseverfahrens zu bilden:

$$v_k = \frac{N}{t_{r0}} + \frac{N_d}{\tau} \quad (9)$$

$v_k$  komplexe Kosten für die Anwendung des bewerteten Diagnoseverfahrens in K€s/h

$N_d$  Kosten für eine Diagnose in K€s

$\tau$  Intervall zwischen den Diagnosen in  $h$ .

#### 5. Schlußfolgerungen

Die vorgeschlagene Methode zur Bestimmung der komplexen Kosten  $v_k$  für die Anwendung des bewerteten Diagnoseverfahrens beinhaltet die Einflüsse der Verfahrensauswahl und der Meßgenauigkeit, wobei beide getrennt quantifiziert werden können. Die Anwendung ermöglicht die Beurteilung des Diagnoseverfahrens und des Geräts unter Laborbedingungen bei minimaler Forderung nach Angaben aus der Zuverlässigkeitsuntersuchung, um das günstigste Verfahren für die Diagnose des gegebenen Schädigungstyps zu wählen.

Es wird empfohlen, das neu zu bewertende Verfahren stets mit dem Standardverfahren zu vergleichen, das im Betrieb eingeführt ist und dessen komplexe Kosten  $v_k$  bekannt bzw. zu

bestimmen sind. Sofern für den vorgegebenen Schädigungstyp bisher kein Diagnoseverfahren eingeführt worden ist, kann als Standardverfahren die Untersuchung der Nutzungsdauer angesehen werden. Im Rahmen der Zuverlässigkeitsuntersuchung wird in diesem Fall nicht der Schädigungsgrenzwert des technischen Zustands, sondern die Grenznutzungsdauer  $t_0$  und ebenso der entsprechende Koeffizient der ökonomischen Verluste  $\epsilon_0$  festgestellt. Mit derselben Methode wie im Fall der Anwendung der Diagnostik werden die komplexen

Kosten  $v_k$  bestimmt, an denen aber nur die wahrscheinlichen ökonomischen Verluste  $N$  beteiligt sind, die im gegebenen Fall als Folge des Zufallsfehlers der Bestimmung des Instandsetzungszeitpunkts an konkreten Elementen mit Hilfe der Grenznutzungsdauer  $t_0$  bestimmt wurden. Neu zu bewertende Verfahren werden in diesem Fall mit der Möglichkeit verglichen, die Diagnose nicht anzuwenden.

#### Literatur

[1] Pejša, L.: Selection of the Optimum Method of

Technical Diagnostics (Auswahl der optimalen Methode der technischen Diagnostik). Acta IMEKO '79, Moskva 1979.

- [2] Pejša, L.: Möglichkeiten der einheitlichen Klassifizierung des technischen Zustands diagnostizierter Maschinenelemente. Symposium „Technische Diagnostik IMEKO '79“, Praha 1979.
- [3] Havlíček, J., u.a.: Theoretische Analyse der Grundsätze der optimalen Pflege zur Betriebszuverlässigkeit der Maschinen. Landwirtschaftliche Hochschule Prag, Forschungsbericht 1977.

A 3094

## Stand und Entwicklungstendenzen im Diagnosegerätebau für Kraftfahrzeuge der UVR

G. Bansagi/A. Sziladi, Budapest (UVR)

Früher angewendete Methoden zur Überprüfung des technischen Zustands von Kraftfahrzeugen beruhten überwiegend auf subjektiven Bewertungsformen. Die Einführung der Diagnostik brachte deshalb einen großen Fortschritt. Durch die Anwendung moderner Meßtechnik wurde die Grundlage geschaffen, mit objektiven Bewertungsmaßstäben zu arbeiten.

Unter Diagnostik soll hier die Durchführung eines Komplexes von Maßnahmen zur Überprüfung und Regulierung verstanden werden. Neben der Bestimmung des technischen Zustands umfaßt dieser Komplex ebenfalls die Ermittlung der Schadensursache. Das Ziel der Diagnostik ist die demontagelose Bestimmung des Zustands von Baugruppen, Mechanismen und anderen wichtigen Bauteilen sowie die Überprüfung der Arbeitsfähigkeit bestimmter Elemente bei Betriebsbedingungen.

