

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM  
KARLSRUHE**

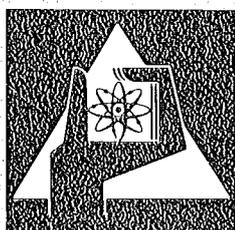
Mai 1976

KFK 2243

Laboratorium für Isotopentechnik

**Wirtschaftlich-technische Analyse des Einsatzes der  
Radionuklidtechnik (Verfahren zur Messung des  
Verschleißes von Bauteilen in der Motorenentwicklung  
mit Hilfe von Radioisotopen)**

F. G. Emrich



**GESELLSCHAFT  
FÜR  
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

**KARLSRUHE**

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.  
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 2243

Laboratorium für Isotopentechnik

Wirtschaftlich - technische Analyse  
des Einsatzes der Radionuklidtechnik  
(Verfahren zur Messung des Verschleißes  
von Bauteilen in der Motorenentwicklung mit  
Hilfe von Radioisotopen)<sup>+</sup>

von

Frank G. Emrich

Gesellschaft für Kernforschung mbH., Karlsruhe

<sup>+</sup> von der Fakultät für Maschinenbau der Uni-  
versität Karlsruhe genehmigte Dissertation



## Z U S A M M E N F A S S U N G

Die dynamisch belasteten Bauteile von Verbrennungsmotoren verschleifen im Betrieb in Abhängigkeit von den gefahrenen Betriebspunkten und Betriebsparametern.

Meßmethoden der RNT, in der Bundesrepublik im eigenen Labor vom LIT der GfK entwickelt, gestatten es, Verschleiß von Maschinenbauteilen während des Betriebs zu erfassen, im Gegensatz zu konv. Längenmeßverfahren.

In dieser Arbeit werden im ersten Teil die vorhandenen Verschleißprobleme analysiert und untersucht, was die konv. und RNT-Meßverfahren leisten können.

Darauf aufbauend ist ein Nutzwertanalysesystem entwickelt worden zur techn.-wirtschaftl. Bewertung des Einsatzes verschiedener Meßverfahren zur Lösung detaillierter Verschleißprobleme. Dieses System liefert Ergebnisse über das jeweils optimale Verschleißmeßverfahren bezüglich konkreter Problemstellungen mit den jeweiligen technischen und wirtschaftlichen Randbedingungen.

## ABSTRACT

### Economic and Technical Assay of the Application of Radionuclide Technology

(Wear Measurement Method for Units in Motor Development Using Radioisotopes)

The dynamically loaded components of combustion engines undergo wear during operation as a function of the operating points and the operating parameters selected.

Radionuclide measurement methods developed in the Federal Republic of Germany in the LIT laboratory of Gesellschaft für Kernforschung allow to determine the wear of machine components during operation, contrary to conventional length measurement techniques. In the first part of this work the existing wear problems will be analyzed and investigations will be made into the capacities of conventional and radionuclide measurement methods. Based on this, a cost-benefit analysis system was developed for evaluation under technical and economical aspects of the use of different measurement methods allowing to solve detailed wear problems. This system furnishes results on the respective optimum wear measurement method relating to the actual problem and taking into account the relevant technical and economical boundary conditions.

# I N H A L T S V E R Z E I C H N I S

	Seite
1. EINLEITUNG	1
1.1 Problemstellung und Gesamtzielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2. VERSCHLEISSPROBLEME	5
2.1 Abgrenzung der Bereiche der Motorenentwicklung sowie deren Aufgabenstellungen	5
2.2 Typische Abläufe von Motor- und Bauteilentwicklungen	6
2.3 Verschleißgefährdete Bauteile und Bauteilgruppen	10
2.3.1 Hubkolbenmotor	10
2.3.2 Rotationskolbenmotor	10
2.4 Einflußgrößen für den Verschleiß, Verschleißarten und Meßgrößen für den Verschleißbetrag	11
2.4.1 Einflußgrößen	11
2.4.2 Typische Verschleißwerte	12
2.4.3 Meßgrößen für den Verschleißbetrag	13
2.5 Lösungsmöglichkeiten von Verschleißproblemen	17
2.5.1 Entwicklung von Prüfprogrammen für Motoren	17
2.5.2 Richtlinien zur Bauteilfreigabe für die Produktion	20
3. VERSCHLEISSMESSVERFAHREN	24
3.1 Klassifikation der Meßverfahren	24
3.2 Prinzipielle Beschreibung der Radionuklidtechnikmeßverfahren	26
3.2.1 Entwicklung der Radionuklidtechnik	26
3.2.2 Dünnschichtaktivierung	27
3.2.3 Meßmethoden	30

	Seite
3.2.3.1 Durchflußverfahren	30
3.2.3.2 Dünnschichtdifferenzverfahren	31
3.3 Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen und Radionuklidtechnik-Verschleißmeßverfahren	33
3.3.1 Zeitlicher und organisatorischer Ablauf	33
3.3.2 Technische Leistungsfähigkeit der Meß- verfahren	36
3.3.3 Beschreibung des Einsatzes der unter- suchten Verschleißmeßverfahren	42
3.3.3.1 Kostenaufwand	42
3.3.3.2 Beispielhafte Anwendungsmög- lichkeiten der betrachteten Verschleißmeßverfahren (Kosten- und Zeitbetrachtungen	47
3.3.4 Zusammengefaßte Ergebnisse	52
 4. ENTWICKLUNG EINES SYSTEMS ZUR TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN BEWERTUNG VON VERSCHLEISS- MESSVERFAHREN NACH DER KONVENTIONELLEN METHODE UND DER RADIONUKLIDTECHNIK	 54
4.1 Allgemeine Aussagen zur Wissenschafts- methodik	54
4.1.1 Zum ökonomischen- und Optimierungs- Prinzip	54
4.1.2 Qualität und Quantität	56
4.1.3 Methodische Entscheidungsstufen zur Auswahl der besten Alternative	58
4.1.3.1 Sogenannte "einfache Ent- scheidungsmöglichkeiten"	58
4.1.3.2 Punktbewertungsverfahren	60
4.1.3.3 Methodik der Nutzwertanalyse	61
4.2 Detaillierte Zielformulierung	64
4.3 Allgemeiner Aufbau des Bewertungssystems	65
4.4 Stufen des Systems	68

	Seite
4.4.1 "Checkliste" zur technischen Durchführbarkeit von Verschleißproblemen mit RNT	68
4.4.2 Rechenprogramm I zur Auswertung der Checkliste	69
4.4.3 Nutzwertanalyzesystem	76
4.4.3.1 Entwurf eines Nutzwertanalyzesystems	76
4.4.3.2 Expertenumfrage zu Nutzwertanalyzesystementwurf	80
4.4.3.3 Ergebnisse der Umfrage und daraus Erstellung des Nutzwertanalyzesystems	82
4.5 Modifiziertes System in einer Entscheidungshierarchie	92
4.5.1 Problemanalyse	93
4.5.2 Zielbeschreibung	94
4.5.3 Alternativenentwicklung	94
4.5.4 Alternativenbewertung	95
4.5.5 Alternativenauswahl	97
4.5.6 Aufsummiering der günstigen Fälle für die Radionuklidtechnik	98
4.5.7 Investitionsrechnung	98
5. PRAKTISCHE ERPROBUNG DES ERSTELLTEN SYSTEMS	101
5.1 Feld der Verschleißprobleme und Randbedingungen	101
5.2 Test des Systems mit einem typischen Verschleißproblem	102
5.3 Zusätzliche Tests mit praktischen Beispielen	107
5.3.1 Kritische Betriebspunkte für Bauteile	107
5.3.2 Kritische Betriebsparameter für Bauteile	110
5.3.3 Optimierung der Werkstoffe für Bauteile (bei bekannten kritischen Betriebsgrößen)	113

	Seite
5.4 Empfindlichkeitsanalysen des Systems durch Veränderung der Kriterien-Gewichtungen für vorherige Beispiele	116
5.5 Günstige Probleme für die Radionuklidtechnik	125
5.6 Beispiel einer Investitionsrechnung	127
5.7 Beispiel eines Verfahrensvergleichs	129
6. MARKTPROGNOSE FÜR RNT-VERSCHLEISSMESSVERFAHREN	131
6.1 Meßsystembezogene Faktoren	131
6.1.1 Ausreifegrad der Meßsysteme	131
6.1.2 Wirtschaftliche Faktoren	133
6.1.3 Abhängigkeiten bei der Anwendung des Meßsystems	135
6.2 Äußere Einflüsse auf die Marktentwicklung	138
7. ZUSAMMENFASSUNG	142
8. LITERATURVERZEICHNIS	144
9. ANHANG	148
I - V	

## 1. E I N L E I T U N G

### 1.1 Problemstellung und Gesamtzielsetzung

Kenntnisse des Verschleißverhaltens von Motorbauteilen bei bestimmten Betriebspunkten bzw. Betriebsparametern sind, ähnlich wie Festigkeitswerte, wesentliche Faktoren zur betriebs-sicheren Auslegung für eine geforderte Gesamtlebensdauer eines jeweiligen Motors.

Der Verschleiß - ein Materialabtrag an gleitenden Flächen von Bauteilen während des Betriebs, der sich je nach Bauteil sowie Art und Beanspruchung in den Größenordnungen von Null bis einigen Mikrometer pro Stunde bewegt - muß mit geeigneten Meßverfahren ermittelt werden. In der Industrie gelangen heute überwiegend Längenmeßverfahren zur Anwendung. Der Verschleiß wird dabei als Differenz von zwei Messungen ermittelt, vor Einbau und nach Betrieb des Bauteils. Im folgenden werden solche Längenmeßverfahren als "konventionelle Verfahren" bezeichnet. Diese Methoden liefern Meßergebnisse mit Genauigkeiten in der Größenordnung von einem Mikrometer. Um die Verfahren überhaupt anwenden zu können, muß am Bauteil ein Materialabtrag erzeugt werden, der einige Mikrometer beträgt. Verschiedene Messungen sind im allgemeinen nur durch Demontagen und Montagen während des Betriebs möglich und sind deshalb mit einem erheblichen Kosten- und Zeitaufwand für Motorlaufstunden verbunden. Außerdem sind die Ergebnisse, die mit konventionellen Meßverfahren gewonnen werden, in ihrer Aussage unvollständig und unsicher zur Lösung von Verschleißproblemen.

Als Alternativen zu den konventionellen Meßverfahren stehen einige andere Methoden zur Verfügung (sie werden in Kap. 3.1 näher genannt). In immer stärkerem Maße qualifizieren sich die Verfahren der Radionuklidtechnik (RNT) zur Messung des Verschleißes [1,2]. Es ist in den letzten Jahren gelungen, die RNT soweit zu entwickeln, daß ihr routinemäßiger Einsatz in der Industrie möglich erscheint.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einsatz dieser Verfahren vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt, insbesondere

im Vergleich mit den konventionellen Verschleißmeßverfahren zu analysieren. Insbesondere sind in dieser Analyse die Abhängigkeiten und Risiken bei Anwendung der RNT zu zeigen.

Der Industrie soll gezeigt werden, für welche häufig auftretenden Problemstellungen sich die RNT-Meßverfahren technisch besonders eignen und unter welchen Bedingungen sie rentabel sind. Den staatlich getragenen Forschungsarbeiten sowie der Industrie sollen mit diesen Informationen Entscheidungsvorbereitungen und damit Hilfen zur Entscheidungsfindung gegeben werden.

Als weiteres Ergebnis dieser Arbeit soll gezeigt werden, wo in Zukunft die Schwerpunkte für die Weiterentwicklung von RNT-Meßverfahren für den Verbrennungsmotorenbereich liegen und wo es sich anbietet, gezielte Entwicklung von vollständigen und einfachen Meßsystemen zu betreiben. Dies gilt in gleichem Maße für die Industrie.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in die Hauptabschnitte I - V gegliedert. Die Teile I und II beinhalten eine Zustandsanalyse, die aus Daten und Informationen der Literatur, Forschung und Industrie erarbeitet wurde. - Etliche Daten wurden freundlicherweise von den Firmen Daimler-Benz, Klöckner-Humboldt-Deutz, Maschinenfabriken Augsburg-Nürnberg, Mannheimer Motoren-Werke, Opel und Volkswagen-Werk zur Verfügung gestellt. Diese Firmen sind repräsentativ für die unterschiedlichsten Motorgrößen und Konstruktionsprinzipien. - Aufbauend auf dieser Zustandsanalyse wird in Abschnitt III ein Konzept eines Auswahl- und Bewertungssystems für Alternativen von Verschleißmeßverfahren entworfen und analysiert. Im IV. Abschnitt wird der Test des entwickelten Systems dargestellt und die praktischen Erfahrungen ausgewertet. Der V. Teil enthält im wesentlichen eine Marktprognose für die RNT.

## I. Analyse der Verschleißprobleme

Es wird auf typische Beispiele für den Ablauf von Motor- bzw. Bauteilentwicklungen eingegangen.

Die in der Praxis auftretenden Verschleißprobleme werden analysiert. Bauteile und Bauteilgruppen wo wesentlicher Verschleiß auftritt, sowie die Einflußparameter auf den Verschleiß (z.B. Betriebspunkte, Werkstoffe, Bauformen etc.) werden in diese Analyse einbezogen.

Außerdem werden praktische Lösungswege beschrieben, wie sie in der Industrie, zur Beherrschung der Verschleißprobleme, beschrritten werden.

## II. Verschleißmeßverfahren

Aus einer Klassifikation der Verfahren erfolgt eine Begründung der Beschränkung auf konventionelle Verfahren und Methoden der Radionuklidtechnik zur Messung des Verschleißes. Die Verfahren werden prinzipiell beschrieben, sowie allgemein die Möglichkeiten und Grenzen der Verfahren aufgezeigt, bezüglich:

- technischer Leistungsfähigkeit
- zeitlichem und organisatorischem Ablauf
- Kosten

Im Detail wird auf die Entwicklung von Motorprüfprogrammen zur Optimierung der konventionellen Verfahren, sowie auf typische Beispiele zur Anwendung der Verfahren der RNT eingegangen.

## III. Entwicklung eines Systems zur technischen und wirtschaftlichen Bewertung der Verschleißmeßverfahren

Es wurde ein System entwickelt, das es gestattet, konventionelle- und RNT-Verschleißmeßverfahren vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt aus zu bewerten.

Das System ist stufenförmig aufgebaut und arbeitet nach dem Aussiebungsprinzip.

Zuerst werden Verschleißprobleme daraufhin untersucht, inwieweit sie technisch mit RNT-Verschleißmeßverfahren zu lösen sind. Die technisch möglichen RNT-Meßverfahren für eine bestimmte Problemstellung sowie die konventionelle(n) Alternative(n) gehen in ein erstes Nutzwertanalysesystem ein. Dort werden über ein Kriterienpaket die technischen Leistungsfähigkeiten, Durchführungszeiten und Kosten der einzelnen Alternativen kardinal bewertet und die Kriterien untereinander gewichtet. Die einzelnen Punktzahlen werden nach einer "Wertsynthese-Regel" zu Nutzenkennziffern zusammengefaßt.

#### IV. Test des entwickelten Systems an ausgewählten praktischen Problemstellungen

Anhand von Problemen der Praxis wird das System getestet und modifiziert. Das System sondert für die speziellen Problemstellungen das jeweils optimale Meßverfahren aus. Günstige Einzelfälle für die Radionuklidtechnik werden dadurch ermittelt und in Gruppen klassifiziert.

#### V. Marktprognose für die Verfahren der Radionuklidtechnik

Aus der Anzahl der "günstigen Fälle" für die RNT läßt sich der Auslastungsgrad einer Anlage und daraus über eine Investitionsrechnung der Kapitalrückfluß bestimmen.

Mit Hilfe einer zweiten Nutzwertanalyse auf Unternehmensentscheidungssebene werden zusätzlich die Risiken in Betracht gezogen.

Mit den gewonnenen Aussagen und einer Prognose für den Verbrennungsmotorenbau wird versucht, die zukünftige Entwicklung der Verschleißmeßverfahren der Radionuklidtechnik aufzuzeigen (mit Restriktionen wie z.B. Abfallbeseitigung, Be-

strahlungskapazität, Risiko für Personaleinsatz).

## 2. V E R S C H L E I S S P R O B L E M E

### 2.1 Abgrenzung der Bereiche der Motorenentwicklung sowie deren Aufgabenstellungen [3]

Prinzipiell pflegt man in der Industrie im Entwicklungsbereich von einer 3-er Teilung zu sprechen, und zwar von Neu-, Weiter- und Serienentwicklung.

Vollkommene Neuentwicklungen von Motoren dauern in der Regel einige Jahre (2-4). Es wird versucht, eine Motorengeneration möglichst lange zu produzieren, nicht zuletzt wegen der hohen Investitionskosten. Im größeren Rahmen arbeiten Entwicklungsfachleute an Serien- und Weiterentwicklungen von Motoren.

Die Arbeiten dieser beiden Bereiche lassen sich wie folgt aufteilen in:

- a) Sofortmaßnahmen bei plötzlichem gehäuften Auftreten von Beanstandungen und Schäden aus dem Kundenkreis.
- b) Kontinuierliche Verbesserung und Optimierung von Bauteilen bezüglich
  - Betriebssicherheit
  - Wirtschaftlichkeit
- c) Typen-Weiterentwicklung unter den Gesichtspunkten
  - Leistungserhöhung
  - Wirkungsgradverbesserung

- d) Lösungen von Auflagen wie sie die Gesetzgeber in immer schärferer Form auferlegen, z.B. auf dem Abgas- und Geräuschsektor, aber auch in Zukunft bezüglich der Lebensdauer (Langzeitprodukt) sowie der "Recycling-Freundlichkeit".
- e) Lösungen von Auflagen von Kunden (Privatpersonen, Militär, Städte, Länder, Bund, Export).

Serien- und Weiterentwicklung lassen sich nicht exakt gegeneinander abgrenzen. Die Erfahrungen, die gewonnen werden, ergänzen sich. Die Serienentwicklung beschränkt sich auf die oben angeführten Punkte a, b, d und c der in Serie produzierten Typen, während die Weiterentwicklung diese Erfahrungen für Typen in nachfolgenden Serien verwendet.

## 2.2 Typische Abläufe von Motor- und Bauteilentwicklungen [3]

Es soll veranschaulicht werden, in welchen Phasen des Entwicklungsprozesses von Motoren

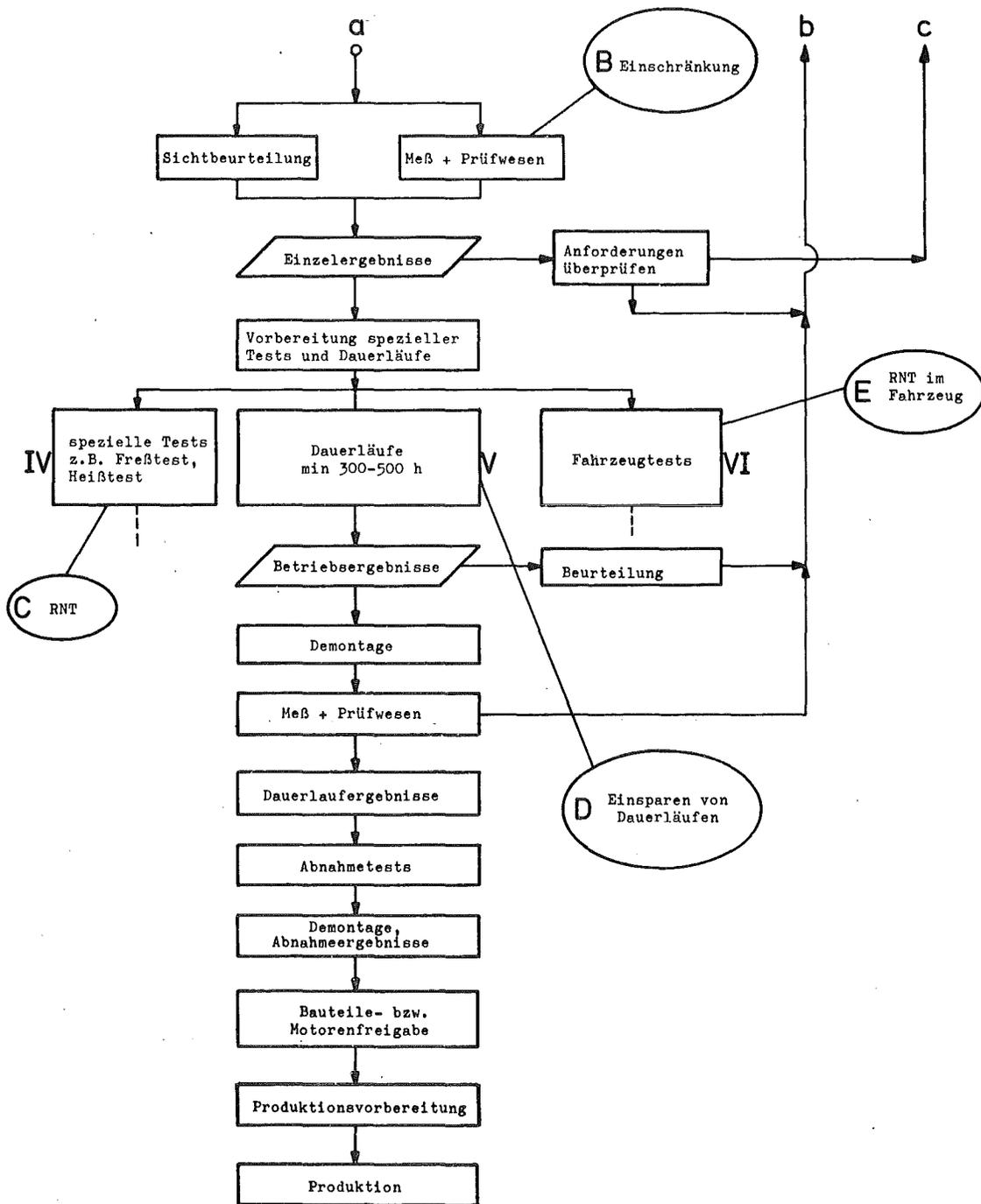
- Verschleißprobleme auftreten können
  - die RNT schon eingesetzt wird bzw. eingesetzt werden könnte,
- und wie sich die Abläufe von Motorentwicklungen von der Motorgröße und -leistung abhängig unterscheiden. Hierzu dient die Abb.1, die als Flußdiagramm dargestellt ist.

Abb.1 zeigt beispielhaft in groben Zügen den Ablauf einer Motorenentwicklung von der Managemententscheidung ausgehend, bis hin zur Produktionsfreigabe. Während dieses Ablaufs, der sich in der Regel über einen Zeitraum von 2-4 Jahren hinzieht, sind die Abschnitte hervorgehoben, wo insbesondere Verschleißuntersuchungen gemacht werden.

Dies betrifft die Punkte I "Bauteilprüfstand" (in erster Linie Ventiltrieb), II "kurze Probeläufe" (20-40 h), III "mittellange Probeläufe" (ca. 100-200 h), IV "Dauerläufe" (300-1000 h) und V "spezielle Testläufe" (wie Heiß-, Kalt-, Freßtest etc.) sowie VI "Fahrzeugtests".

Notwendig für die Gesamtentwicklung sind kurze Probeläufe zur Sichtbeurteilung von Bauteilen, spezielle Tests für Extrem-





Noch Abbildung 1



Im folgenden wird auf die Bauteile und Bauteilgruppen eingegangen, an denen wesentlicher, d.h. die Lebensdauer des Motors begrenzender Verschleiß, auftritt.

### 2.3 Verschleißgefährdete Bauteile und Bauteilgruppen

Die Betrachtungen in diesem Kapitel beziehen sich hauptsächlich auf Hubkolbenmotoren. Der Rotationskolbenmotor wird nur kurz gestreift.

#### 2.3.1 Hubkolbenmotor

Für den Hubkolbenmotor läßt sich eine Aufteilung der Verschleißprobleme in 3 Bauteilgruppen vornehmen, und zwar:

- A: Kurbelwellen - Lager
- B: Kolben, Ringe, Laufbüchse
- C: Ventiltrieb.

Nach Aussagen der Experten in der Motorenentwicklung läßt sich mit guter Genauigkeit das Verhältnis der Häufigkeit der Verschleißprobleme während der Entwicklung für die 3 Bauteilgruppen folgendermaßen angeben:

$$A : B : C = 1 : 4 : 1 \quad [3]$$

#### 2.3.2 Rotationskolbenmotor

Die verschleißgefährdeten Bauteile des Rotationskolbenmotors sind hauptsächlich Trochoidè und Dichtleiste.

Verschleißprobleme ergeben sich aus zweierlei Zielsetzungen:

1. Der Rotationskolbenmotor ist betriebssicher zu entwickeln, wobei als Maßstab für Leistung, Lebensdauer und Wirtschaftlichkeit der Hubkolbenmotor dient.
2. In Konkurrenz zum Hubkolbenmotor sollte der Rotationskolbenmotor billiger werden bzgl.:
  - a) Materialien
  - b) Fertigungstechnik.

## 2.4 Einflußgrößen für den Verschleiß, Arten des Verschleißes, Meßgrößen

Es werden am Beispiel des hochbeanspruchten Bauteils Kolbenring die Einflußgrößen für den Verschleiß beschrieben und exemplarisch Größenordnungen angegeben.

Eingehend auf die bestehenden DIN-Normen werden die Begriffe im Zusammenhang mit dem Verschleiß und die üblichen Meßgrößen dargestellt.

### 2.4.1 Einflußgrößen

Einflußgrößen für den Verschleiß ergeben sich aus:

- a) Konstruktion
- b) Fertigung
- c) Betrieb.

Am Beispiel von Kolbenring, Kolben und Zylinderlaufbüchse werden die Einflußgrößen für den Verschleiß detaillierter dargestellt:

#### a) Konstruktion

- Auslegung von Ring, Kolben, Kolbenbestückung, Zylinderlaufbahn
- Auslegung von Block, Zylinderkopf und Verbindungselementen
- Auslegung des Kühlsystems, der Schmierstoffversorgung sowie des Verbrennungsverfahrens
- Werkstoffwahl
- Bewegungsgeometrie

#### b) Fertigung

- Herstellungsverfahren (z.B. Gießverfahren) von Ring, Kolben und Zylinderlaufbüchse
- Oberflächenbearbeitung (z.B. Schleifen) von Ring, Kolben und Zylinderlaufbahn
- (- Oberflächenbehandlung)

c) Betrieb

- Verbrennungsdruckverlauf und -Höhe
- Kolbengeschwindigkeit
- Temperaturverteilungen von Ring, Kolben und Zylinderlaufbahn
- Schmierstoff, Abhängigkeit von
  - Art
  - Beanspruchungszustand des Schmierstoffs
  - Festteilcheneintrag in Schmierstoff
- Einlaufzustand
- Verschleißzustand, Abweichungen von Standardeinbaumaßen durch Verschleiß und Verformung.

2.4.2 Typische Verschleißwerte

a) Kolbenring

Verschleißwerte am 1. Kolbenring werden an Laufflächen und Ringflanken gemessen. Für PKW-Dieselmotoren treten für Ringe etwa gleicher Abmessungen folgende Verschleißwerte bei Nennleistung auf: [3,4]

Lauffläche: 100 - 300  $\mu\text{g/h}$   
= 0,03-0,1  $\mu\text{m/h}$

Ringflanken: 50 - 150  $\mu\text{g/h}$   
= 0,01-0,03  $\mu\text{m/h}$

b) Zylinderlaufbüchse

Die Verschleißwerte für Zylinderlaufbüchsen, gemessen im Gebiet des oberen Totpunktes, in dem der Maximalverschleiß auftritt, liegen im Bereich von einigen  $\mu\text{m}$  pro 1000 Laufstunden. Hierzu Abb.2 [3]. Für Dieselmotoren von 60-165 PS Leistung wurde jeweils ca. alle 500 Betriebsstunden der Gesamtverschleiß gemessen.

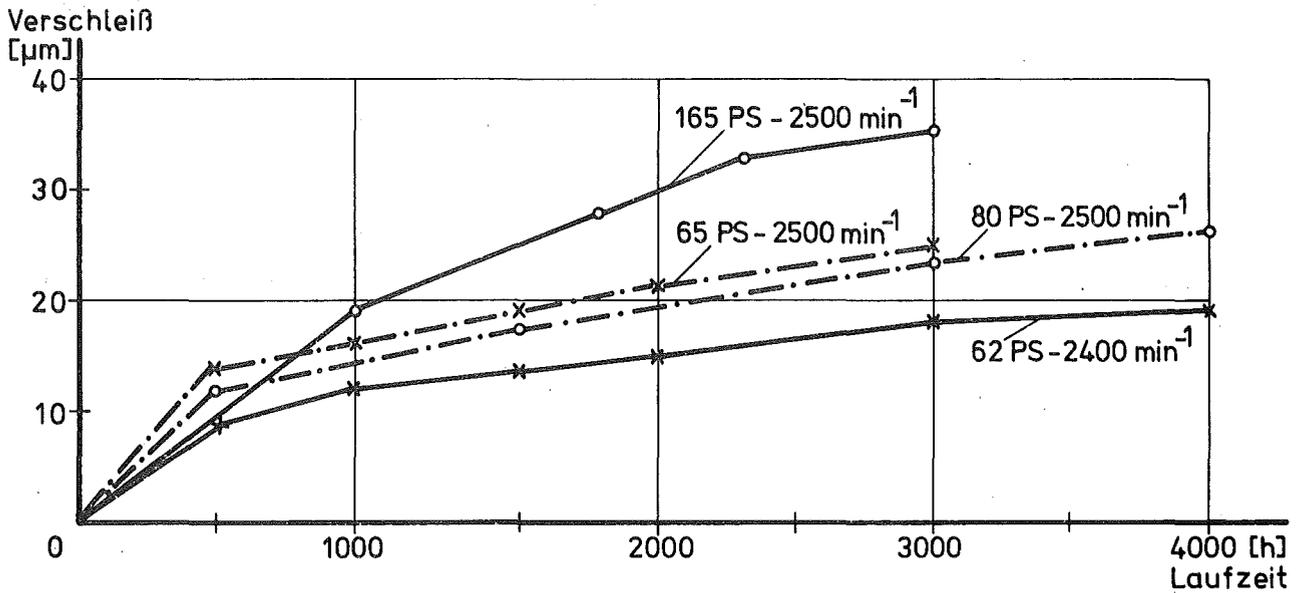


Abb.2: Zylinderverschleiß verschiedener Dieselmotoren [3]

#### 2.4.3 Meßgrößen für den Verschleißbetrag [5,6]

In DIN 50321 [6] werden die Meßgrößen für Verschleißmessungen definiert. Die jeweils geeigneten Meßgrößen für Verschleißmessungen richten sich nach den Meßverfahren selbst, dem räumlichen Verlauf des Verschleißbetrages (Verschleißverteilung) über der Oberfläche, der Konstanz der Versuchsbedingungen, der Zeitdauer des Verschleißvorganges und dem Ziel der Untersuchung.

Es wird in Meßgrößen unterschieden, und zwar in

- direkte

und

- indirekte Meßgrößen.

Die direkten Meßgrößen sind solche Größen, die auf der Differenz entsprechender Gestaltmaße oder Gewichte eines verschleißenden Körpers je vor und nach einem Verschleißvorgang beruhen [6].

Die indirekten Meßgrößen sind nach DIN [6], Verschleiß- und Gesamtlebensdauer.

Die beiden folgenden Abbildungen sind Auszüge aus DIN 50321 [6].

In Abb.3 nach DIN [6] wird eine Übersicht der verschiedenen Meßgrößen für den Verschleißbetrag gegeben. Für die Motorenentwicklung sind die folgenden Werte interessant.

- a) Linearer absoluter Verschleißbetrag, auch Gesamtverschleiß genannt:  $l \text{ } \mu\text{m}$
- b) lineare Verschleißgeschwindigkeit = Verschleißrate  $v_t \text{ } \mu\text{m/h}$
- c) speziell bezogener linearer Verschleißbetrag z.B.  $v_s \text{ } \mu\text{m/km}$
- d) gewichtsmäßige Verschleißgeschwindigkeit  $G_f \text{ } \begin{matrix} \text{mg/h} \\ \mu\text{g} \end{matrix}$

Inwieweit die verschiedenen Verschleißmeßverfahren in der Lage sind, diese Meßgrößen zu erfassen und mit welcher Genauigkeit, wird in Kapitel 3. Meßverfahren erläutert. In der folgenden Abb.4 [6] nach DIN werden die möglichen Kombinationen von Verschleißfällen und Meßgrößen dargestellt. Diese Darstellung bezieht sich auf konventionelle Meßverfahren.

Abb.3: Meßgrößen für den Verschleißbetrag (Auszug aus DIN 50321 [6])

Meßgrößen-Gruppen	Einzelmeßgrößen				
	Benennung	Zeichen	Einheit		
<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Meßgrößen für den Verschleißbetrag</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Direkte Meßgrößen</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; margin-bottom: 2px;">Indirekte M.</div> </div>	Lineare Meßgr.	Absolute Meßgr.	Linearer absoluter Verschleißbetrag	$\Delta l$	$\mu\text{m}$ mm
		Bezogene Meßgrößen	Lineare Verschleißgeschwindigkeit	$v_t$	$\mu\text{m/h}$   $\text{mm/h}$
			Spezieller bezogener linearer Verschleißbetrag	$v_s$	$\mu\text{m/km}$ $\text{mm/kg}$
	Lineares Verschleißbetrags-Verhältnis		$w_{\Delta l}$ $w_{v_t}$ $w_{v_s}$	1 = 100%	
	Volumetrische M.	Absolute Meßgr.	Volumetrischer absoluter Verschleißbetrag	$\Delta V$	$\text{mm}^3$ $\text{cm}^3$
		Bezogene Meßgrößen	Volumetrische Verschleißgeschwindigk.	$v_t$	$\frac{\text{mm}^3}{\text{h}}$ $\frac{\text{cm}^3}{\text{h}}$
			Spezieller bezogener volumetrischer Verschleißbetrag	$v_s$	$\frac{\text{mm}^3}{\text{km}}$ $\frac{\text{cm}^3}{\text{kg}}$
	Volumetrisches Verschleißbetrags-Verhältnis		$w_{\Delta V}$ $w_{v_t}$ $w_{v_s}$	1 = 100%	
	Gewichtsmäßige M.	Absolute Meßgr.	Gewichtsmäßiger absoluter Verschleißbetrag	$\Delta G$	mg g
		Bezogene Meßgrößen	Gewichtsmäßige Verschleißgeschwindigkeit	$G_t$	$\text{mg/h}$ $\text{g/h}$
			Spezieller bezogener gewichtsmäßiger Verschleißbetrag	$G_s$	$\text{mg/km}$ $\text{g/km}$
	Gewichtsmäßiges Verschleißbetrags-Verhältnis		$w_{\Delta G}$ $w_{G_t}$ $w_{G_s}$	1 = 100%	
Indirekte M.		Verschleiß-Lebensdauer	$T_V$	h	
		Gesamt-Lebensdauer	$T_G$	h	
		Verschleiß-Durchsatzmenge	D	$t, \text{m}^3$ Stückzahl	
		Sonstige indirekte Meßgrößen			



## 2.5 Lösungsmöglichkeiten von Verschleißproblemen

### 2.5.1 Entwicklung von Prüfprogrammen für Motoren [3]

Wie bereits an anderer Stelle erläutert wurde, ist der Verschleiß von Motorbauteilen von einer Vielfalt von Einflußgrößen abhängig. Ziel jeder Entwicklung ist es, den Motor für die vom Kunden geforderte (und auch erwartete) Lebensdauer auszuliegen und betriebssicher zu machen. Die unter den verschiedenen individuellen Betriebsarten auftretenden Einflußparameter sind nur unter Praxisbedingungen (d.h., z.B. beim Fahrzeugmotor im Fahrttest) wirklichkeitsnah und vollständig zu erfassen. Diese Aufgabe ist schon allein vom zeitlichen Aufwand her nur schwer zu bewältigen. Man versucht weitgehend die Motorerprobung auf den Prüfstand zu verlegen. Der Prüfstand ist jedoch nur ein Simulator für die Praxisbedingungen. Um relativ sichere praxisbezogene Bedingungen zu erzeugen, werden die kritischen Betriebspunkte, soweit sie bisher bekannt sind, auf dem Prüfstand gefahren.

Die Entwicklung der Prüfprogramme geht auf Nennleistungsversuche zurück. (Nenn Drehzahl, Vollast, bis zum Ausfall des Motors). Aus der Vorstellung, daß der größte Verschleiß in diesem Betriebspunkt auftritt, wird diese Bedingung von vielen Firmen als Abnahmetest auch heute noch verlangt (500-1000 h bei PKW-Motoren). Neuere Erkenntnisse (auch als Folge der Verkehrsbedingungen) ergaben, daß z.B. im sogenannten Kalt-Warm-Betrieb (Kurzstreckenfahrten wie z.B. Taxibetrieb, Arztwagen) weitaus höhere Verschleißwerte als bei Nennleistung auftreten, die bei überwiegendem Betrieb in diesem Bereich zu vorzeitigem Ausfall von Motoren führen können. Aus diesen und anderen Erfahrungen entwickelte man aus einem 1-Punkt-Test sogenannte n-Punkte-Tests (bis ca.  $n = 10$  Betriebspunkte), die in Intervallen (30-240 min Intervalllänge) über eine Gesamtdauer von einigen hundert Stunden gefahren werden. Man gewährleistet durch diese Art von Tests eine bessere Simulation der Praxis und damit eine Verbesserung der Prüfbedingungen. Die Abb. 5 zeigt beispielhaft für n-Punkte-Tests den sogenannten "Europatest" [3].

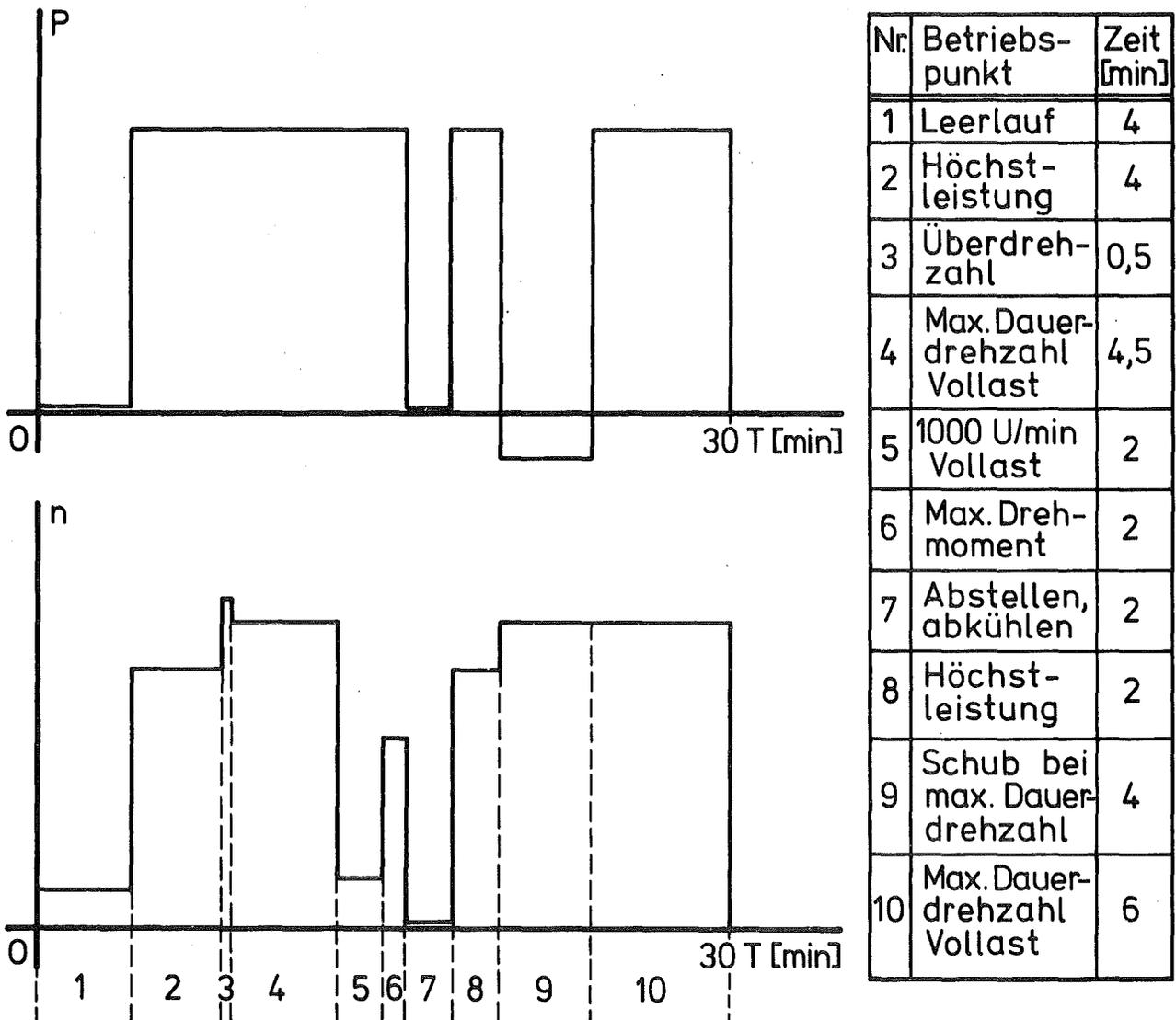


Abb. 5: 10-Punkte-Motortest [3]

Ein weiteres Beispiel zeigt Abb. 6 ("OM-615-Test") [7]. In diesem Test wird der auftretende Verschleiß als Beurteilungskriterium für die verwendeten Öle herangezogen.

Testabschnitt	Testdauer h	Laufstrecke km
Einlaufprogramm: Erstbetriebsöl bzw. Prüföl	11	1500
Kalt-Warm-Test , Teil 1 : 960 Zyklen mit je 2,25 min , Vollast ; 1,5 min Stillstand, Intensivkühlung 38 °C , Ölsumpftemperatur 110 °C , Kühlwasseraustritt 90 °C	60	5000
Kalt-Warm-Test , Teil 2 : 960 Zyklen wie oben	60	5000
Mittlerer Drehzahltest : red. Drehzahl 3250 U/min , Vollast , Ölsumpftemperatur 100 °C , Kühlwasseraustritt 90 °C	50	5000
Heißtest : 4500 U/min , Vollast , Ölsumpftemperatur 130 °C , Kühlwasseraustritt 90 °C	36	5000
insgesamt	217	21500

Abb.6: OM 615-Test zur Ölbeurteilung [7]

Die Problematik der verschiedenen Tests läßt sich folgendermaßen charakterisieren:

1-Punkt-Tests erlauben Aussagen über das Verschleißverhalten von Bauteilen bei einem konstanten Betriebspunkt und konstanten Betriebsparametern. Problematisch ist die Einhaltung der Konstanz der Betriebsbedingungen, was nicht zuletzt in die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse eingeht.

n-Punkte-Tests liefern Aussagen über Verschleißverhalten als Mittelwert von n-Betriebsbedingungen über Zeiten von 100 - 1000 Stunden. Sie simulieren besser die Praxisbedingungen, erlauben es jedoch nicht immer, kritische Betriebspunkte bzw. Parameter mit konventionellen Verschleißmeßverfahren zu finden.

Einige Probleme am Motor treten jedoch erst beim Kunden selbst auf und nicht während Testfahrten bzw. Prüfstandsläufen. Die Lösungen dieser Probleme sind vielfach nur durch hohe Kosten zum Erkennen der verantwortlichen Parameter zu finden. Oft werden diese Parameter selbst gar nicht explizit gefunden, sondern das Problem durch Erfahrung und Intuition des Versuchsingenieurs kurzfristig gelöst.

#### 2.5.2 Richtlinien zur Bauteilfreigabe für die Produktion

Heute ist ein wesentliches Freigabekriterium zur Produktion von Bauteilen und Motoren die erfolgreiche Absolvierung von Dauertests.

Außerdem müssen jedoch zusätzliche andere Kriterien erfüllt werden. Es soll nun in Abb.7 [3] am Beispiel für Kolbenringe eines luftgekühlten Motors gezeigt werden, welche Richtlinien bestehen zur Bauteilfreigabe für die Produktion.

Für die Verschleißbeurteilung wesentlich sind die Abschnitte "III. Funktionsprinzipien" und "V. Lebensdauer". Die Funktionsbeurteilungen werden z.B. über Sichtbefunde nach Freßtests vorgenommen. Die Messung der Durchblasemenge bei verschiedenen Betriebsbedingungen sowie die Flattergrenzen nach dem Einlauf bzw. einem 50 h-Lauf sind weitere wichtige Beurteilungskriterien zur Funktion des Bauteils.

Zur Lebensdauerbeurteilung werden Ölverbrauchswerte nach bestimmten Laufzeiten sowie Sichtbeurteilungen und konventionelle Verschleißmessungen nach 1000 h-Läufen herangezogen. Zur Bauteilfreigabe müssen alle geforderten Werte aus Abb.7 erfüllt werden.