Mit der Entwicklung der technischen Diagnostik ist es möglich, die Instandhaltungsmethoden nach Überprüfung einzuführen.

Auf diese Art und Weise können Verfahren der Überprüfung und Instandhaltung, die die Überprüfung aller Einzelteile beinhalten und zu hohen Ausfallzeiten führen, durch moderne ersetzt werden, die objektiv sind und weniger Arbeitszeit sowie lebendige Arbeit erfordern.

Erste Erfolge und Fortschritte auf dem Gebiet der Diagnose gaben bedeutende Impulse bei der Entwicklung und Produktion neuer Diagnoseverfahren und -geräte.

Die rasche Entwicklung der technischen Diagnostik widerspiegelt sich vor allem in der Entwicklung von Geräten, die aufgrund der Anwendung mikroelektronischer Bauelemente neue Meßmethoden und Vorrichtungen auf noch höherem technischen Niveau ermöglichen. Es entstanden z. B. Geräte, die den Ölwechseltermin in Übereinstimmung mit den Einsatzbedingungen sichern. Zu dieser Gruppe gehört das Gerät ELKON-SD 303 A, das die

Betriebsstunden zählt, die einen Ausdruck für die Auslastung und die Nutzungsdauer darstellen. Die Erhöhung des technischen Niveaus der Arbeitsmittel erfordert gleichzeitig eine Anpassung des Niveaus der Überprüfungsmöglichkeiten.

Kennzeichen dieser Entwicklung ist ein steigender Kompliziertheitsgrad der Systeme und Baugruppen, der eine Vergrößerung der Anzahl und Art der an ihnen auftretenden Defekte und somit eine neue Minderung der Zuverlässigkeit der Maschine zur Folge haben kann. Im Gegensatz zu dieser Entwicklung haben sich die technischen Bedingungen in den Instandsetzungsbetrieben und das Niveau der Pflege und Wartung in den Einsatzbetrieben nicht entsprechend entwickelt.

Werden zur Überprüfung bzw. Fehlersuche keine Diagnosegeräte eingesetzt, sondern eine Fehlersuche durchgeführt, die nur auf subjek-

tiven Entscheidungen basiert, so kann das zu unnötigen Demontagen und zur Vergrößerung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens neuer Defekte führen.

Die Diagnosedurchführung an den Arbeitsmitteln wird derzeit u. a. noch durch folgende Probleme erschwert:

- An den Maschinen sind keine Anschlussmöglichkeiten für Diagnosegeräte vorhanden (Probleme der diagnosegerechten Konstruktion).
- Die Meßgeber sind universell einsetzbar, die Meßeinrichtungen müssen dem jeweiligen Maschinentyp angepaßt werden.
- Wegen fehlender Ausgangswerte können die Hersteller der Diagnosegeräte keine auf den Maschinentyp bezogenen Kennwerte des Diagnoseparameters liefern.
- Für den konkreten Anwendungsfall existieren keine Diagnosetechnologien.

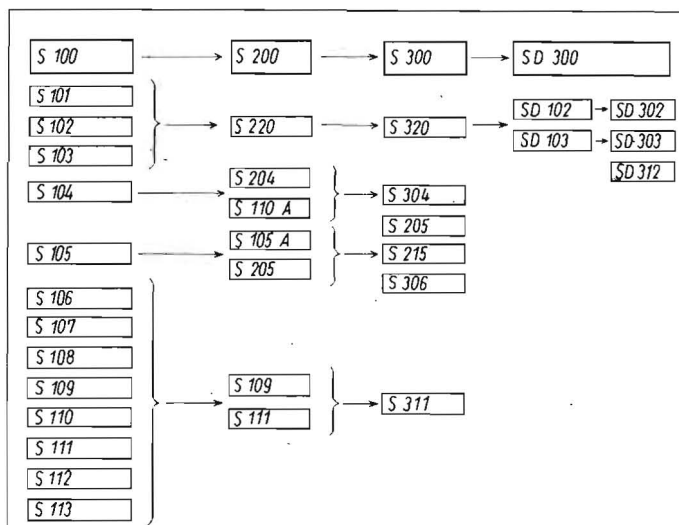


Bild 1  
Übersicht über die Diagnosegerätegenerationen