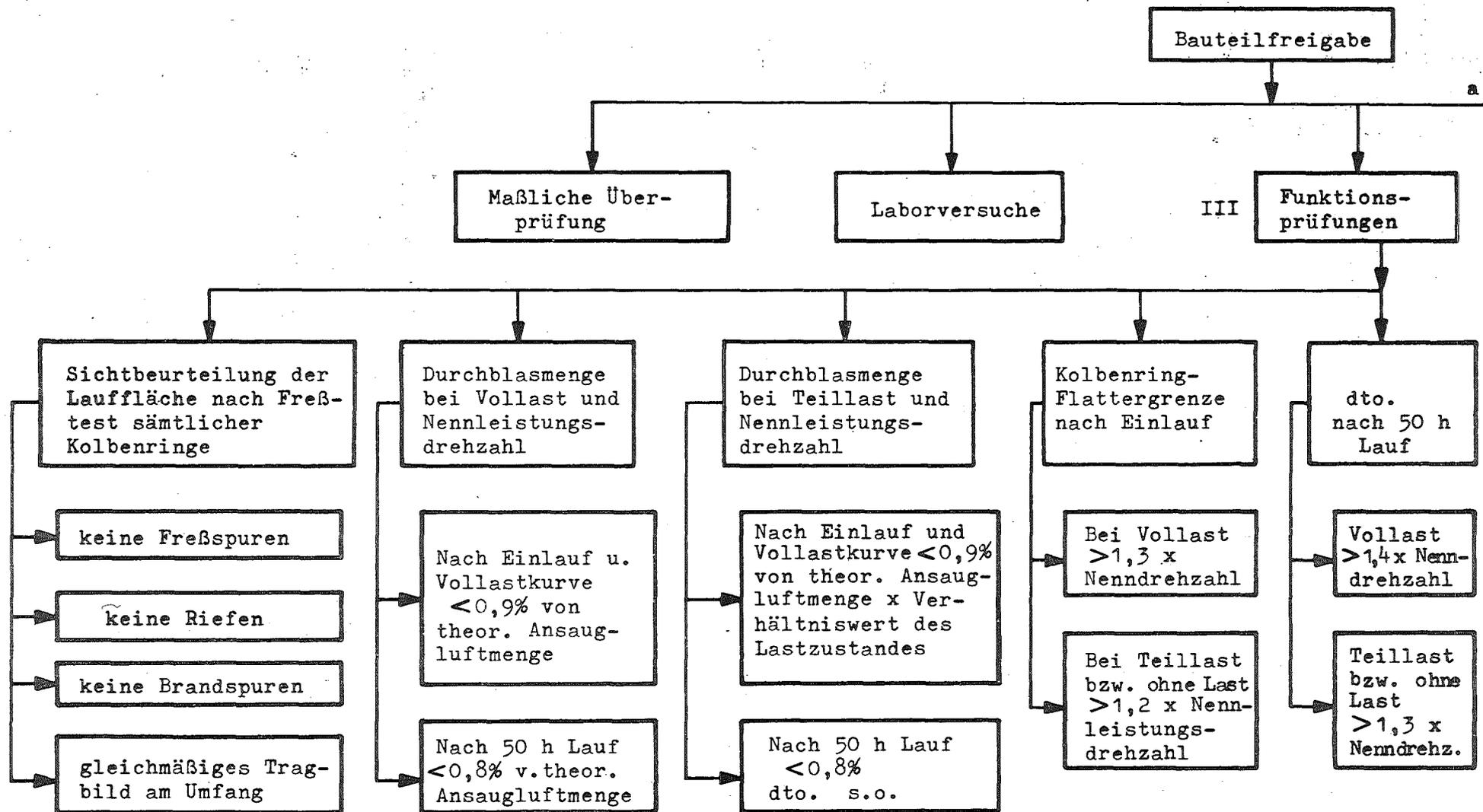
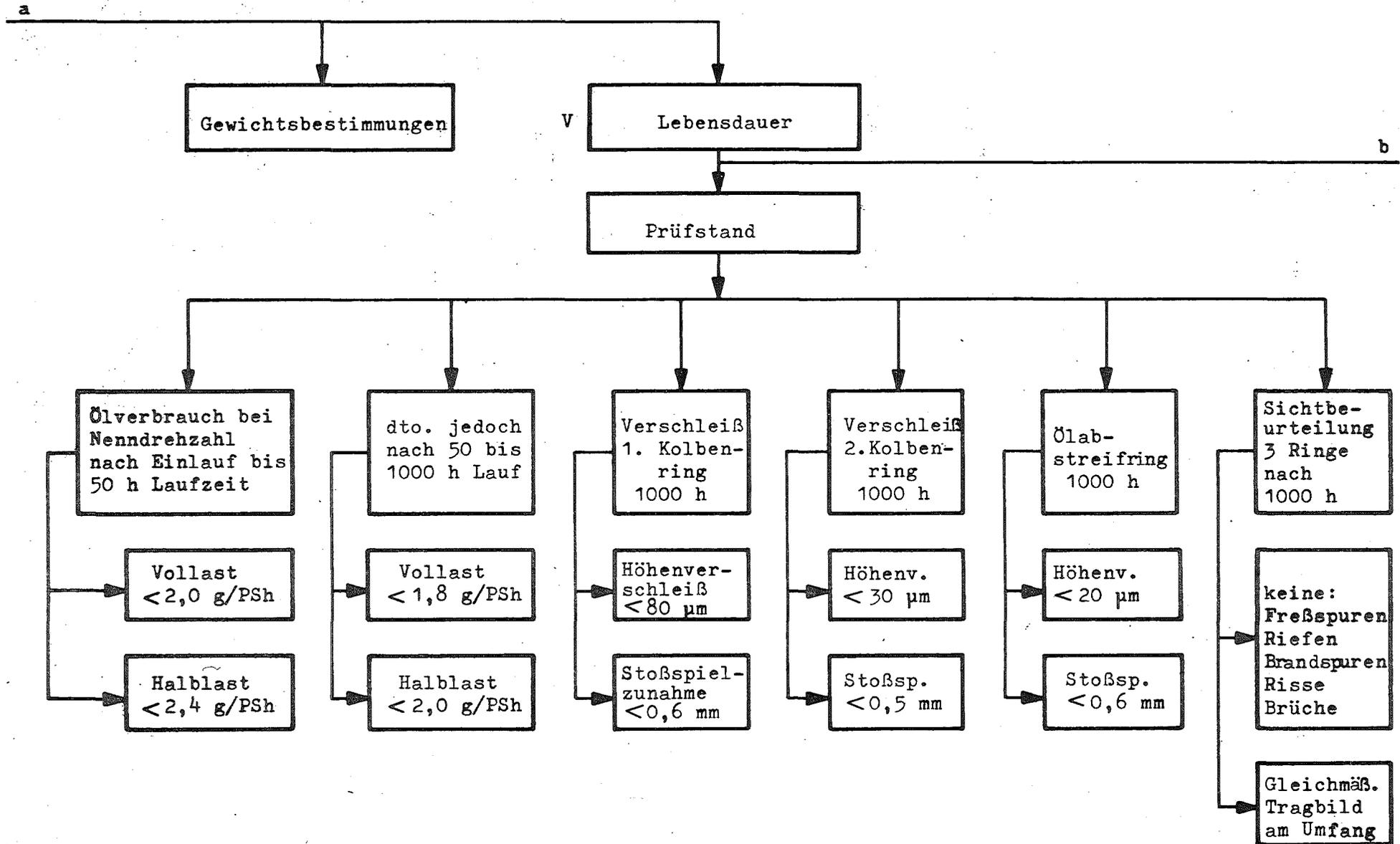
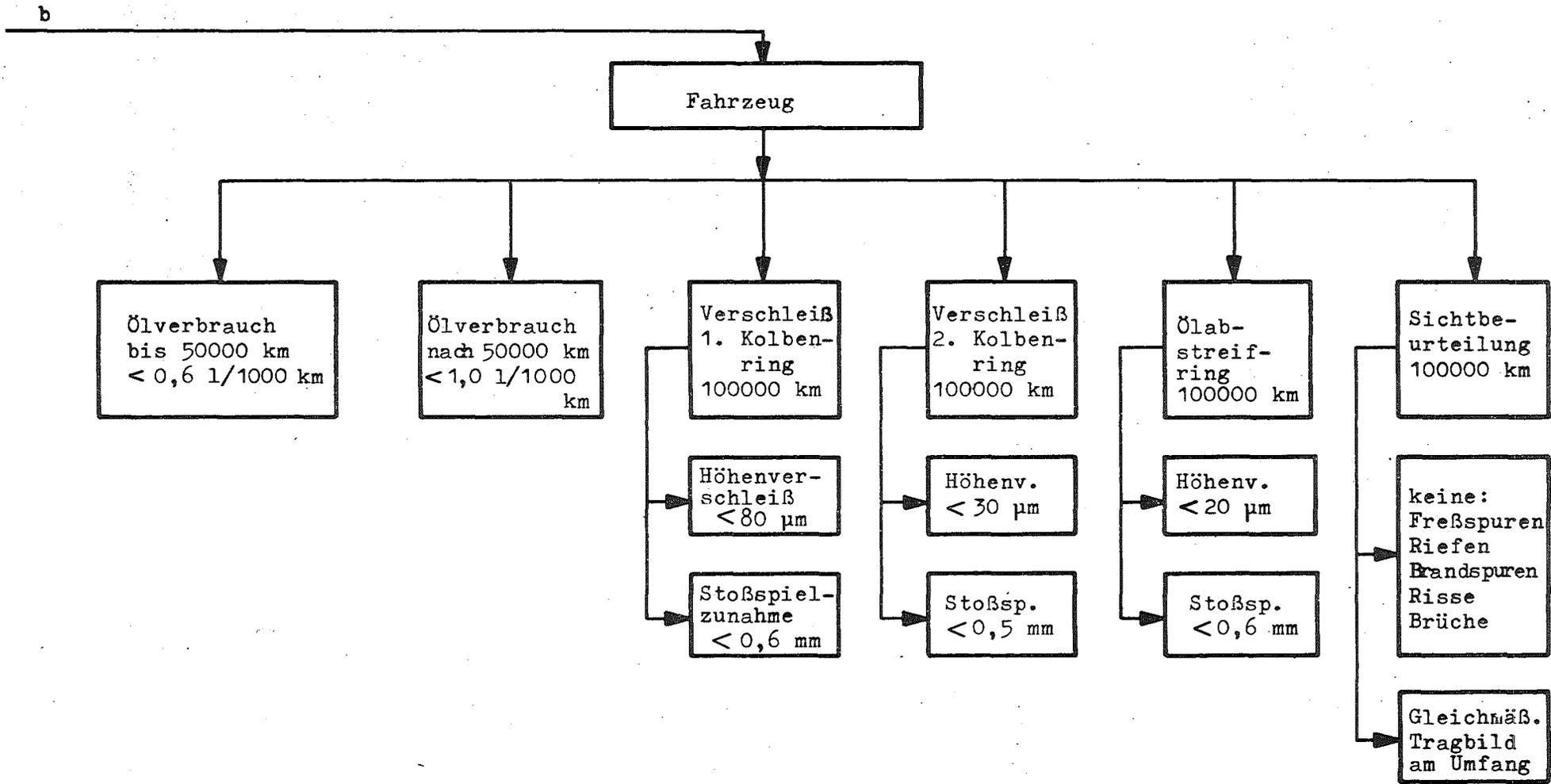


Abb.7: Auszug aus Checkliste zur Bauteilfreigabe (Beispiel: Kolbenringe eines luftgekühlten Motors [3])



Noch Abbildung 7



Noch Abbildung 7

### 3. V E R S C H L E I S S M E S S V E R F A H R E N

Im folgenden Kapitel wird auf die verschiedenen heute zur Verfügung stehenden bzw. sich in der Entwicklung befindlichen Verschleißmeßverfahren eingegangen. Es wird begründet, warum speziell in dieser Arbeit nur konventionelle und RNT-Verfahren betrachtet werden. Die RNT-Methoden werden ausführlicher dargestellt, während die konventionellen Methoden als weitgehend bekannt vorausgesetzt werden.

#### 3.1 Klassifikation der Meßverfahren

Verschleiß kann auf verschiedene Arten und mit den verschiedensten Verfahren gemessen bzw. nachgewiesen werden. Im wesentlichen sind dies folgende Methoden:

- Längenmessung
- Oberflächenabtastverfahren
- Wiegen
- Abdrücke
- Chemische Analysen des Öls
- Abschätzungen aus Änderungen der Betriebsbedingungen
- Verfahren der Radionuklidtechnik zur Verschleißmessung
- Röntgenfluoreszenzanalyse
- Mikrosonde
- Rasterelektronenmikroskop

Von diesen Verfahren werden in der Industrie hauptsächlich Längenmeßverfahren verwendet. Das Mikrometer ist das meist eingesetzte Meßgerät, das in allen möglichen Variationen, z.B. in Verbindung mit elektronischer Abtastung, optischer Vergrößerung und auch Rechner-gesteuert verwendet wird. Die Oberflächenschriebe und Abdrücke lassen Schlüsse auf den Verschleiß zu.

Die Wiegemethode eignet sich, wenn überhaupt, dann nur für "leichte Bauteile" wie z.B. Kolbenringe und wird nur noch selten verwendet.

Die Radionuklidtechnik mit ihren prinzipiell 2 Methoden kann von der technischen Leistungsfähigkeit her zur Zeit am meisten bieten.

In Anlehnung an ein Diagramm aus [8] werden in Abb.8 die verschiedenen Verschleißmeßverfahren den Kriterien gegenübergestellt, denen ein Verschleißmeßverfahren genügen könnte.

1	Verschleißbest. in speziellen Punkten	7, 8	Wiegen
2	Verschleißverteilung über Reibungsfläche	(1), 2, (3), 7, 8	Längenmessung
3	Kleine Werte von linearem Verschleiß zu messen	6	Oberflächenschrieb
4	Verschleißbest. von Flächen ohne Demontage	(1), 3, 4, (5)	Chem. Analyse des Öls
5	Kontinuierl. Kontrolle des Verschleißprozesses	1, 2, 3, 7, 8	Abdrücke
6	Abschätzung der Mikrogeometrie von Verschleißfläche	4, (5), 8	Abschätzung aus Änd.Betriebsbed.
7	Einfachheit	1, (2), 3, 4, 5,	DfV
8	Unabhängigkeit	1, 2, 3, 4, 5	DDV

Abb.8: Verschleißmeßverfahren und zugeordnete Kriterien ihrer jeweiligen Leistungsfähigkeit

Mit einer Zuordnung der Ziffern der Kriterien zu den einzelnen Meßverfahren wird eine Grob-Aussage über deren Leistungsfähigkeit gemacht. Die Radionuklidtechnik ist demnach als einziges Verfahren in der Lage, kontinuierlich den Verschleißvorgang ohne Demontage des Bauteils zu messen. Hinzu kommt, daß sie in bestimmten Fällen (z.B. Verschleißmessungen an Wälzlagern [9]) um den Faktor  $10^2 - 10^4$  höhere Genauigkeit als konventionelle Verfahren bieten kann und deshalb mit relativ kurzen Meßzeiten (Laufstunden des Motors) auskommt. Schon allein aus diesen Gründen ist es gerechtfertigt, die RNT mit den heute in der Industrie verwendeten Längenmeßmethoden zu vergleichen. Die weiteren technischen Vor- und Nachteile der jeweiligen Verfahren werden näher an Beispielen in Kapitel 3 und später bei der Bewertung der Verfahren in Kapitel 5 angesprochen.

### 3.2 Prinzipielle Beschreibung der Radionuklidtechnik-Verschleißmeßverfahren [1,2,14]

Auf die heute gebräuchlichen Längenmeßgeräte und Systeme wird hier nicht eingegangen. Sie sind in der Literatur weitgehend beschrieben [10,11,12].

#### 3.2.1 Entwicklung der RNT

Erst mit dem Bau von Kernreaktoren war es möglich, künstliche Radionuklide zu erzeugen.

Mit dieser Voraussetzung wurden in den 50-iger Jahren die ersten Verschleißmeßverfahren der Radionuklidtechnik entwickelt. Die zu untersuchenden Maschinenteile wurden damals ausschließlich mit Neutronen aktiviert. Bei Aktivierungen im Reaktor (Neutronenbestrahlung) werden die Teile durchgehend aktiv, da die Neutronen im Material nicht abgebremst werden.

Dadurch war es nicht möglich, größere Maschinenteile zu untersuchen, da bereits bei kleineren Teilen (z.B. Kolbenringe  $\varnothing$ : 80 - 120 mm, Masse ca. 10 - 20 g) Aktivitäten von ca. 20 - 200 mCi pro Maschinenteil auftraten. Bei diesen Aktivitäten sind bereits aufwendige Abschirmmaßnahmen als Strahlenschutz

für Montage- und Bedienungspersonal notwendig. Mit dem Bau von leistungsstarken Teilchenbeschleunigern (z.B. Zyklotron Karlsruhe) in den 60-iger Jahren ergaben sich neue Aktivierungsmöglichkeiten für Maschinenteile, durch Bestrahlung mit geladenen Teilchen. Im Gegensatz zur Aktivierung mit Neutronen werden nur dünne Oberflächenschichten von Bauteilen aktiviert. Diese Methode der sogenannten Dünnschichtaktivierung wurde in der Sowjetunion und der Bundesrepublik Deutschland entwickelt [1,2,13].

### 3.3.2 Dünnschichtaktivierung

Die Anwendung der Dünnschichtaktivierung von Maschinenteilen mit geladenen Teilchen (Protonen, Deuteronen,  $\alpha$ -Teilchen) ermöglicht Verschleißmessungen mit sehr geringen Gesamtaktivitäten. Man erreicht dreierlei für Verschleißmessungen:

1. Die Aktivitäten liegen bis zum Faktor 1000 unter denen der Neutronenaktivierung ( $\mu\text{C}$  statt  $\text{mCi}$ ), weil das Maschinenteil nur in einer dünnen Oberflächenschicht radioaktiv wird.
2. Man kann durch die Wahl bestimmter Teilchen und deren Energien erreichen, daß in Verschleißschichten gleichen Materials verschiedene Radionuklide erzeugt werden.
3. Die Dünnschichtaktivierung ermöglicht die Anwendung des sogenannten Dünnschichtdifferenzverfahrens (DDV) (siehe auch Kap. 3.2.3.2).

Zu diesen Punkten eine kurze Erläuterung:

Die Gesamtaktivität des Maschinenteils ist deshalb so gering, weil die geladenen Teilchen aufgrund der starken Wechselwirkung mit den Atomen des Targets ihre Energie in einer kurzen Wegstrecke verlieren und deshalb nur eine dünne Oberflächenschicht radioaktiv wird.

Die Abb.9 zeigt diese Zusammenhänge am Beispiel von deutronenaktivierten Eisens. Der obere Teil von Abb.9 zeigt den Energieverlauf über der Dicke des Targets. Bei einer Tiefe von ca. 2,8 mm haben die Deuteronen mit einer Anfangsenergie von 50 MeV ihre Energie vollkommen verloren.

Auf dem Weg der geladenen Teilchen im Material erfolgen

Kernreaktionen, welche zur Bildung radioaktiver Nuklide führen  
z.B.:

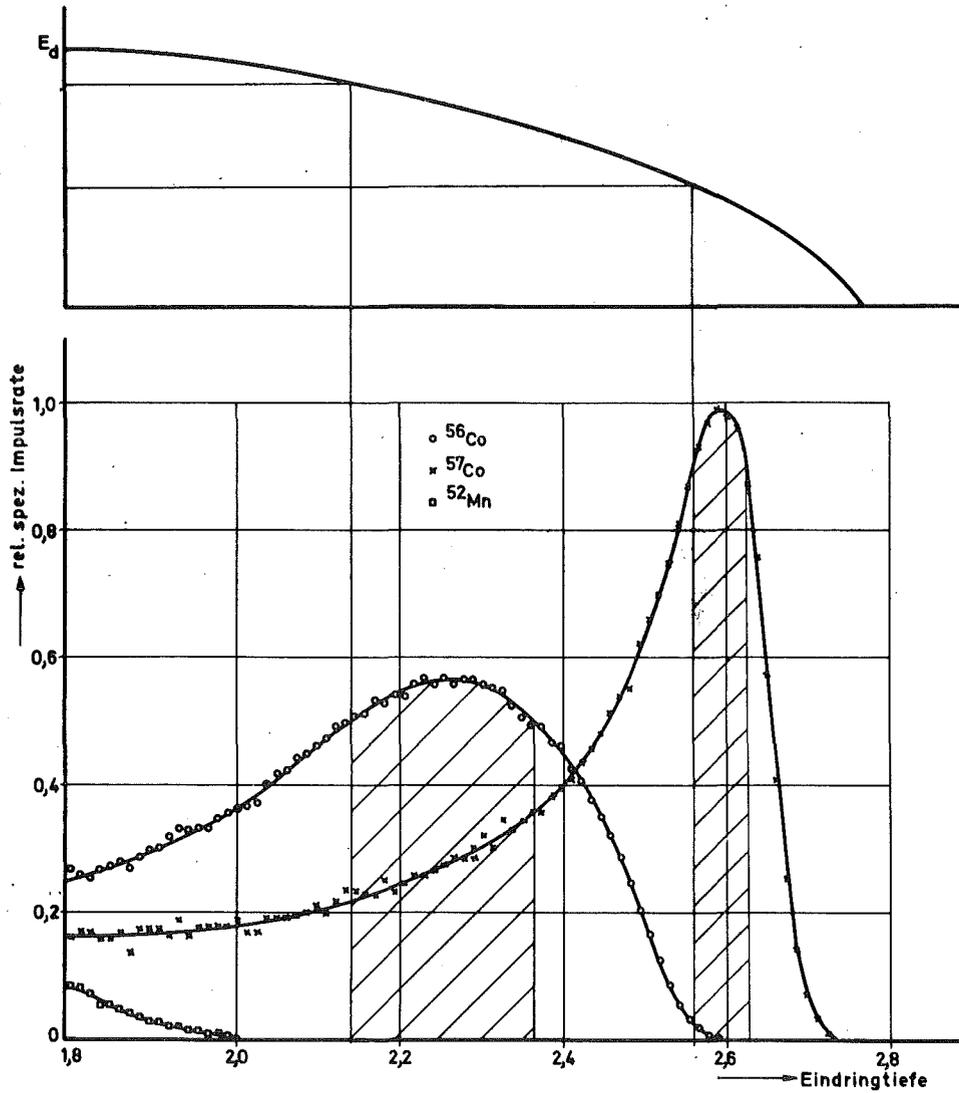
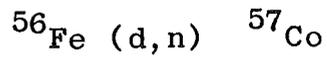
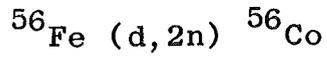


Abb.9: Energie- und spezifische Aktivitätsabnahme durch Deuteronen erzeugte Radionuklide über der Eindringtiefe (Schichtdicke) im Targetmaterial (Stahl)

Die Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Kernreaktionen ist abhängig von der Energie der geladenen Teilchen. Das führt zu der unterschiedlichen Aktivitätsverteilung der beiden Radioisotope  $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$  in der bestrahlten Schicht, wie der untere Teil von Abb.9 zeigt. Die gängigen, im Maschinenbau verwendeten metallischen Werkstoffe sind mit geladenen Teilchen aktivierbar [15].

Der Strahl der geladenen Teilchen hat einen Durchmesser von einigen Millimetern. Zur Aktivierung, im Verhältnis dazu größerer Flächen, ist es notwendig, das Maschinenteil in geeigneter Weise vor dem Strahl zu bewegen. Eine dafür entwickelte Bestrahlungsvorrichtung zeigt Abb.10.

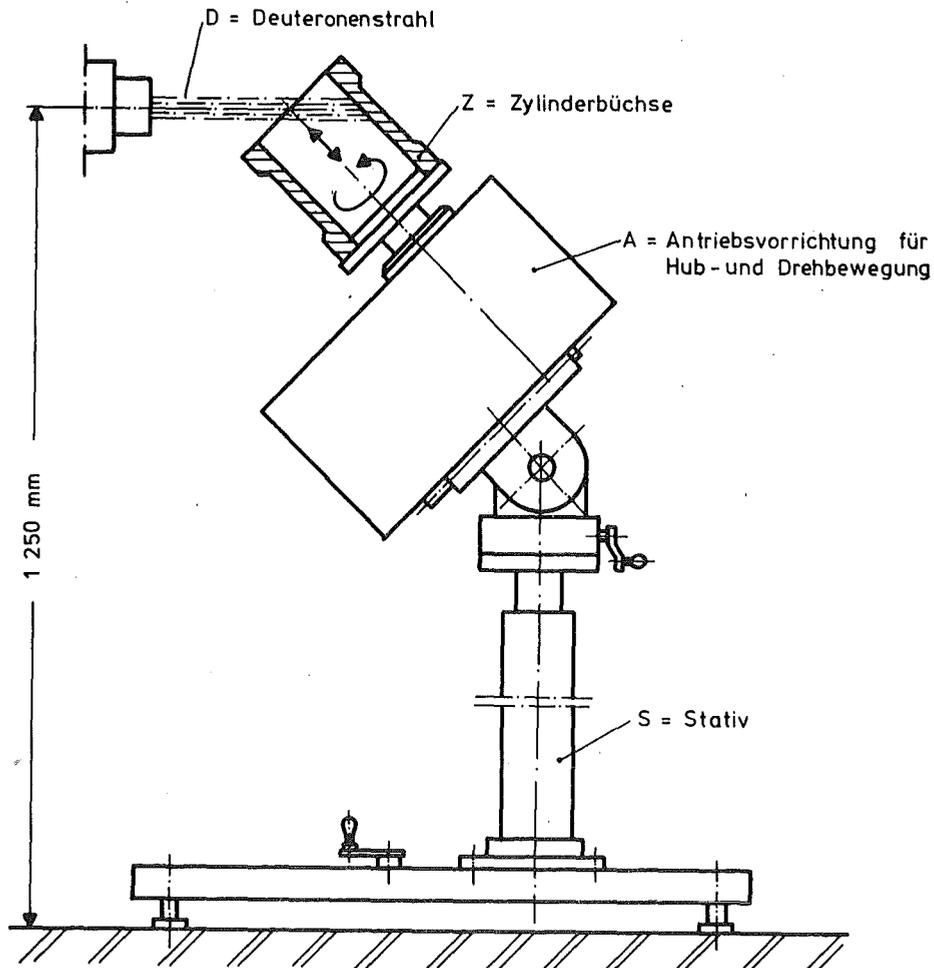


Abb.10: Bestrahlungsvorrichtung [1,2]

### 3.2.3 Meßmethoden

#### 3.2.3.1 Durchflußmeßverfahren (DfV)

Das bekannteste Verfahren, Verschleiß mit Hilfe von Radioisotopen zu messen, ist die sogenannte Durchflußmeßmethode mit Öl als Transportmedium.

Vor der Verschleißmessung werden die interessierenden Maschinenteile entweder mit Neutronen oder mit geladenen Teilchen aktiviert. Während des Versuchslaufs gelangen die abgeriebenen radioaktiven Verschleißteilchen, durch das Öl transportiert, zum Meßkopf, dort werden sie nachgewiesen und in einer geeigneten Meßapparatur registriert (Abb.11). Der Meßkopf besteht aus einem NaJ-Szintillator umgeben von einem Meßgefäß, durch das das Öl mit den Verschleißpartikeln gepumpt wird. Diese Anordnung ist mit einer Bleiabschirmung umgeben. Sie dient zur Abschirmung des Detektors von der Direktstrahlung der aktivierten Maschinenteile und zur Herabsetzung der Untergrundstrahlung.

Die Genauigkeit der Durchflußmethode liegt je nach Aktivierung bei etwa 10 µg/h.

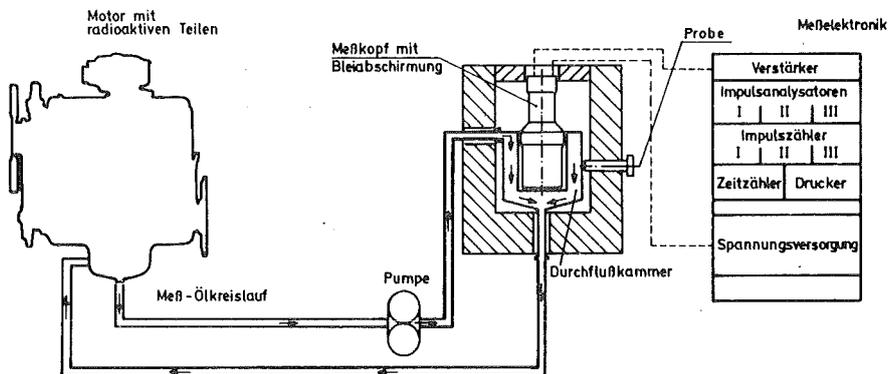


Abb.11: Prinzip des Durchflußmeßverfahrens [1,2]

### 3.2.3.2 Dünnschichtdifferenzverfahren (DDV)

Beim Dünnschichtdifferenzverfahren erfolgt die Zuordnung der abgetragenen Verschleißmenge über die Abnahme der Gesamtaktivität des mit der Dünnschichtmethode aktivierten Teils.

Abb.12 zeigt für das Dünnschichtdifferenzverfahren die einfache Anordnung eines aktivierten Teiles, in diesem Fall einen Kolbenring hinter einem Zylinder und den Detektor zur Messung der abnehmenden Aktivität während des Verschleißtests. Mit dieser Methode ist es möglich, auch Verschleiß in Maschinen und Motoren zu messen, bei denen die Verschleißteilchen nicht durch einen Ölkreislauf zum Detektor transportiert werden können.

Die Bezeichnung "Dünnschichtdifferenzverfahren" sagt aus, daß die Differenz der Aktivität  $\Delta A$  infolge des Materialabtrags  $\Delta S$  ein Maß für den Verschleiß darstellt (s.auch Abb.12).

Um nun einen linearen Zusammenhang zwischen der Dicke der Verschleißschicht  $s$  und dem Verlust der Gesamtaktivität  $A$  zu erhalten und so kurz wie möglich, d.h. möglichst billig bestrahlen zu können, muß man die richtige Energie der geladenen Teilchen zur Aktivierung des Targets wählen. Abb.13 ist ein Auszug aus Abb.9 für das Radioisotop  $^{56}\text{Co}$ . Die Gesamtaktivität  $A$  ist

$$A_1 = \int_{s_1}^{s_{\max}} A_s ds \quad (\text{Abb.13})$$

Zwischen  $s_1$  und  $s_2$  existiert der gewünschte lineare Zusammenhang, weil in diesem Intervall die Aktivität pro abgeriebener Schicht oder die Änderung der Gesamtaktivität ( $A_s$ ) ausreichend konstant ist. Aus diesem Grund ist  $E_1$  die richtige Energie der geladenen Teilchen für die Bestrahlung des Targets. Die Stelle  $s_1$  ist dann die Oberfläche des Targets vor dem Verschleißversuch,  $s_2$  nach dem Versuch. Je nach Bestrahlungsanordnung erhält man einen linearen Bereich von 20-200  $\mu\text{m}$ .

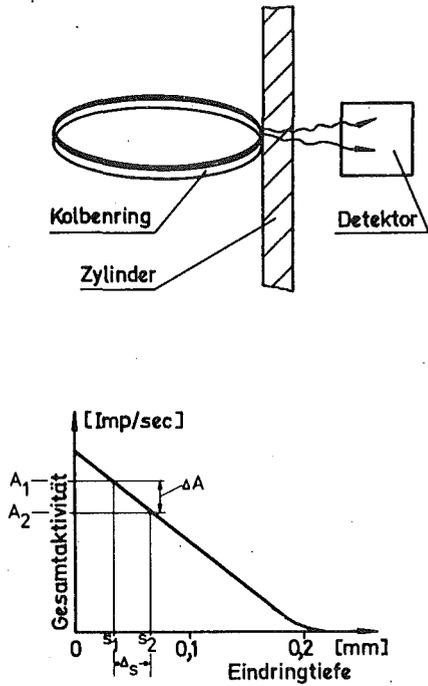


Abb.12: Typische Anordnung für das "Dünnschichtdifferenzverfahren"

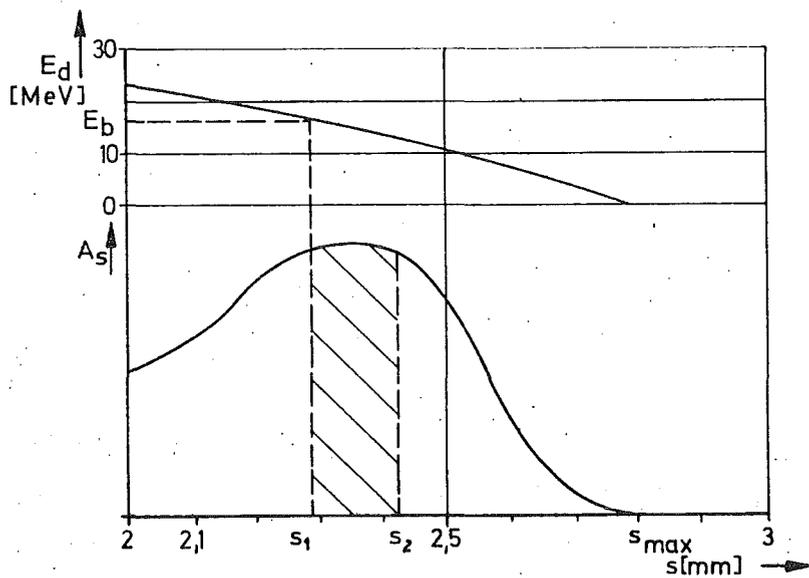


Abb.13: Deuteronenenergie  $E$  und tiefenbezogene Aktivität  $A_s$  eines durch Deuteronen erzeugten Radionuklids als Funktion der Eindringtiefe  $s$  (Auszug aus Abb.9)

### 3.3 Möglichkeiten und Grenzen der konventionellen- und RNT-Verschleißmeßverfahren

#### 3.3.1 Zeitlicher und organisatorischer Ablauf

In Abb.14 ist das Flußdiagramm einer konventionellen Messung dem einer RNT-Messung gegenübergestellt. In Abb.15 ist diese Darstellung an einem Beispiel in einen Netzplan übertragen.

Die konventionelle Methode benötigt Zeiten zum zweimaligen Vermessen der Bauteile, wobei Wartezeiten im Meß- und Prüfwesen als Totzeiten auftreten können, außerdem relativ lange Motorlaufzeiten sowie Auswertungszeiten. Demgegenüber ist die Motorlaufzeit bei Anwendung der RNT gering und dazu identisch mit der Meßzeit. Außerdem ist eine laufende Messung des Verschleißes möglich.

Der kritische Weg für die RNT führt über die Bereitstellung der Bauteile für Aktivierungen, den Aktivierungen selbst, den eventuell notwendigen Abklingzeiten sowie der Meßsystemanpassung. Es muß im Einzelfall untersucht werden, welches der beiden Verfahren am schnellsten zu Ergebnissen führt. Legt man eine gewisse Lagerhaltung für aktivierte Bauteile zugrunde, was in einigen Fällen möglich ist (langlebige Meßnuklide mit einer Halbwertszeit  $> 50$  Tagen), kann die RNT zeitlich eindeutige Vorteile bieten.

Ohne eine sorgfältige Ablaufplanung im Einzelfall ist die RNT wegen der auftretenden Totzeiten oft langsamer. Der Hauptengpaß für die RNT liegt bei der Bereitstellung aktivierter Bauteile (heute im Mittel ca. 3 Wochen bei Bestrahlung am Zyklotron Karlsruhe). Er wird sich bei Anwendung der Technik auf breiterer Basis in der Industrie nur beheben lassen, wenn zumindest weitere vorhandene Beschleuniger für Aktivierungen ausgenutzt werden. Der Bau von speziellen Beschleunigern für Maschinenteilaktivierungen ist die einzige sinnvolle langfristige Lösung, die außerdem auf die Dauer kostengünstiger ist.

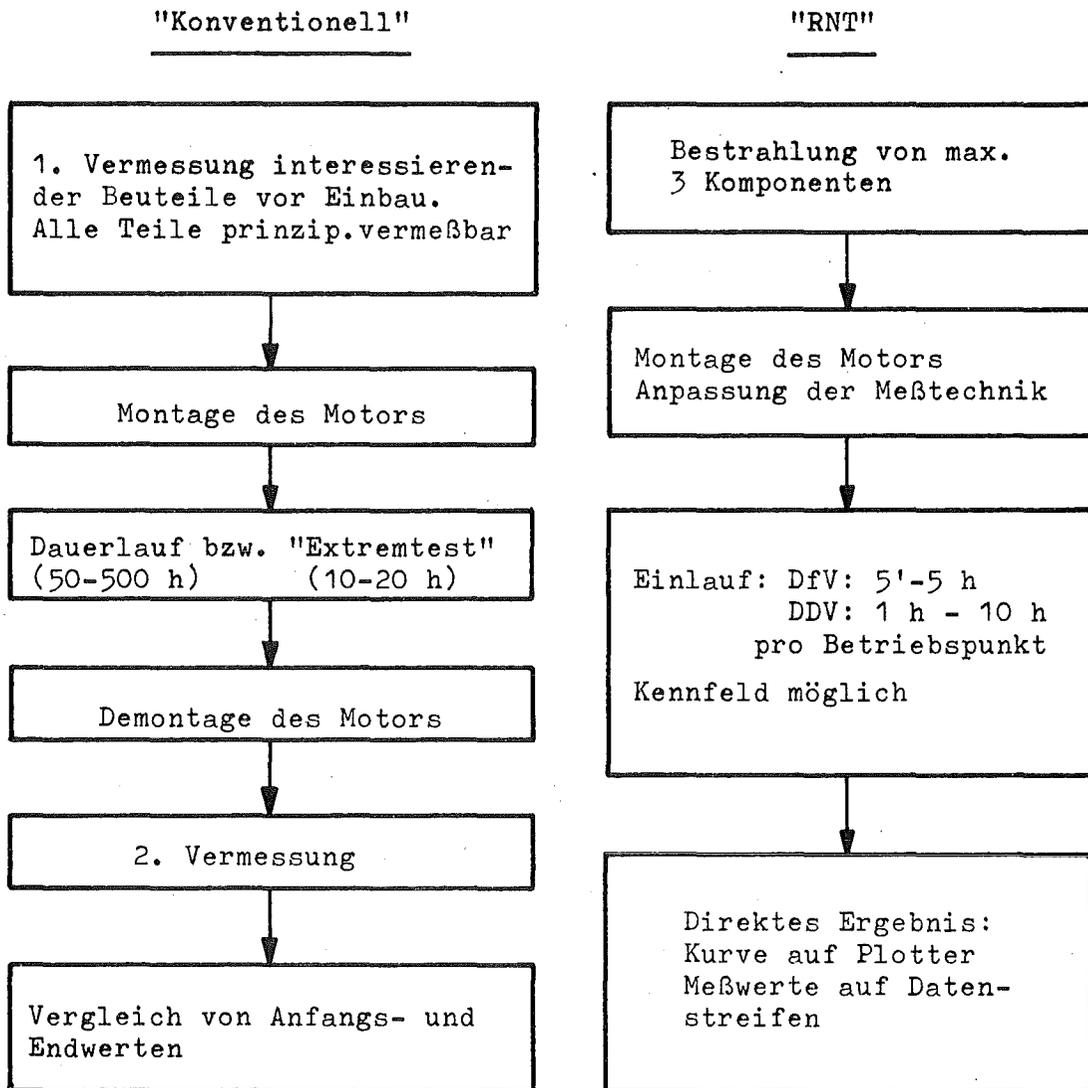


Abb.14: Ablauf von konventionellen- und RNT-Meßverfahren

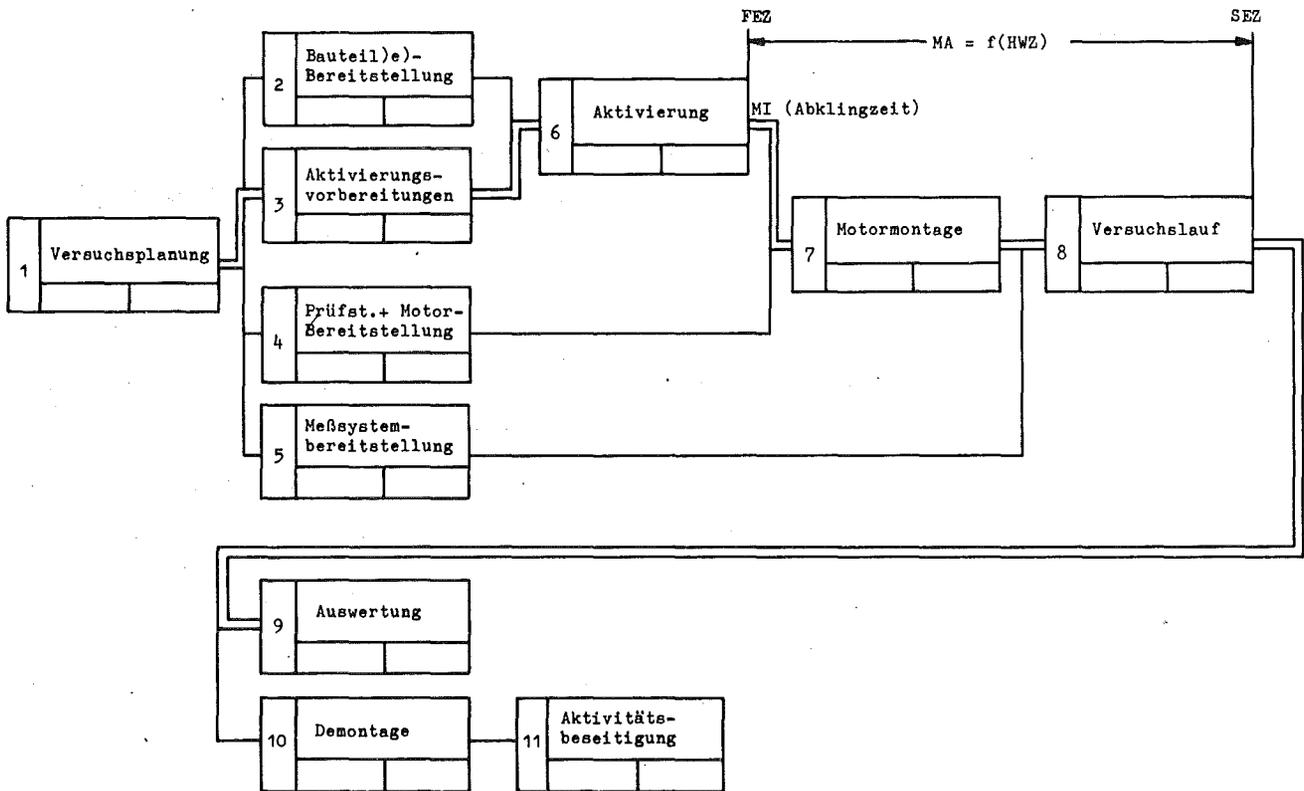
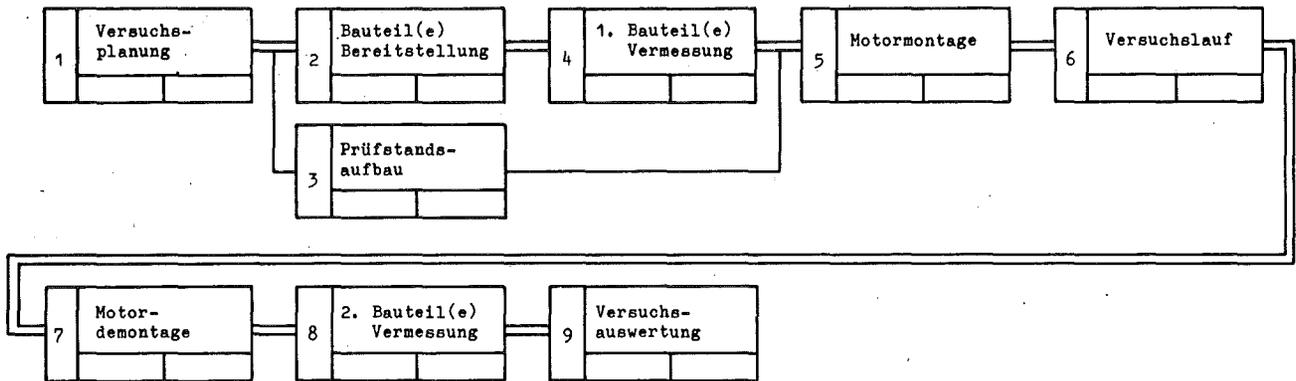
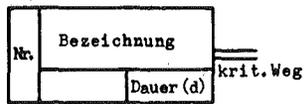


Abb.15: Netzpläne für Anwendung von konventionellen- (oben) und RNT-Meßverfahren (unten)

### 3.3.2 Technische Leistungsfähigkeit der Meßverfahren - Fehler und Unsicherheiten vom Messen - [16,17,18,19,20]

Verschleißmeßsysteme (konventionelle und RNT) liefern quantitative Angaben über den Materialabtrag.

Der Verschleiß, die Meßgröße, wird über Meßwerte als Längen-, Volumen- bzw. Gewichtsänderungen dargestellt. Im Anzeigebereich eines Meßgerätes können Meßwerte abgelesen werden. Jedoch nur im Meßbereich bleibt der Fehler der Messung innerhalb von angegebenen oder vereinbarten Grenzen.

Die Empfindlichkeit eines Meßgerätes ist das Verhältnis einer an dem Meßgerät beobachteten Änderung seiner Anzeige zu der sie verursachenden Änderung der Meßgröße.

Bei der Betrachtung von Fehlern muß unterschieden werden zwischen Fehlern von Meßgeräten /-Systemen und Fehlern von Gesamtsystemen, d.h. der Meßwerte.

#### Fehlerarten:

##### 1. Systematische Fehler

Sie werden hervorgerufen durch Unvollkommenheit der Meßgeräte, Meßverfahren und des Meßgegenstandes, in zweiter Linie durch persönliche- und Umwelteinflüsse.

##### 2. Zufällige Fehler

Sie sind hervorgerufen von während der Messung nicht erfaßbaren und nicht beeinflussbaren Änderungen von Meßsystem, Meßgegenstand, Umwelt und Beobachter. Zufällige Fehler sind im einzelnen nicht erfaßbar und machen das Ergebnis unsicher.

Das Streuen einzelner Meßwerte kann z.B. dadurch hervorgerufen werden, daß sich der Meßgegenstand selbst ändert, d.h. seine zu messende Eigenschaft, die Meßgröße, zufälligen Schwankungen unterworfen ist.

#### Unterschiede zwischen Wiederhol- und Vergleichbedingungen

##### Wiederholbedingung:

Ein Beobachter bestimmt die Meßgröße mit ein und demselben Meß-

gerät nacheinander unter gleichen Arbeitsbedingungen, was Streuungen  $\tilde{\sigma}_W$  ergibt. (Systematische Fehler sind nicht erkennbar).

#### Vergleichsbedingung:

Verschiedene Beobachter führen Messungen an verschiedenen Orten unter Verwendung von gleichen Meßgeräten durch, was Streuungen  $\tilde{\sigma}_V > \tilde{\sigma}_W$  ergibt. (Abweichung der systematischen Fehler an verschiedenen Orten). In der Praxis wird der Begriff Reproduzierbarkeit als Oberbegriff für Wiederhol- und Vergleichbarkeit gebraucht und auch im folgenden verwendet. Verschleißmessungen finden immer unter Vergleichsbedingungen statt, wobei die Größe des Streubereiches von den jeweiligen Bedingungen abhängt.

#### Meßunsicherheit und Fehlergrenzen:

DIN 1319 (3) [18] empfiehlt dringend, für Meßergebnisse, Meßverfahren und Meßgeräte nicht eine bestimmte Genauigkeit anzugeben, sondern die Begriffe "Meßunsicherheit" und "Fehlergrenzen" zu verwenden.

In der Praxis wird jedoch meist der Begriff Genauigkeit gebraucht.

#### Meßunsicherheit:

Die Meßunsicherheit eines Ergebnisses ergibt sich aus den zufälligen Fehlern aller Einzelgrößen sowie aus nicht erfaßten systematischen Fehlern.

#### Fehlergrenzen:

Sie sind in der Meßtechnik die vereinbarten oder garantierten zugelassenen äußersten Abweichungen von der Sollanzeige, oder von einem sonst vorgeschriebenen Wert der Meßgröße. -

Nun zur Problematik der Meßunsicherheit ( $\hat{=}$  Genauigkeit) beim Messen von Verschleiß mit konventionellen- und RNT-Verfahren.

Prinzipiell lassen sich für Verschleißmessungen 3 Fallunterscheidungen treffen, und zwar nach Vergleichen von

- Bauteilen
- Betriebsgrößen
- Betriebsparametern.

Konventionelle Messungen sind Differenzmessungen, die jeweils pro Messung einen Ausbau von Bauteilen erfordern. Der Unterschied der Verschleißmeßverfahren - RNT und konventionell - liegt darin, daß mit dieser konventionellen Technik, unabhängig welche Verschleißeinflüsse untersucht werden sollen, Bauteile verglichen werden müssen, die unter verschiedenen, nicht quantitativ angebbaren Einbauverhältnissen im Motor gelaufen sind. Die RNT kann Betriebspunkte und Betriebsparameter grundsätzlich an demselben Bauteil während des Betriebs untersuchen.

Dieser Unterschied ist entscheidend für die Beurteilung der Meßergebnisse. Die konventionelle- und die Radionuklid-Technik liefern jeweils Meßergebnisse mit Streuungen innerhalb der Fehlergrenzen der Meßsysteme, wobei die Genauigkeiten bei der RNT um Größenordnungen besser sein können als die der konventionellen Verfahren.

Sollen Betriebspunkte (z.B. Drehzahl, Last) oder Betriebsparameter (z.B. Öle) verglichen werden, (dieselben oder ähnliche) können durch zufällige Fehler die Streuungen der zu vergleichenden Meßergebnisse - konv. infolge des unterschiedlichen Verschleißverhaltens von gleichen Bauteilen aber nicht quantitativ erfaßbar ähnlichen Einbauverhältnissen - bis zu einer Größenordnung von den Fehlergrenzen der Meßsysteme abweichen. Dadurch ist ein Vergleich - Reproduzierbarkeit - von solchen Meßergebnissen problematisch und nur mit statistischen Aussagen sinnvoll.

Die RNT braucht demgegenüber nur die zufälligen Fehler des Einflusses hintereinander gefahrener Betriebspunkte auf das Verschleißverhalten zu berücksichtigen und die Ergebnisse sind bzgl. ihrer Unsicherheit beim Vergleich mit wesentlich kleineren Streubereichen  $\tilde{\sigma}_V$  behaftet (ausgenommen: direkte Bauteilvergleiche).

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Reproduzierbarkeit von RNT-Ergebnissen beim Vergleich von Betriebspunkten und Parametern bis zu einer Größenordnung besser sein kann als die der konventionellen Verfahren.

Außerdem kann die RNT auch bereits dann sinnvoll eingesetzt werden, wenn (z.B. aufgrund fehlender Eichung) keine Absolutwerte des Verschleißes, aber qualitative Unterschiede im Verschleißverhalten von Bauteilen bzw. Betriebsgrößen sicher angegeben werden können.

In der folgenden Abb.16 sind die Genauigkeiten für die verschiedenen Verfahren dargestellt.

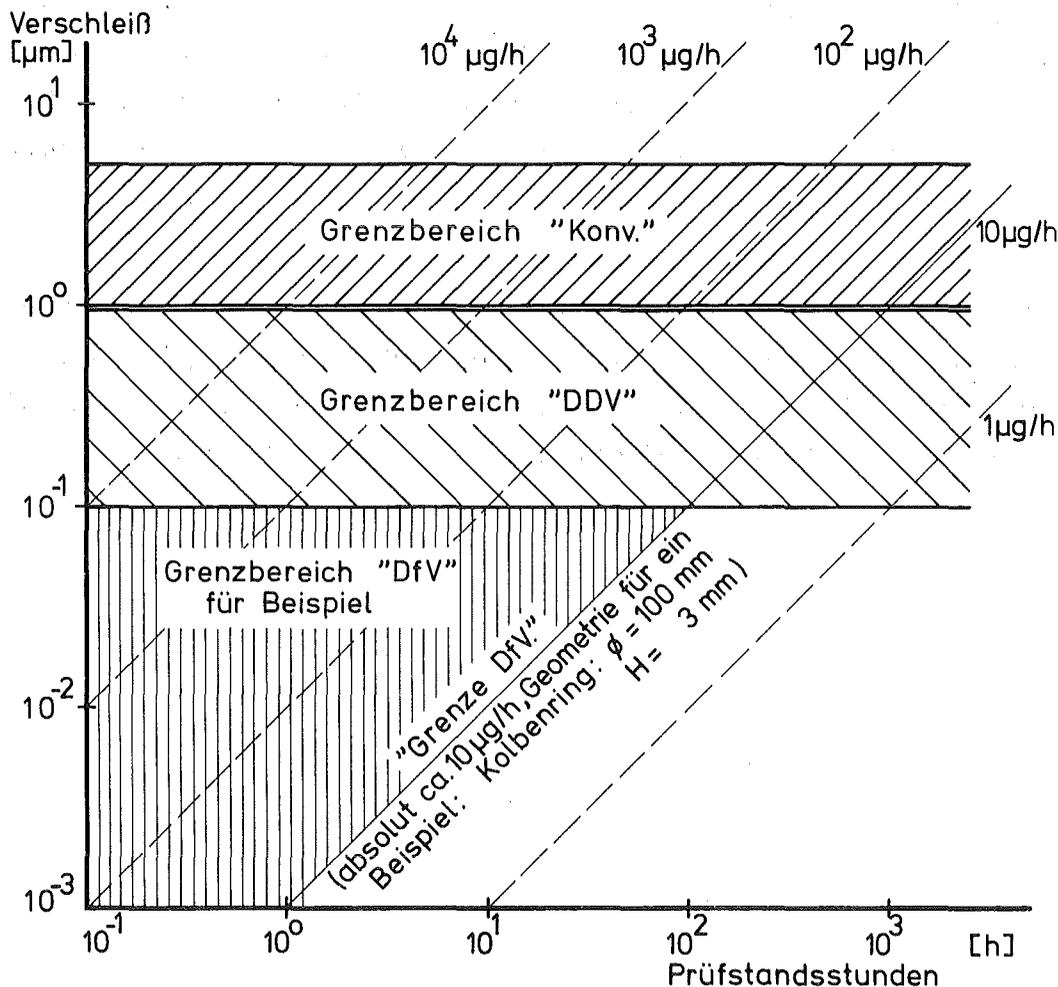


Abb.16: Genauigkeiten von konv.-, Durchfluß- (DfV)- und Dünnschichtdifferenzverfahren (DDV)

Die konventionellen Verfahren erreichen ihre Grenzen bei Meßgenauigkeiten von ca. 1 Mikrometer. Das Dünnschicht-differenzverfahren (DDV) gestattet je nach Problemstellung Meßgenauigkeiten von 0,1 - 1 Mikrometer (0,01 Mikrometer werden zur Zeit angestrebt). Mit dem Durchflußverfahren (DfV), das die Masse des Materialabtrages registriert, können bis zu 10 µg/h Verschleiß gemessen werden. Unter der Annahme, daß ein gleichmäßiger Materialabtrag von der aktivierten Fläche erfolgt, kann über die Geometrie des jeweiligen Bauteils der Abtrag in Mikrometer von der Oberfläche umgerechnet werden. In Abb.16 sind für das Beispiel eines Kolbenringes (Maße:  $\phi = 100$  mm, H = 3 mm) die Linien konstanten Abtrages von der Lauffläche, von 10 µg/h bis  $10^4$  µg/h, eingetragen. Daraus ergibt sich für dieses Beispiel der senkrecht schraffierte Bereich als Grenzmeßbereich der Genauigkeit des Durchflußverfahrens. Dieser Grenzbereich des DfV läßt sich also nicht allgemein wie für DDV und konventionelle Verfahren darstellen.

In der folgenden Tabelle 1 werden die verschiedenen Meßverfahren bezüglich verschiedener Kriterien der technischen Leistungsfähigkeit auf ihre Vor- und Nachteile verglichen. Diese Aussagen müssen jedoch im Einzelfall für die unterschiedlichen Problemstellungen gesondert betrachtet werden.

Tabelle 1:

Technische Leistungsfähigkeiten von konv.- und RNT-Verschleißmeßverfahren

Kriterien	Verfahren		
	konv.	DfV	DDV
Genauigkeit	$\geq 1 \mu\text{m}$	$\geq 10 \mu\text{g/h} \hat{=} \geq 10^{-4} \mu\text{m/h}$	$\geq 10^{-1} \mu\text{m}$
Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen (Streubereiche)			
a) für Bauteile	10% - 300%	10% - 300%	10% - 300%
b) für Betriebsgrößen	10% - 300%	10% - 25%	10% - 25%
kontinuierliche Meßmöglichkeiten (ohne Demontage des Bauteils)	nein	ja	ja
Ausfallwahrscheinlichkeit	sehr gering	mittel gut	mittel
Meßmöglichkeiten:			
a) konstante Verschleißraten	ja	ja	ja
b) Verschleißratenänderungen	nein	ja	ja
c) Verschleißverteilungen	i.a. ja	bedingt	bedingt
Bedienbarkeit	einfach	Speziellkenntnisse und Erfahrung erforderlich	
Anzahl getrennt erfassbarer Meßstellen pro Versuch	unbegrenzt	$\leq 3$	$\leq 3$
Flexibilität	sehr gut	mittel	mittel
Umweltbelastung	keine	im zulässigen Bereich der 1. Strahlenschutzverordn.	
Abhängigkeiten von:			
a) Spezialisten	nein	ja	ja
b) Organisationen	nein	ja	ja

### 3.3.3 Beschreibung des Einsatzes der untersuchten Verschleißmeßverfahren

In diesem Kapitel wird aufgezeigt, in welchem Maße die konventionelle Meßtechnik in der Motorenentwicklung angewendet wird. Insbesondere wird der Aufwand an Kosten betrachtet. Es werden allgemeine Vergleiche gezogen zwischen Anwendungen der konventionellen Meßverfahren und möglichen der RNT.

#### 3.3.3.1 Kostenaufwand

In der Regel sind Voraussetzung für die Anwendung der konventionellen Meßverfahren, außer bei Extrembelastungen von Motoren wie z.B. Freßtests, Motorlaufzeiten von mindestens 50 h erforderlich, u.U. aber auch 500 h oder 1000 h. Hierzu als Beispiel Abb.17. In der Firma, auf deren Daten sich die Abbildung bezieht, sind pro Jahr ca. 60 Prüfstände 100 000 Stunden in Betrieb. Davon entfallen ca. 25-30% auf Verschleißuntersuchungen nach Expertenaussage [3].

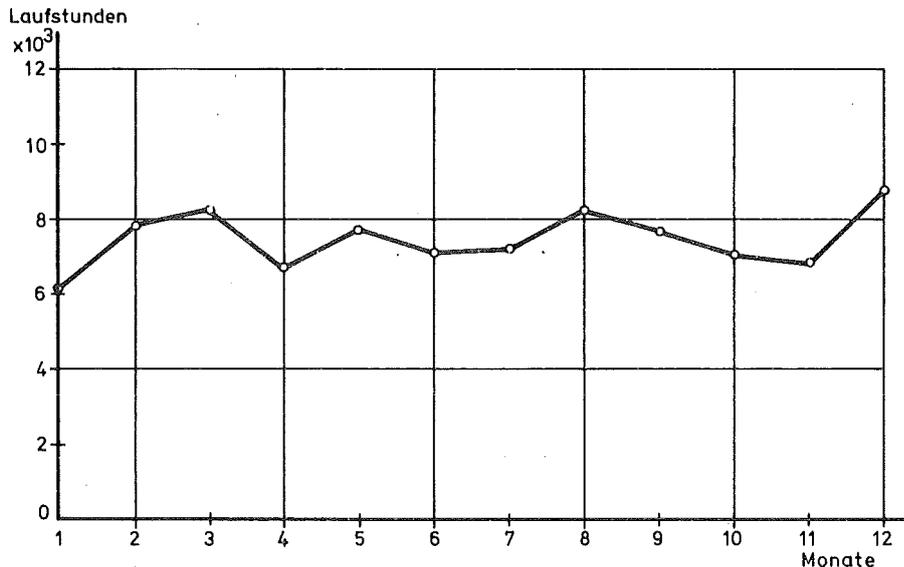


Abb.17: Gesamtprüfstandsauslastung in einer Motorenfirma

Aus Abb.18 gehen zusätzlich die Auslastungsgrade von "Normal- und "Dauerlauf"-Versuchsständen hervor [3]. Die Kurve I bezieht sich auf Versuchsstände, die neun Stunden pro Tag betrieben werden. Die Kurve II bezieht sich auf Dauerlaufstände die im 24 Stunden-3-Schicht-Betrieb bis einschließlich Samstag 17.00 Uhr betrieben werden. Die Auslastungen stellen reine Laufzeiten dar. Insofern ist eine 100%-ige Auslastung nicht möglich. Die mögliche Auslastung liegt bei ca. 70-80% für Versuchsstände, je nach Häufigkeit und Art der Versuche. Der Rest entfällt auf Montagen und Wartung. Die Dauerlaufstände sind demgegenüber höher auslastbar (ca. 90%).

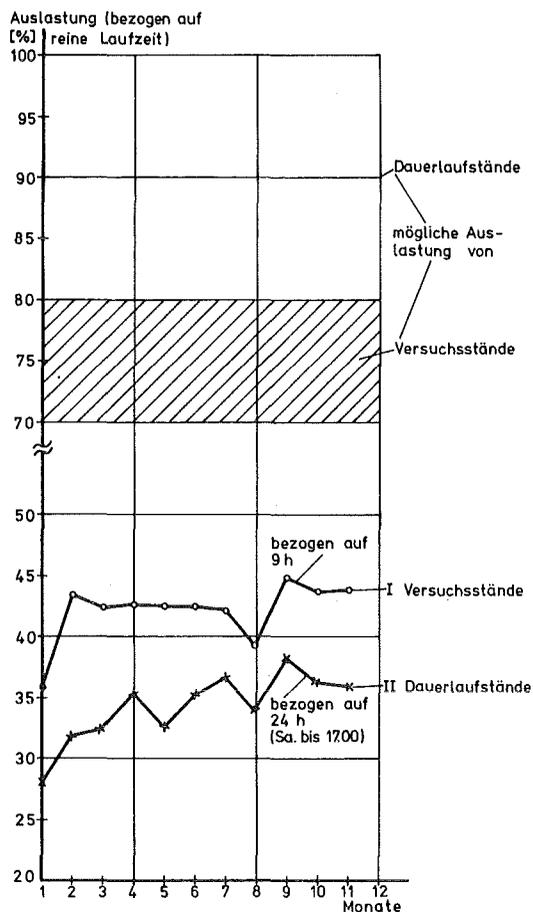


Abb.18: Tatsächliche und mögliche Auslastung von Motorenprüfständen

In der Tabelle 2 sind die Vermessungszeiten zur Bestimmung des Verschleißes für das Beispiel eines 6-Zylinder-Reihenmotors aufgelistet. Es werden Angaben für Gesamtvermessungszeiten, Vermessungen einzelner Baugruppen, sowie für Teilvermessung des Motors (Laufbüchsen, Kolben, Ringe) gemacht [3].

Tabelle 2: Vermessungszeiten zur Bestimmung des Verschleißes an einem 6-Zylinder-Reihenmotor [3]

Baugruppe	Zeit h
Kurbelgehäuse	7 <sup>20</sup>
Laufbüchsen	11 <sup>15</sup>
Kurbelwelle	4 <sup>30</sup>
Pleuelstangen	9 <sup>30</sup>
Kolben + Ringe	16 <sup>30</sup>
Zylinderkopf	9 <sup>30</sup>
Nockenwelle	8 <sup>00</sup>
Kipphebel + Stößel	4 <sup>30</sup>
$\Sigma$	71 <sup>05</sup>
Teilvermessung	ca. 25-30

Die Tabelle 3 zeigt Durchschnittskosten [21].

- a) Kosten pro Laufstunde für Prüfstände verschiedener Bremsleistungen.  
Diese Kosten wurden soweit als möglich aus Platzkostenrechnungen ermittelt. Sie sind mit Streuungen behaftet, die sich aus den unterschiedlichen Gemeinkosten in der Industrie ergeben.
- b) Kosten pro Betriebsstunden für stationäre und mobile RNT-Verschleißmeßanlagen bei verschiedenen Auslastungsgraden.
- c) Aktivierungskosten pro Bauteil bzw. Komponente für Dünnschichtaktivierung.
- d) Aktivierungskosten pro Bauteil für Neutronenaktivierung.
- e) Kosten pro Vermessungsstunde für konventionelle Verfahren.
- f) Stationäre RNT-Meßsystemkosten für 50 h und 1- bzw. 2-Komponentenmessungen einschließlich Dünnschichtaktivierung.

Sämtliche Kostenwerte sind im Jahre 1973 ermittelt und für 1974 korrigiert worden. Das war besonders notwendig für die Kosten pro Prüfstandslaufstunde. Wie Abb.19 zeigt beträgt der Kraftstoffkostenanteil an den Kosten pro Laufstunde bei 100 PS Motorleistung 10%, hat bei 1000 PS bereits 40% erreicht und liegt für 10 000 PS bereits bei ca. 70%.

Beispiel: Kosten/Laufstunde 10 000 PS: ca. 1.600,--DM

Kraftstoffverbrauch/PSh: 0,160 - ca. 0,200 kg

Kraftstoffkosten (Großabnehmer): ca. 0,60 DM/kg

Kraftstoffkosten für 10 000 PS pro Stunde: ca.1.100,--DM

d.f. Kraftstoffkostenanteil pro Laufstunde:

$$\frac{1100}{1600} \cdot 100 \rightarrow \text{ca. } 69\%$$

Gerade für Großmotoren haben sich die innerhalb eines Jahres um 40-50% gestiegenen Kraftstoffkosten enorm auf die Prüfstandskosten ausgewirkt. Da die Kostentendenz für Benzin-, Diesel- und Schwerölkraftstoff mit einiger Sicherheit steigend ist, werden Reduktionen von Prüfstandsstunden in Zukunft noch größere Bedeutung haben.

Tabelle 3: Durchschnittskosten

a)

	Motorleistung [PS]					
	50	100	500	1000	10000	50000
Prüfstands- kosten / h [DM]	150	150-200	270-300	350-400	1600	6000-6500

b) Kosten pro Betriebsstunde für:

- |                              |                    |                              |
|------------------------------|--------------------|------------------------------|
| 1) Stationäres RNT-Meßsystem | ca. 50 - 80 DM/h   | } 50% bzw. 25%<br>Auslastung |
| 2) Mobiles RNT-Meßsystem     | ca. 120 - 150 DM/h |                              |

Aktivierungskosten:

- c) Dünnenschicht:
- |         |              |                         |
|---------|--------------|-------------------------|
| 1-Komp. | ca. 5000 DM  |                         |
| 2-Komp. | ca. 10000 DM | (Kosten hoch angesetzt) |
| 3-Komp. | ca. 15000 DM |                         |

- d) Neutronen: 1 Bauteil ( $G \leq 0,2$  kp) ca. 100 - 500 DM

- e) Kosten pro Vermessungsstunde für konv. Verschleißmeßverfahren:  
ca. 50 DM

f)

Meßsystemkosten [DM] einschl. Aktivierung	Stationäres Meßsystem	
	1-Komp.	2-Komp.
pro 50 h	7500	12500
pro 100 h	10000	15000

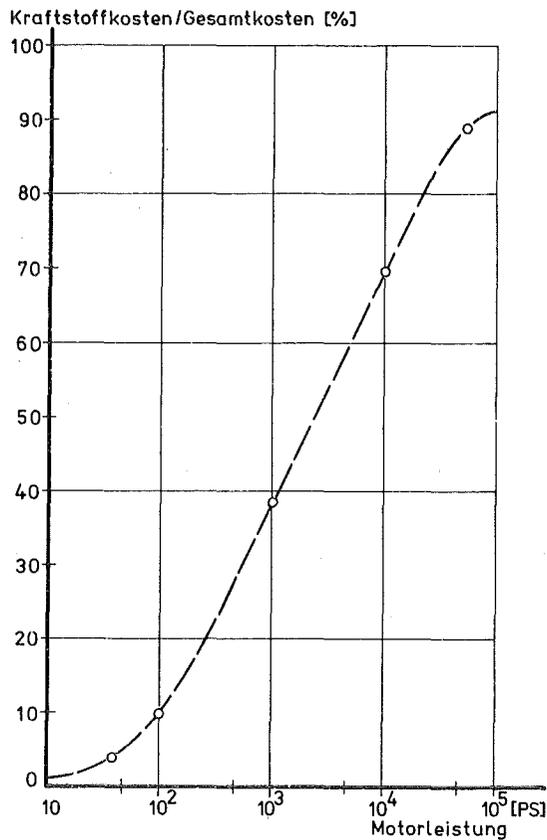


Abb.19: Kraftstoffkostenanteil von Gesamtkosten  
(pro Prüfstandsstunde)

### 3.3.3.2 Beispielhafte Anwendungsmöglichkeiten der betrachteten Verschleißmeßverfahren (Kosten- und Zeitbetrachtungen)

Die folgenden Ausführungen zeigen Kosten- und Zeituntersuchungen für die verschiedenen Verschleißmeßverfahren, wobei in erster Linie als Parameter verschiedene Motorleistungen eingehen. Es wurden im wesentlichen folgende Leistungsstufen untersucht, und zwar:

- |        |           |                   |               |
|--------|-----------|-------------------|---------------|
| 50 -   | 200 PS    | repräsentativ für | PKW-Motoren   |
| 200 -  | 400 PS    | repräsentativ für | LKW-Motoren   |
| 1000 - | 50 000 PS | repräsentativ für | Schiffsdiesel |

Die Kosten für konventionelle Messungen setzen sich zusammen aus 2 Teilvermessungen eines Motors und den Kosten für die Laufzeit. Für die RNT gehen durchschnittliche Aktivierungskosten für a) 1- und b) 2-Komponentenmessungen ein, die Prüfstandskosten, die Kosten des Meßsystems bei mittlerer Auslastung a) stationär, b) mit Meßwagen (vom LIT) sowie durchschnittlichen Nebenkosten für zusätzliche Spezialisten und Strahlenschutz.

Werden konventionell weniger als 10 Teile vermessen und die Motorlaufzeit ist  $\geq 50$  Stunden, können die Vermessungskosten vernachlässigt werden ( $< 5\%$  der Gesamtkosten).

Die RNT, insbesondere das DfV, bringt wegen der um 2 bis 3 Größenordnungen besseren Genauigkeit als die der konventionellen Verfahren und der fortlaufend möglichen Kontrolle des Verschleißes ohne Demontage, eine Zeitraffung in die Motorversuche.

Die Auswirkungen bezüglich der Versuchszeit und der Kosten werden in den Abb.20 - 22 diskutiert. Mit dem DfV läßt sich praktisch für sämtliche Verschleißteile im Motor in Zeiten  $< 5$  h der Verschleiß pro Betriebspunkt ermitteln und mit sicheren Streubereichen quantitativ angeben. Das DDV, das noch grundsätzlich möglich ist, wenn für die Verschleißteilchen kein Transportmedium vorhanden ist (z.B. Dichtleistenverschleiß am Wankelmotor [22]), beansprucht wegen seiner geringeren Empfindlichkeit Meßzeiten bis zu 10 h pro Betriebspunkt.

Die konventionellen Verfahren benötigen außer bei Extremtests (Heißtest) mindestens 50 Laufstunden eines Bauteils, um Verschleiß zu messen (z.B. Kolbenring), meist einige hundert Stunden (z.B. Büchsen, Lager).

Mit dem DfV können so z.B. ungünstigenfalls nach 50 h Aussagen über das Verschleißverhalten von 1 - 3 Bauteilen bzw. Komponenten in 10 Betriebspunkten gemacht werden, was bereits einem Kennfeld entspricht.

Konventionell wären zu ähnlichen Ergebnissen mindestens 500 Laufstunden notwendig; die Ergebnisse weisen jedoch weit aus größere Streuungen auf infolge von 10 Demontagen und Montagen.

Die Zeitunterschiede in den Prüflaufstunden für konventionelle- und RNT-Verschleißmessungen wirken sich direkt auf die entstehenden Kosten aus.

In Abb.20 sind die Versuchskosten logarithmisch über der Anzahl der zu untersuchenden Betriebspunkte aufgetragen für Verschleißmessung einer Komponente. Dabei wurde für die RNT der ungünstigste Fall von 10 h pro Betriebspunkt und für die konventionellen Messungen der günstige Fall von 50 h pro Betriebspunkt angenommen. Zusätzlich wurden die Vermessungskosten vernachlässigt (<5% der Gesamtkosten). Die RNT-Kosten setzen sich zusammen aus Aktivierungskosten, Prüflaufstunden und den Meßsystemkosten. Ein zusätzlicher Parameter in der Abb.20, außer den Meßverfahren, ist die Motorleistung.

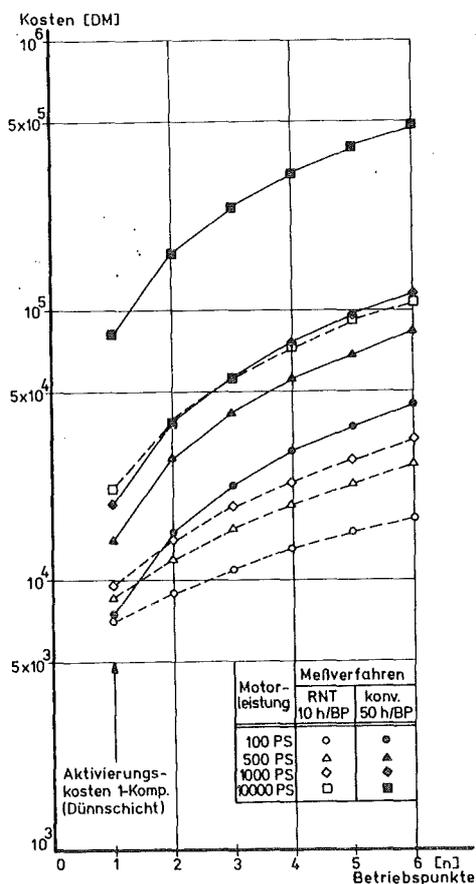


Abb.20: Kosten pro zu untersuchende Betriebspunkte

Die Abb.20 zeigt, daß selbst für geringe Motorleistungen (50 PS) die RNT für einen zu untersuchenden Betriebspunkt und ein Bauteil höchstens genauso viel kostet wie die konventionelle Technik. Je mehr Betriebspunkte zu untersuchen sind, desto kostengünstiger wird die RNT.

Eine entgegengesetzte Tendenz tritt auf bei Betrachtung der Kosten pro Bauteil und fester Anzahl von Betriebspunkten. Mit der RNT können pro Versuchszeit 1, 2 oder 3 Bauteile untersucht werden, wobei sich die Kosten jeweils pro Aktivierung erhöhen. Die Kosten für einen konventionellen Versuch bleiben nahezu gleich, unabhängig ob ein oder zehn Bauteile vermessen werden. Wenn vor Durchführung eines Versuchs die kritischen Betriebspunkte bekannt und beschränkt sind und eine größere Anzahl von Bauteilen pro Versuch zu untersuchen sind, arbeitet die konventionelle Technik relativ günstig, umso günstiger, je mehr Bauteile zu untersuchen sind.

Diese Feststellungen bringt Abb.21 in Kostenkurven über der Anzahl der zu untersuchenden Bauteile zum Ausdruck.

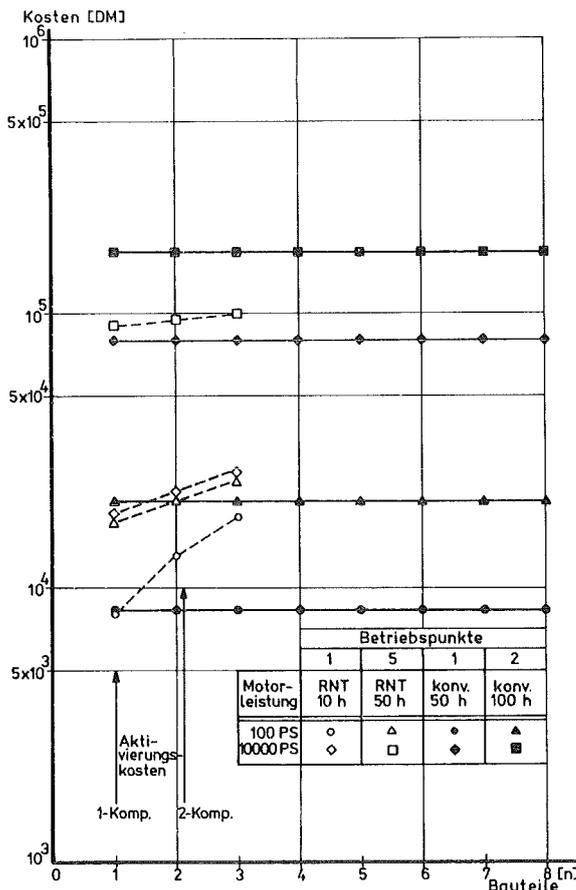


Abb.21: Kosten pro zu untersuchende Bauteile

Jedoch zeigt Abb.21 auch, daß, wenn 5 Betriebspunkte mit der RNT für 3 Komponenten (10 000 PS) untersucht werden, das entspricht 50 Stunden Prüfstandszeit, dieser Versuch ca. 40% billiger ist wie die konventionelle Messung zweier Betriebspunkte (in 100 h) für 1 - 10 Bauteile.

In Abb.22 ist für verschiedene Motorleistungen der Kostenzuschlag für eine 1-Komponenten-RNT-Messung über der Versuchszeit aufgetragen. Die Kurven sind folgendermaßen zu interpretieren: Ein Versuchslauf einer bestimmten Zeitdauer wird durchgeführt. Es ist zu überlegen, welche Informationen während dieses Laufs zusätzlich gewonnen werden können, unter Verwendung eines 1-Komponenten-Meßsystems im Dauereinsatz.

Die Kurven in Abb.22 bringen den jeweiligen prozentualen Kostenzuschlag für RNT-1-Komponenten-Messungen zur gewählten Prüfstandszeit zum Ausdruck. Der prozentuale Zuschlag wird pro Zeit und mit steigender Motorleistung kleiner.

Die Abb.22 darf jedoch nicht zu dem Trugschluß führen für definierte Versuchsziele die Kosten der RNT mit den konventionellen Kosten gleicher Prüflaufzeit zu vergleichen.

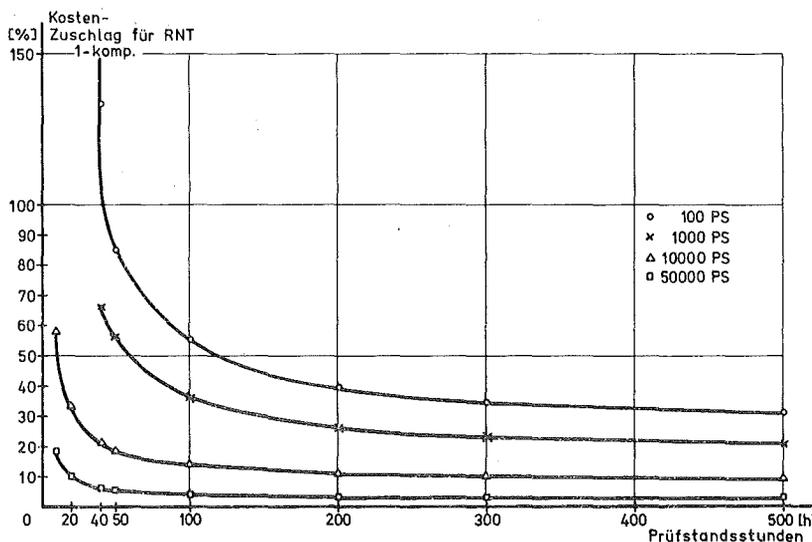


Abb.22: RNT-Kostenzuschlag (1-Komp.) pro Versuchszeit auf dem Prüfstand

### 3.3.4 Zusammengefaßte Ergebnisse

Aus allen diesen Aussagen läßt sich folgendes herausstellen:

1. Die RNT wird immer dann kostengünstig sein, wenn mehrere Betriebspunkte bzw. Parameter untersucht werden sollen.
2. Die konventionelle Technik wird im Mittel günstig sein, wenn wenig Betriebspunkte bzw. Parameter, aber viele Teile in einem Versuch zu untersuchen sind.
3. Diese Aussagen in 1. und 2. sind jedoch abhängig von der Leistung des Motors, den zu untersuchenden Teilen selbst, sowie den Randbedingungen der jeweiligen Problemstellungen.

Zusammenfassend kann gesagt werden: Die RNT kann, unabhängig von der Motorleistung, mit relativ kurzen Motorlaufzeiten und damit geringen Kosten Aussagen über das Verschleißverhalten von bestimmten Bauteilen liefern. Sie bringt diese Aussagen fortlaufend, jedoch nur für höchstens 3 Komponenten, d.h., Bauteile oder Meßstellen. Die konventionelle Meßtechnik benötigt zwar lange Laufzeiten, gestattet dann aber, eine Vielzahl von Bauteilen zu vermessen, liefert aber nur Gesamtverschleißmeßwerte.

Infolge der geringen Anzahl von Prüfstandsstunden pro Meßwert, die um 1 bis 2 Größenordnungen (maximal 3) unter denen der konventionellen Verfahren liegen, liefert die RNT

- Kenntnisse von Verschleiß und Verschleißratenänderungen bei einzelnen Betriebspunkten und Parametern, mit Kennfeldern für einzelne Bauteile (z.B. verschiedener Konstruktionsarten bzw. Werkstoffe).

Durch gezielten Einsatz der RNT könnten Entwicklungszeiten verkürzt und Kosten verringert werden, z.B. infolge von

- Schwachstellenanalysen (Konstruktion, Werkstoffe, Betriebsgrößen)
- Verbesserung von Prüfprogrammen
- Optimierung von Einlaufprogrammen
- Schmierstoffoptimierung

Beide Arten von Verschleißmeßverfahren sind durch unterschiedliche Kosten, Durchführungszeiten, Risiken und Nutzen gekennzeichnet und dazu noch sehr unterschiedlich in ihrer Aussagekraft für die verschiedenen Problemstellungen mit ihren Randbedingungen. Ziel dieser Arbeit ist eine technisch-wirtschaftliche Analyse der verschiedenen Verfahren zu liefern. Dies soll nach all den bisherigen Bestandsaufnahmen und Folgerungen in den nächsten Kapiteln behandelt werden.

4. ENTWICKLUNG EINES SYSTEMS ZUR  
TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFT-  
LICHEN BEWERTUNG VON VER-  
SCHLEISSMESSVERFAHREN DER  
KONVENTIONELLEN UND DER RA-  
DIONUKLIDTECHNIK

4.1 Allgemeine Aussagen zur Wissenschaftsmethodik

4.1.1 Zum ökonomischen- und Optimierungs-Prinzip [23,24,25,26]

In den bisherigen Ausführungen wurden die Verschleißprobleme analysiert, die möglicherweise auftreten können. Auf die Verschleißmeßverfahren zur Lösung dieser Probleme wurde eingegangen und dabei auf ihre technischen Leistungsfähigkeiten hingewiesen. Exemplarisch wurden Kosten und Dauer zur Lösung von Verschleißproblemen mit verschiedenen Verfahren dargestellt.

In diesem Kapitel wird nun die Entwicklung eines Systems erläutert, das es gestatten soll, für in Frage kommende Verschleißproblemstellungen das jeweils vom technischen und wirtschaftlichen Standpunkt her optimale Verfahren auszuwählen.

Ziel einer Wirtschaftlichkeitsanalyse ist es, alle Faktoren, die die wirtschaftliche Zweckmäßigkeit des geplanten oder vergangenen (Betriebs)-Geschehens beeinflussen, aufzuzeigen und für eine Beurteilung aufzubereiten. Allgemeinheitliche Grundlage für die Beurteilung der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit ist dabei die Dreistufigkeit einer betriebswirtschaftlichen Analyse:

1. Das Rationalprinzip

Das Rationalprinzip beinhaltet die Zweckmäßigkeit des Einsatzes aller Mittel, d.h. den planvollen und systematischen Einsatz.

2. Das ökonomische Prinzip

Das ökonomische Prinzip bedingt den erfolgreichen Einsatz und Umgang mit finanziellen Mitteln, im weitesten Sinn gemessen

an allgemeinen Management-Konventionen, in Richtung des "Bankier-Denkens".

### 3. Das Optimierungsprinzip

Das Optimierungsprinzip erstreckt sich heute auf finanzielle und nicht-finanzielle Größen, bei denen es im allgemeinen Sinn um die Wahl der besten Alternative unter allen möglichen handelt.

Wenn die mathematische Formulierung und Behandlung des Problems möglich ist, dann muß die Zielfunktion maximiert bzw. minimiert werden.

Falls dies nicht möglich ist, dann sind wenigstens die Auswahlkriterien eindeutig zu definieren, zumindest in Richtung einer Nutzwertanalyse. -

Zur Realisierung in der Praxis gelten jedoch folgende Einschränkungen:

1. In der Industrie gibt es meist kein allgemein verbindliches Zielsystem, einzelne Entscheidungsträger handeln nach ihren subjektiven Zielsystemen, die nur teilweise durch Kommunikation aufeinander abgestimmt sind. -

In dieser Arbeit kann dieses Stadium nur überwunden werden, wenn die Entscheidungskriterien eindeutig definiert werden und deren Akzeptierung sichergestellt wird.

2. Man hat es häufig mit multidimensionalen Systemen zu tun, die man einer globalen Optimierung nur dadurch zuführen kann, daß alle Werte auf dimensionslose Skalen transformiert werden.
3. Konsequentes Handeln nach dem Optimierungsprinzip erfordert uneingeschränkte Transparenz des betrieblichen Geschehens, insbesondere die Kenntnisse aller Einflußfaktoren in jetziger

und zukünftiger Größe, sowie ihre Wirkungsmechanismen. -

Auch bei der wissenschaftlichen Behandlung läßt sich dieses Stadium nicht gänzlich erreichen. Man muß sich daher auf die relevanten Einflußgrößen konzentrieren. Diese zu bestimmen ist in vielen Fällen nur durch Expertenurteil möglich. Es geht letztlich darum, der Realität gegenüber die richtigen Fragen zu stellen. In günstig gelegenen Fällen können hier durch Korrelationsrechnungen unterstützende Ergebnisse für die Hauptzusammenhänge gewonnen werden. Sehr viel häufiger begnügt man sich jedoch damit statistisch nachzuweisen, daß aufgetretene Unterschiede systematischer und nicht zufälliger Natur sind, z.B.  $\chi$ -Quadrat-Test.

4. Es geht letztlich um das Streben nach Optimierung. Das bedeutet, daß sämtliche Handlungsalternativen untersucht und miteinander verglichen werden müßten, um die beste Alternative auswählen zu können. Derartige wirtschaftliche Analysen und die damit entstehenden z.T. erheblichen Kosten müssen in einem sinnvollen Verhältnis zu den damit erreichbaren Ergebnisverbesserungen stehen.

#### 4.1.2 Qualität und Quantität

In den Realwissenschaften ist ein Problem zunächst stets qualitativ zu beschreiben und verbal zu definieren und daran anschließend möglichst auch quantitativ zu definieren. Die Quantifizierung setzt Meßbarkeit (d.h.: Vergleich mit einem Maßstab) und/oder Zählbarkeit voraus. Im sozialwissenschaftlichen Bereich der Realwissenschaften, in dem menschliches Verhalten und menschliche Wertvorstellungen eine entscheidende Rolle spielen, ist die Quantifizierung außer durch die Zählung vergleichbarer Erscheinungen häufig auch an Beurteilungsskalen gebunden, die auf der menschlichen Fähigkeit beruhen, Unterschiede im Sinne von "mehr - weniger" bzw. "besser - schlechter" zu erkennen.

Aus dieser Sicht erscheint es daher zumindest für die Realwissenschaften als ein Scheinproblem, einen prinzipiellen Unterschied zwischen qualitativen und quantitativen Methoden machen zu wollen. Die richtige Aufgabenstellung lautet vielmehr: Die realwissenschaftlichen Fragestellungen soweit wie möglich einer quantitativen Behandlung zugänglich zu machen. Unterschiede bei diesem Bemühen betreffen letztlich nur die statistische Sicherheit der Aussagen. Im allgemeinsten Sinne enthalten realwissenschaftliche Aussagen zumindest durch die gewählte Fragestellung Werturteile - die prinzipiell subjektiv beeinflußt sind - und im sozialwissenschaftlichen Bereich kann sich das auch auf die Beurteilungsskalen erstrecken. In allen Fällen ist die Interpretation der Ergebnisse und noch mehr die daraus abgeleiteten Prognosen subjektiv gefärbt. -

Zusammengefaßt muß festgestellt werden, daß in den Realwissenschaften qualitative und quantitative Ansätze ergänzend zusammenwirken und subjektive Werturteile - allerdings in unterschiedlichem Ausmaß - eingehen.

Bei einer Vielzahl von Problemen, bei denen Alternativen zur Auswahl stehen, darf der Grad der Quantifizierung, allein schon vom Zeit- und Geldaufwand, nicht zu weit getrieben werden.

Modelle müssen für die jeweiligen Probleme ausgewählt und formalisiert werden, um für jede Bewertungsstufe verwendbar zu sein.

Der Bewertungsprozeß kann z.B. in folgenden Stufen ablaufen:

1. Entwurf eines Modell-Konzeptes durch einen Experten, der das Anwendungsfeld beherrscht.
2. Auswahl geeigneter Experten zur Kontrolle des Entwurfs.
3. Testen des Entwurfs durch Expertengruppen.
4. Gegebenenfalls Modifikation des Entwurfs zum anwendungsgerechten Strukturmodell.

5. Überprüfung des Strukturmodells am Ergebnis der Behandlung von Praxisfällen.

4.1.3 Methodische Entscheidungshilfen zur Auswahl der besten Alternative

4.1.3.1 Sogenannte "einfache Entscheidungsmöglichkeiten"

Auf der ersten Entscheidungsstufe wird lediglich festgestellt, ob die vereinbarten Mindestanforderungen an die Alternativen erfüllt werden. Es erfolgt ein Ausscheiden aufgrund von Restriktionen. Sind die Alternativen ausgesiebt, welche die Restriktionsanforderungen nicht erfüllen konnten, können von den verbleibenden Möglichkeiten jene ausgesondert werden, deren Ausprägungen nicht sehr günstig ausfallen. Hier bedient man sich oft zeichnerischer Verfahren wie ("Profile-Chart" von Miller [27,28] (Abb.23) oder Spinnendiagrammen [26] (Abb.24,25), die auch im Marketing verwendet werden.

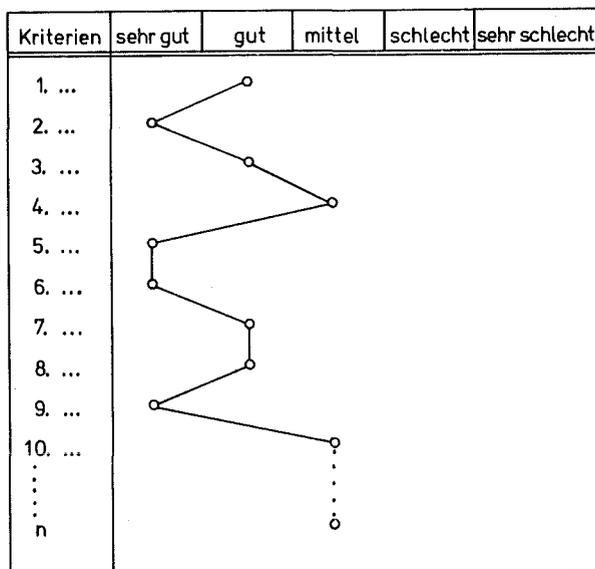


Abb.23: Bewertungsprofil nach Miller [27] ungewichtet

Ausgehend von 5 Ausprägungsstufen bewertet Miller die Profile nach ihrem Verlauf. Verlaufen die Graphen dominant im schlechten oder sehr schlechten Bereich, ist das eine "Nein-Aussage". Sind sie überwiegend im durchschnittlichen Bereich bedeutet das "Stop and wait". Eine "Ja-Aussage" wird nur für Alternativen mit guten oder sehr guten Ausprägungen gemacht, wobei die Einschränkung gilt, daß nebensächliche Faktoren auch schlechter ausfallen dürfen.

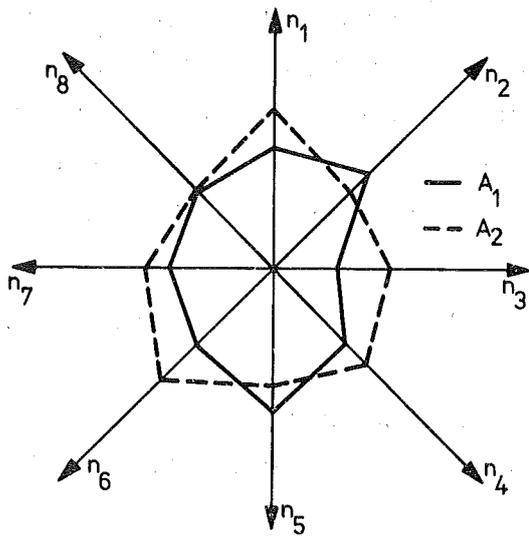


Abb.24: Ungewichtetes Wertprofil als "Spinnendiagramm" [26]  
 $n_i$ - $n_8$ : Kriterien  
 $A_1, A_2$ : Wertprofile der Alternativen

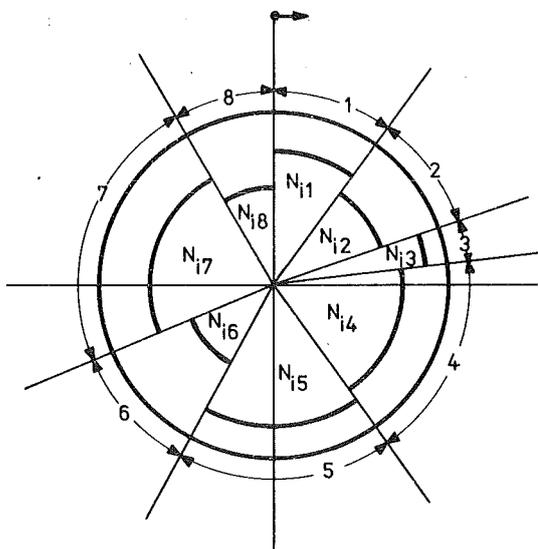


Abb.25: Gewichtetes Wertprofil als "Spinnendiagramm" [26]  
 1-8: Kriterien  
 Winkel der Sektoren: Gewichtungen  
 $N_{i1}$ - $N_{i8}$ : Flächeninhalte<sup>18</sup> der Sektoren entsprechen den gewichteten Zielwerten (Nutzwerten)

#### 4.1.3.2 Punktbewertungsverfahren

Die weiteren Modelle, anwendbar in der nächsten Stufe, bestimmen durch eine Punktbewertung eine Reihenfolge der Alternativen. Man nennt diese Modelle auch "Scoring-Models" [29]. Es wird unterschieden zwischen Bewertungsverfahren ohne und mit besonderer Berücksichtigung der relativen Abstufung der Kriterien bzw. Faktoren. Von der ersten Gruppe sei hingewiesen auf die Verfahren von "Mottley" und "Newton" [30], Garguilo, Hanoach, Hertz und Zang [28], die in der Literatur ausführlich beschrieben sind.

Die Verfahren der 2. Gruppe berücksichtigen die unterschiedlichen Gewichtungen der Kriterien und Faktoren. Hier seien die Verfahren von Hirsch [31], O'Meara [32] sowie von Dathe [33], Dean und Nishry [29] erwähnt. Hirsch gewichtet in seinen Ausführungen nur die Kriterien. O'Meara errechnet die Erwartungswerte der Faktoren, bewertet sie und gewichtet das Kriterium.

Dathe, Dean und Nishry erklären, wie die Gewichtungsfaktoren entstehen können, wobei Dathe den Gewichtungsvorgang innerhalb von 2 Kriterien bei einstimmiger Meinung, Dean und Nishry den Gewichtungsvorgang durch mehrere Personen mit verschiedenen Meinungen beschreiben.

Das für diese Arbeit interessanteste und am vielversprechendsten erscheinende Modell ist das sogenannte Nutzwertanalysemodell von Zangenmeister [26]. Da es im wesentlichen später verwendet wird, soll an dieser Stelle eine ausführliche Beschreibung erfolgen, die sich im wesentlichen nach dem Autor selbst richtet.

#### 4.1.3.3 Methodik der Nutzwertanalyse [26]

Definition: Nutzwertanalyse ist die Analyse einer Menge komplexer Handlungsalternativen mit dem Zweck, die Elemente dieser Menge entsprechend den Präferenzen des Entscheidungsträgers bezüglich eines multidimensionalen Zielsystems zu ordnen. Die Abbildung dieser Ordnung erfolgt durch die Angabe der Nutzwerte  $N_i$  (Gesamtwerte) der Alternativen  $A_i$ .

Diese Definition sagt über den Wertinhalt und das Wertmaß nichts aus. Sie charakterisiert lediglich die Ziel- und Präferenzbezogenheit des Nutzenbegriffs. Das Wertmaß muß durch eine geeignete Meßoperation und der Wertinhalt durch ein individuelles Wertsystem von Fall zu Fall festgelegt werden. Die Lösung der damit verbundenen Probleme ist Hauptaufgabe der Nutzwertanalyse.

Nach dieser Definition verlangt eine systematische Nutzwertanalyse folgende Schritte:

- Bestimmung der situationsrelevanten Ziele bzw. Zielkriterien  $k_j$ ,  $j = 1(1) m$
- Bestimmung der zielrelevanten Konsequenzen, d.h. der Zielerträge  $k_{ij}$ , der Alternativen  $A_i$ ,  $i = 1(1) n$
- Bewertung - d.h. präferenzgerechte Ordnung - der Alternativen aufgrund ihrer Zielerträge.

In der Abb.26 ist die Logik eines Ansatzes zur Lösung des Bewertungsproblems mit Hilfe der Nutzwertanalyse dargestellt.

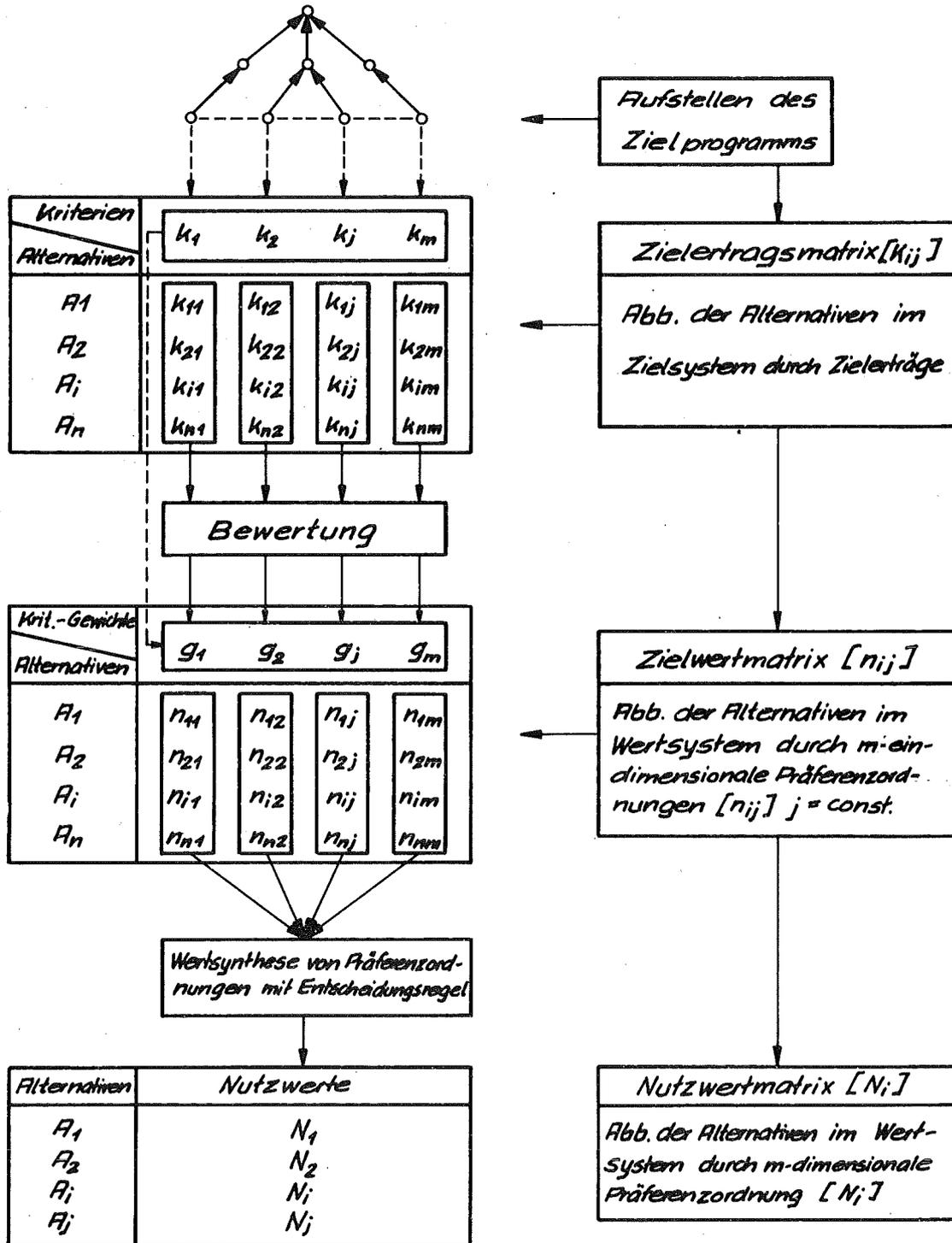


Abb.26: Logik der Nutzwertanalyse (NWA) [26]

Von den Gliedern der untersten Ebene des Zielprogramms ausgehend (Zielkriterien  $k_j$ ), werden die Alternativen  $A_i$  durch explizite Angabe ihrer Zielerträge  $k_{ij}$  in der Zielertragsmatrix  $k_{ij}$  dargestellt. Die Elemente  $k_{ij}$  sind als numerische bzw. verbale Beschreibung von Zielerträgen zu verstehen.

Auf der nächsten Ebene werden die Kriteriengewichte  $g_i$ ,  $i = 1(1) m$  von einem Expertenteam subjektiv festgestellt. Durch diese subjektiven eindimensionalen Werturteile wird jedem Zielertrag  $k_{ij}$  ein Zielwert  $n_{ij}$  zugeordnet, und zwar so, daß der Zielwert die relative Stellung der Alternative  $A_i$  in der Wertschätzung des Entscheidungsträgers im Vergleich zu den übrigen Alternativen bezüglich des Kriteriums  $k_j$  zum Ausdruck bringt.

(Die  $m$  Spalten der Zielertragsmatrix werden durch direkte Beurteilung in  $m$  eindimensionale Präferenzordnungen transformiert, dargestellt durch die Spalten der Zielwertmatrix  $n_{ij}$   $j = \text{const.}$ ).

Die Alternativen sind damit im Wertsystem durch  $n \cdot m$  Zielwerte abgebildet. Die Elemente  $n_{ij}$  beschreiben jeweils den ungewogenen Teilnutzen der Alternative  $A_i$  bezüglich des Zielkriteriums  $k_j$ . Sie können verbal durch Rangplätze oder durch zugeordnete Punktzahlen ausgedrückt sein. Man unterscheidet nominale, ordinale bzw. kardinale Bewertung.

Die Zielwerte  $n_{ij}$  einer Alternative  $A_i$  werden mit Hilfe einer im Einzelfall vorzugebenden Entscheidungsregel und Maßgabe der den Zielkriterien  $k_j$  subjektiv beigemessenen relativen Bedeutungen zum Nutzwert  $N_i$  zusammengefaßt. Neben der Gewichtung der Zielkriterien erfordert die Wertsynthese eine formale Regel, die vorschreibt, wie aus den  $m$  Spalten der Zielwertmatrix  $n_{ij}$  die einspaltige Nutzwertmatrix  $N_i$  ermittelt werden kann.

Soweit eine knappe Darstellung des Prinzips der Nutzwertanalyse nach Zangenmeister [26].

#### 4.2 Detaillierte Zielformulierung

Das zu entwickelnde System soll folgende Aufgabenstellung beantworten:

"Auswahl der techn.-wirtschaftl. optimalen Alternative aus y-techn. durchführbaren Alternativen von Verschleißmeßverfahren zur Lösung eines bestimmten Verschleißproblems x in der Motorenentwicklung"

Diese Aufgabenstellung läßt sich auf folgende 3 Stufen aufteilen:

1. Aussondern von Alternativen, die in erster Linie technischen Restriktionen, aber auch zeitlichen bzw. kostenmäßigen Einschränkungen nicht genügen.
2. Die verbleibenden Alternativen durchlaufen auf der nächsten Stufe ein Nutzwertanalysesystem.
3. Die für die RNT günstigen Problemstellungen werden gefunden. Über eine detaillierte Investitionsrechnung (Kapitalrückfluß) für einen zu erwartenden Auslastungsgrad kann eine Entscheidungsvorbereitung zum Einsatz eines RNT-Meßsystems gegeben werden.

#### 4.3 Allgemeiner Aufbau des Bewertungssystems (Abb.27)

Es werden folgende Mengen definiert:

1. x sei die Menge der Verschleißprobleme.
2. y sei die Menge der Verschleißmeßverfahren. Es erfolgt eine Beschränkung auf konventionelle- und RNT-Verfahren.
3. Es gibt eine weitere Menge z von Möglichkeiten der organisatorischen Abwicklung von Verschleißmessungen. Sie sind hier auf die RNT bezogen, wobei zu beachten ist, daß  $z_4$  erst eine Zukunftsmöglichkeit darstellt.

Diese z-Arten sind:

$z_1$  = Gesamt-Fremdauftrag (Motorenbaufirma vergibt jeweils Auftrag an Meßsystembetreiber, z.B. Labor für Isotopentechnik).

$z_2$  = Aktivierungsauftrag + Meßsystembereitstellung

$z_3$  = Aktivierungsauftrag

$z_4$  = Gesamtbearbeitung in Industrie

Aus diesen 3 Mengen ergibt sich durch Kombinatorik eine Menge von Alternativen der Anwendungen von y-Verschleißmeßverfahren für x-Verschleißprobleme auf z-Arten. Diese Menge stellt alle theoretischen Alternativen dar und wird mit  $a_{xyz}$  bezeichnet.

Diese theoretisch möglichen Alternativen sind zunächst auf die praktisch durchführbaren zu reduzieren, auf folgendem Weg: Die Industrie hat x-Verschleißprobleme. Für jedes Problem sollen geeignete Verschleißmeßverfahren gefunden werden. Von der Industrie wird eine konventionelle Alternative entwickelt. Ist das nicht möglich, verbleiben höchstens RNT-Alternativen, die dann nur untereinander verglichen werden können. Außerdem sollen auch Kosten- und Zeitlimits angegeben werden, Randbedingungen der techn. Problemstellung, die zur Ausscheidung von Alternativen führen können. Zum Problem der techn. Durchführbarkeit mit RNT-Alternativen wurde eine sogenannte "Checkliste" erstellt, die von der Industrie für die jeweiligen Problemstellungen zu bearbeiten ist. Die erhaltenen Daten werden in ein Abfrageprogramm eingegeben, das Aussagen liefert bezüglich der technischen Durchführbarkeit des Problems mit y-RNT-Meßverfahren auf z-Arten der Abwicklung. Damit ist der 1. Schritt erreicht: "Reduktion auf praktisch durchführbare Alternativen". Dieser reduzierte Satz von Alternativen ist für jeweils ein bestimmtes x:

$x^A_{yz}$

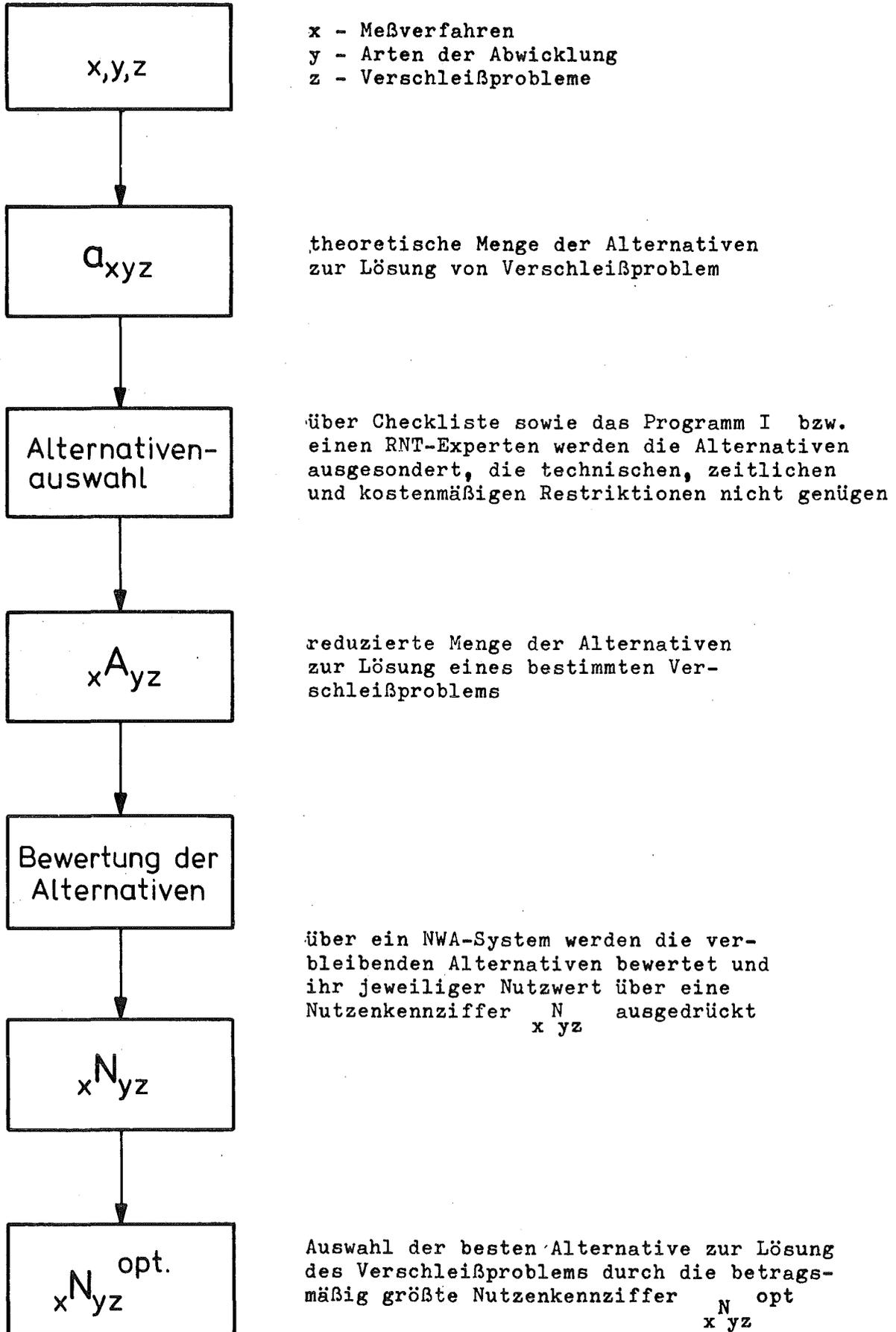


Abb.27: Allgemeiner Aufbau des Bewertungssystems

Das nächste Ziel, das es zu erreichen gilt, ist die Auswahl der vom Nutzen her gesehen optimalen Alternative  $x^{A_{yz}}_{opt.}$ , die durch die dimensionslose Nutzenkennziffer  $x^{N_{yz}}_{opt.}$  beschrieben wird. Um dieses Ziel zu erreichen wird folgender Weg beschritten:

Zunächst wird eine Zielanalyse durchgeführt:

0. Ebene: Auswahl des vom technischen und wirtschaftlichen Nutzen her gesehen optimalen Verfahrens.

1. Ebene: Unterteilung in Teilziele

- a) Kosten
- b) Zeiten
- c) Techn. Leistungsfähigkeit
- d) Unternehmenspolitische Kriterien

n.Ebene: Kriterien von 1 - m

Die Teilziele werden bis zu einer n-ten Ebene derart aufgegliedert, daß die dort vorhandenen Ziele als operationale Kriterien für ein Nutzwertanalysesystem verwendet werden können. Mit der Annahme, daß für jedes z die gleiche technische Leistungsfähigkeit gilt, können sich jedoch Kosten, Dauer und unternehmenspolitische Kriterien verändern, d.h. die technische Leistungsfähigkeit ist konstant für  $x^{A_z}$ .

Im einzelnen werden also folgende Punkt bearbeitet:

1. Erstellung der Kriterien.

Die Kriterien sollen möglichst vollständig und unabhängig voneinander sein.

2. Festlegung der Bewertungsmaßstäbe und den Präferenzfunktionen für jedes Kriterium.

Kriterien, Bewertungsmaßstäbe und Präferenzfunktionen werden in Zusammenarbeit mit Experten aus der Industrie fest-

gelegt, so daß es möglich sein wird, sie allgemein anzuwenden für x-Probleme. Dies gilt für eine feste Zeitspanne, z.B. ein Jahr. Im übrigen sind die Präferenzfunktionen nicht festgeschrieben, sondern dynamisch. Sie werden nur für ein Zeitintervall festgelegt.

3. Für jeweilige Problemstellungen mit Randbedingungen müssen Gewichtungen der Kriterien vorgenommen werden. Diese Gewichtungen werden exemplarisch an Beispielen in Zusammenarbeit mit der Industrie vorgenommen. Wenn das System in der Industrie praktisch angewendet werden soll, müssen die Gewichtungen von der Industrie selbst vorgenommen werden. Ein Rechenprogramm, in dem die Kriterien und Präferenzfunktionen als dynamische Werte in einer Datenbank vorhanden sind, wird mit den jeweiligen Eingabewerten für konkrete Probleme sowie den Gewichtungen Nutzenkennziffern ausdrucken, aus denen die optimale Alternative  $x_{yz}^A$  <sup>opt.</sup> über ihre Nutzenkennziffer  $x_{yz}^N$  <sup>opt.</sup> beschrieben wird.

#### 4.4 Stufen des Systems

##### 4.4.1 Checkliste zur technischen Durchführbarkeit von Verschleißproblemen mit RNT

Nachdem im vorhergehenden Abschnitt allgemein die Vorstellung der "System-Entwicklung" erläutert wurde, wird jetzt auf die einzelnen Schritte eingegangen.

Die Frage der technischen Durchführbarkeit bzw. der technischen Lösungsmöglichkeit eines x-Verschleißproblems mit einem RNT-Verfahren wurde folgendermaßen behandelt:

Zunächst wurde der Entwurf eines Fragenkatalogs erstellt, der alle wesentlichen Punkte enthält, die

- a) ein Verschleißproblem charakterisieren
- b) eine genaue Zielbeschreibung zur Lösung des Verschleißproblems liefern
- c) das Verschleißproblem daraufhin überprüft, ob es mit einem, bzw. beiden RNT-Meßverfahren zu lösen ist.

Dieser Katalog diene der Überprüfung der Vollständigkeit und einer vorzunehmenden Strukturierung der Fragen.

Aus diesem Fragenkatalog wurde nach Testläufen bei einzelnen Experten der Entwicklungsabteilungen von Motorbau-firmen eine "Checkliste" vorprogrammierter Form erstellt (siehe Anhang I). Diese "Checkliste" enthält nach Bearbeitung für ein bestimmtes Verschleißproblem die notwendigen Daten zur Überprüfung der technischen Lösungsmöglichkeit des Problems mit RNT-Methoden.

#### 4.4.2 Rechenprogramm zur Auswertung der "Checkliste"

Die Liste ist manuell auswertbar von einem RNT-Experten. Es erschien jedoch sinnvoll, die Auswertung der Checkliste soweit wie möglich zu formalisieren, so daß sie in Zukunft direkt in der Industrie vorgenommen werden kann. Hierzu soll ein Programm zum Testen der technischen Durchführbarkeit dienen, dessen Struktur folgendermaßen aussieht (Abb.28):

1. Es enthält eine Datenbank, die im wesentlichen von Kronenberger [34] entwickelt wurde. In ihr sind die Daten über aktivierbare Werkstoffe sowie gesetzliche Verordnungen über zulässige Strahlungsbelastungen enthalten.
2. Als Eingabedaten erhält das Programm die Antworten aus der Checkliste.
3. Es wird folgende Global-Aussagen liefern über:
  - a) Durchführbarkeit
  - b) Bedingte Durchführbarkeit mit RNT-Meßverfahren
  - c) Nicht-Durchführbarkeit

4. Es wird spezielle Aussagen liefern über:

- a) verwendbare Meßnuklide
- b) deren Halbwertszeiten
- c) Tiefenverteilungen der Nuklide und ihre Eindringtiefen
- d) Gesamtaktivitäten nach der Bestrahlung
- e) Genauigkeiten und Nachweisgrenzen der Meßverfahren
- f) Kosten der Aktivierungen
- g) Anzahl der Prüfstandsstunden zur Lösung bestimmter Probleme für geforderte Genauigkeiten
- h) evtl. Restriktionen durch gesetzliche Bestimmungen.

Das Test-Programm ist in der universell gebräuchlichen Sprache PL I geschrieben. Dadurch ist es möglich, zukünftig von den potentiellen Benutzern auf deren Datenverarbeitungsanlagen gebraucht zu werden. In der folgenden Abb.29 ist ein grobes Flußdiagramm dieses Programms dargestellt. Das Programm selbst ist am Labor für Isotopentechnik der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe vorhanden und ist im Stadium erster Testläufe.

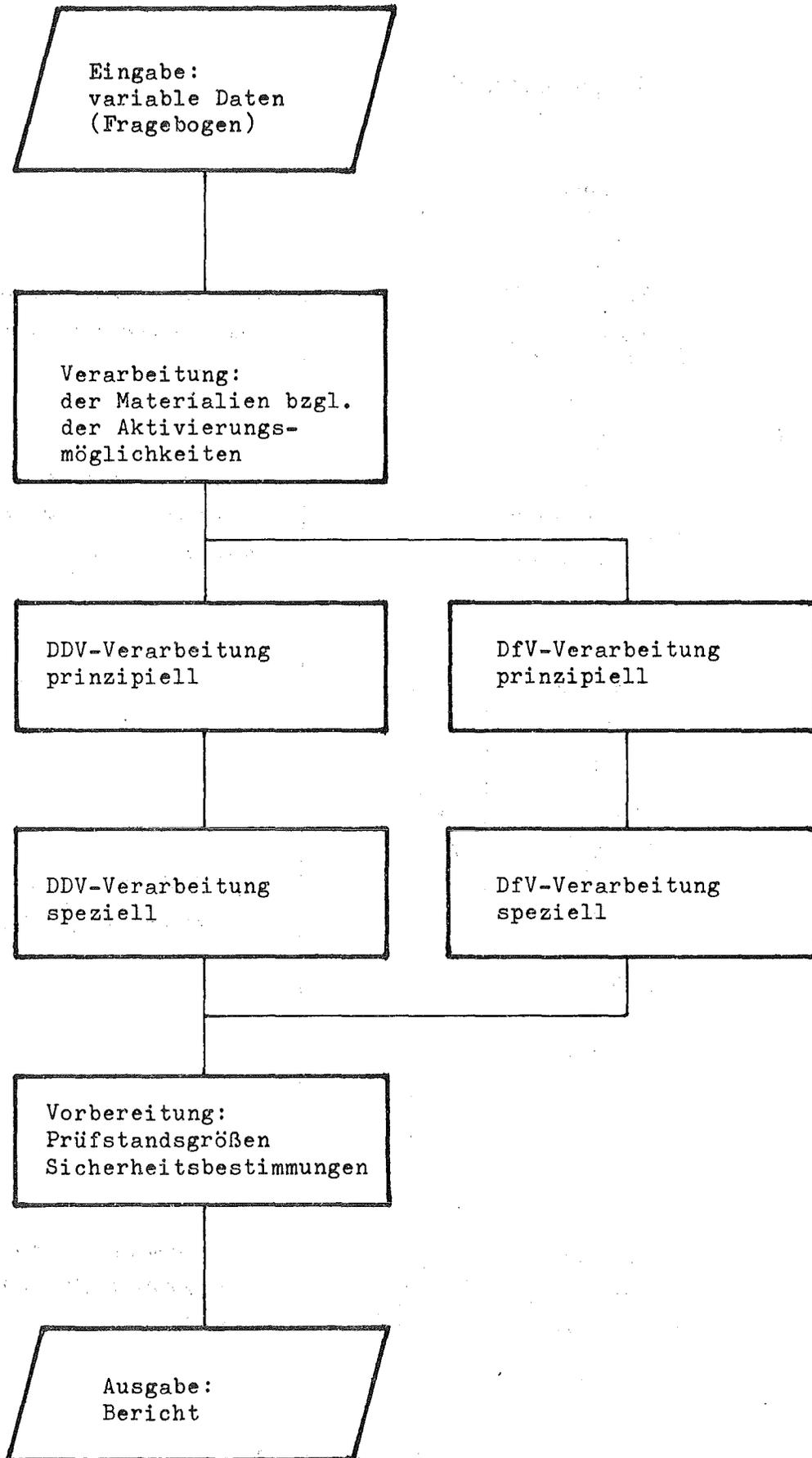


Abb.28: Rechen-Programm-Struktur (zur Auswertung der "Checkliste")

Programmablauf - 1

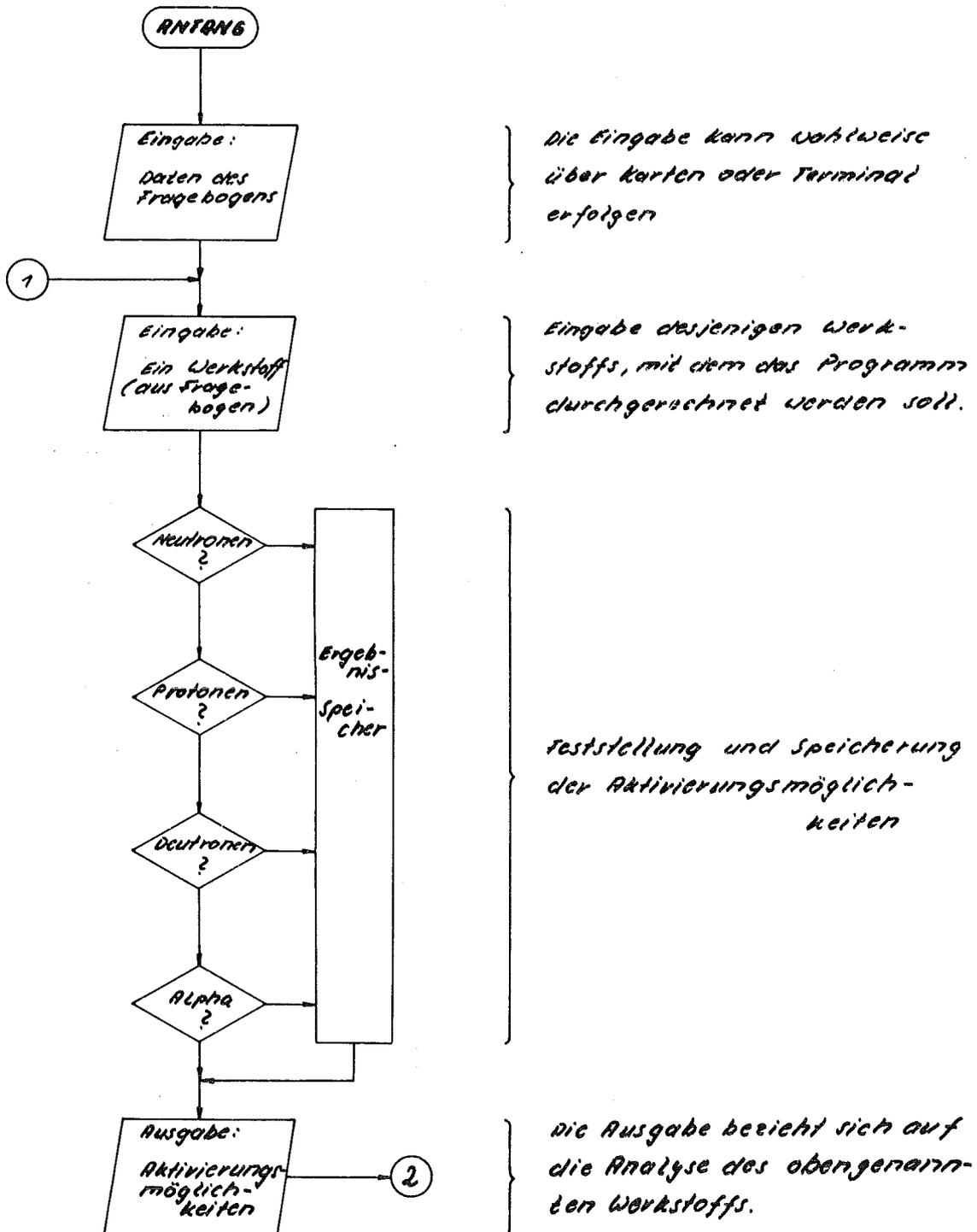
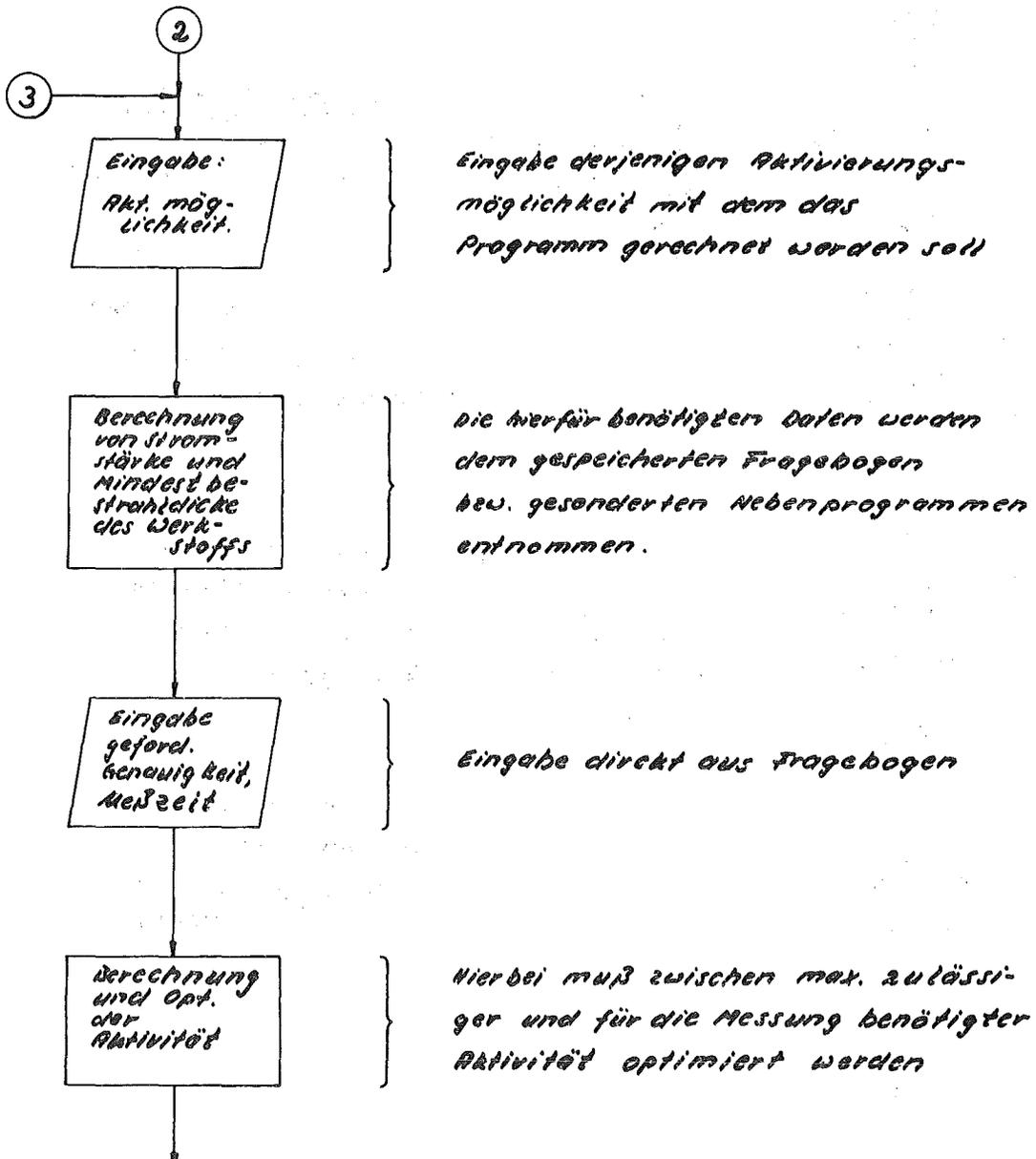
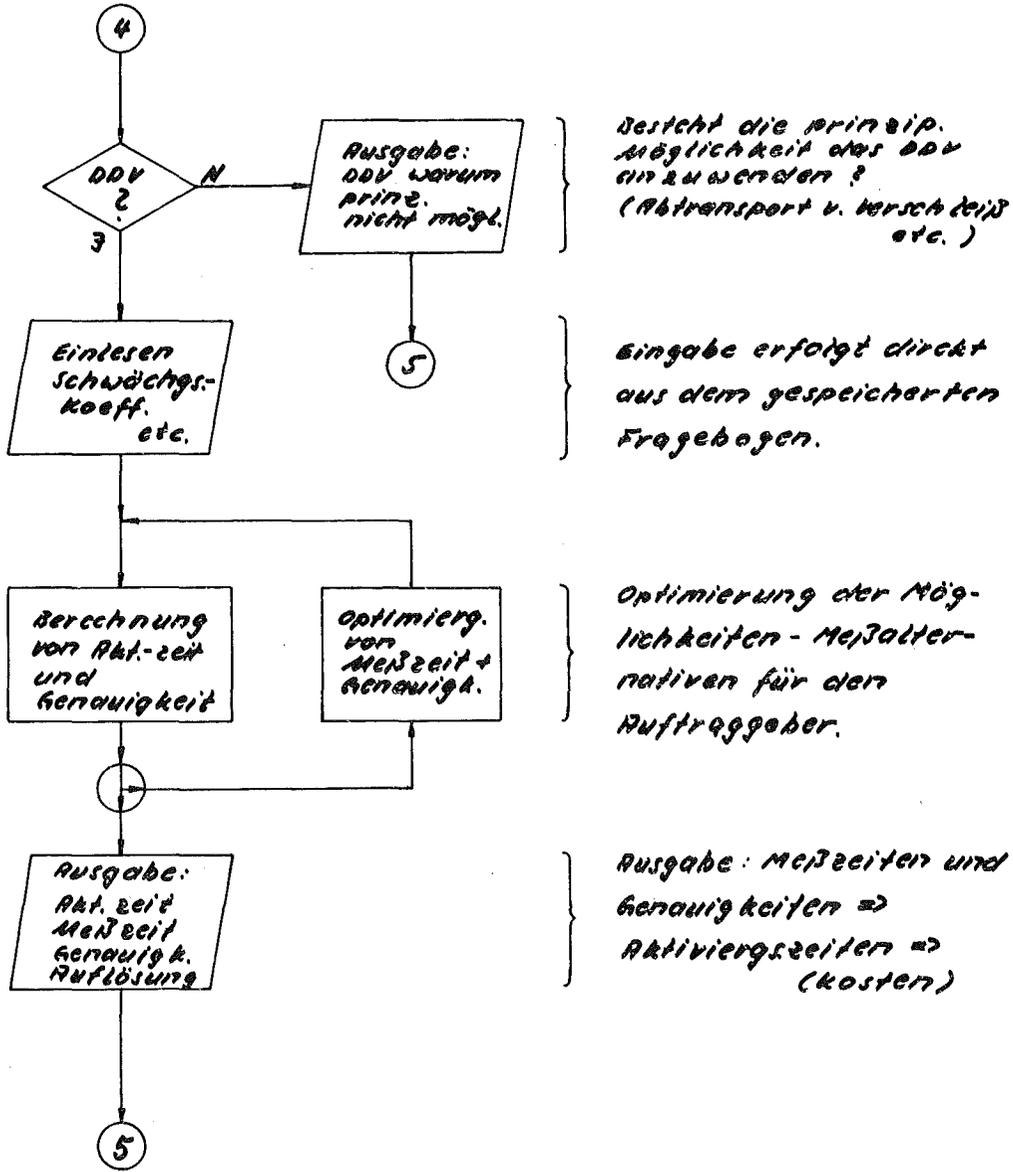


Abb.29: Programmablauf

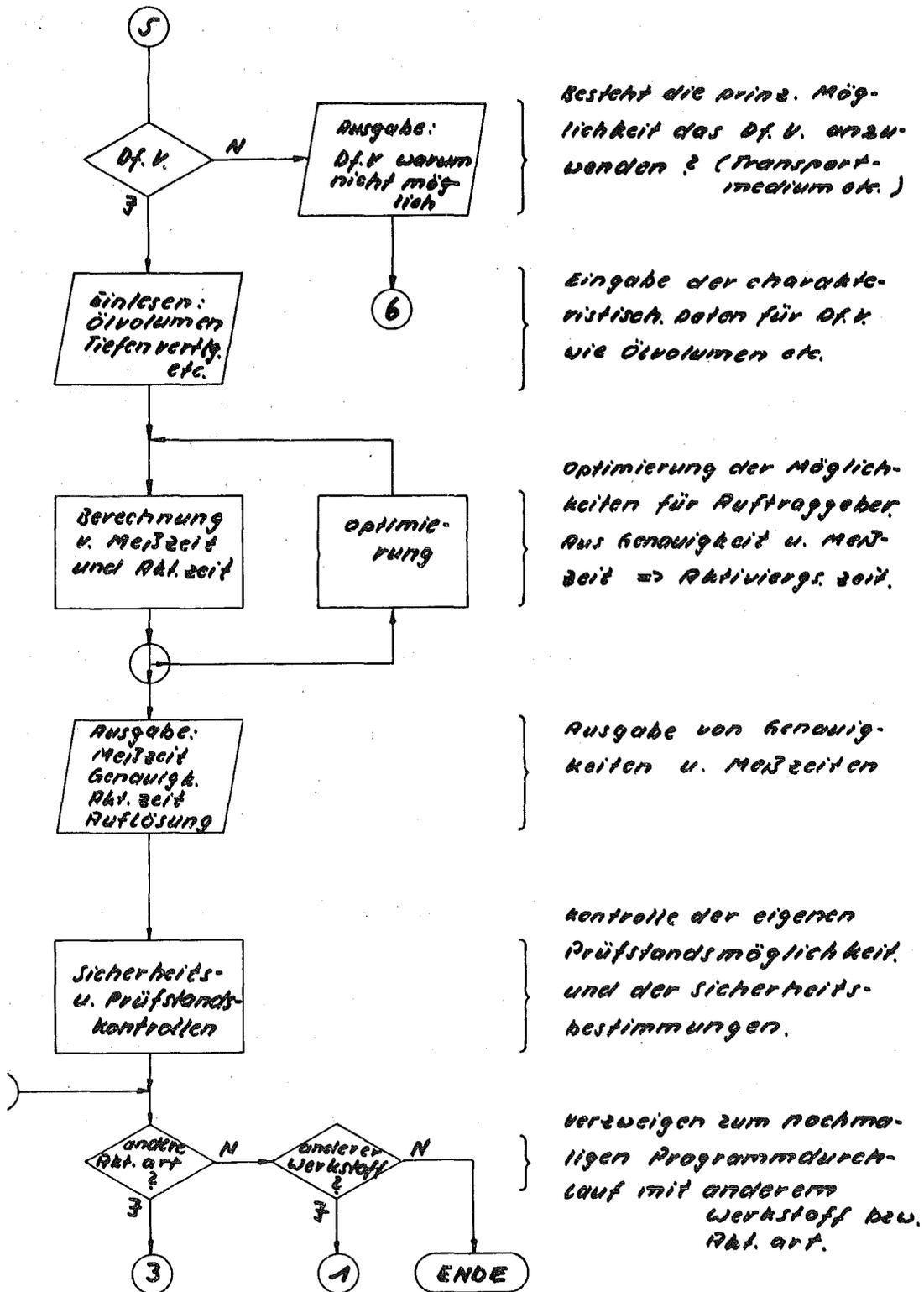
Programmablauf - 2



Programmablauf -3



Programmablauf - 4



#### 4.4.3 Nutzwertanalyzesystem

##### 4.4.3.1 Vorschlag eines Nutzwertanalysesystems

Nun, da über "Checkliste" und Testprogramm eine Reduktion der Verschleißmeßalternativen auf die technisch durchführbaren möglich ist, wird als nächster Schritt die Entwicklung eines speziellen Nutzwertanalysesystems behandelt. Dabei wurde folgendermaßen vorgegangen. Ein Kriterien-System-Entwurf zur Bewertung von Verschleißmeßverfahren wurde erarbeitet. Dieser System-Entwurf besteht auf der dritten und letzten Ebene aus 20 Kriterien, die aus den bereits angesprochenen Teilzielen entwickelt wurden und ist in Abb.30 dargestellt.

Zu jedem Kriterium wurde einheitlich jeweils eine kardinale Bewertungsskala von 0 - 100 Punkte gewählt. Weiterhin wurden die sinnvoll erscheinenden quantifizierbaren Grenzwerte pro Kriterium festgelegt. Die jeweiligen Präferenzfunktionen zur Abbildung der Zielerträge  $k_{ij}$  pro Kriterium in dimensionslose Zielwerte  $n_{ij}$  wurden über weitere Stützstellen, wie z.B. Mittellagen, vorgeschlagen.

Als Präferenzfunktionen zur Abbildung der Kriterien auf Punkteskalen wurden in erster Linie lineare und logarithmische Funktionen vorgeschlagen. Bezüglich der logarithmischen Funktionen hat es sich als sinnvoll erwiesen, die Abszisse logarithmisch aufzuteilen und somit eine lineare Funktion zu erhalten.

Dazu eine kurze Erläuterung am Beispiel des Kriteriums Genauigkeit, siehe Abb.31.

Die Grenzwerte der Skalen ergeben sich aus den Grenzfällen der Anwendbarkeit der Meßverfahren in der Praxis, die für das Durchflußverfahren bis  $10^{-3} \mu\text{m}$  und für konventionelle Messungen bei  $1 \mu\text{m}$  und an Großmotoren im Bereich von  $1 - 100 \mu\text{m}$  liegen.

Ebene m	Nr. n	Bezeichnung der Ziele des Zielprogrammes
0	1	Auswahl der techn.-wirtschaftl. optimalen Alternative aus y-techn. durchführbaren Alternativen von Verschleißmeßverfahren zur Lösung eines bestimmten Verschleißproblems Z in der Motorenentwicklung
1	1 2 3 4	Gesamtkosten Gesamtdauer (Zeit) Techn. Leistungsfähigkeit Unternehmenspolitische Kriterien
2	1  2 3 4  5 6 7 8 9 10 11  12 13 14 15	Gesamtkosten  Rüstzeiten (Vorbereitungszeiten) Prüfstandszeiten (Motorlauf) Auswertungszeiten  Genauigkeit Auflösungsvermögen Reproduzierbarkeit Kontinuierliche Meßmöglichkeit Verfügbarkeit Computerverarbeitbarkeit der Meß- ergebnisse Informationsinhalt der Meßergebnisse  Umweltsicherheit Unabhängigkeit von Spezialisten und Organisationen Erwerb von know-how Werbeeffekt

Abb.30: Entwurf eines Zielprogramms

Ebene m	Nr. n	Bezeichnung der Ziele des Zielprogrammes
3	1	Gesamtkosten
	2	Rüstzeiten
	3	Prüfstandszeiten
	4	Auswertungszeiten
	5	Genauigkeit
	6	Auflösungsvermögen
	7	Reproduzierbarkeit
	8	Kontinuierliche Meßmöglichkeit
	9	Verfügbarkeit
	10	Computerverarbeitbarkeit der Meß- ergebnisse
	11	Anzahl der Meßstellen
	12	Gesamtverschleiß/Meßstelle
	13	Verschleißrate/Meßstelle
	14	Verschleißverteilung/Meßstelle
	15	Mikrogeometrie der Oberfläche
	16	Teilinformation bei vorzeitigem Bauteilausfall
	17	Umweltsicherheit
	18	Unabhängigkeit
	19	Erwerb von know-how
	20	Werbeeffect

Noch Abbildung 30

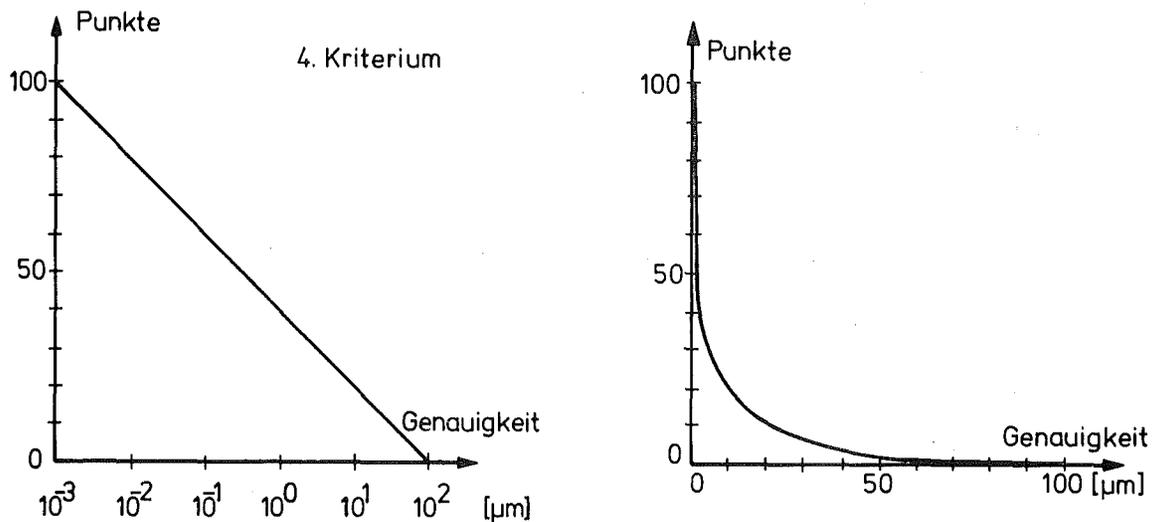


Abb.31: Darstellungsmöglichkeit von logarith. Präferenzfunktion am Beispiel des Kriteriums Genauigkeit

Bei der Bewertung der Genauigkeit über eine logarithmische Funktion der für  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$  - 100 Punkte und für 100  $\mu\text{m}$  - 0 Punkte ergibt, erhält die konventionelle Technik, die in vielen Anwendungsfällen mit Genauigkeiten von ca. 1  $\mu\text{m}$  mißt, quasi eine Mittellage. Wird die Bewertungsfunktion logarithmisch dargestellt, läßt sich der interessierende Bereich für die Radionuklidtechnik ( $10^{-3}$  - 1  $\mu\text{m}$ ) punktemäßig sehr schwer nivellieren, wie Abb.31 im unteren Teil zeigt.

Stellt man die logarithmische Präferenzfunktion derart dar, daß man den linearen Maßstab in einen logarithmischen transformiert und somit eine lineare Präferenzfunktion erhält, lassen sich die Bewertungsunterschiede für Genauigkeiten  $10^{-3}$  -  $10^1$   $\mu\text{m}$  deutlich ablesen (Abb.31 oberer Teil).

Der Gesamtentwurf des Bewertungssystems, der Grundlage der anschließenden Expertenumfrage war, ist im Anhang II zu finden.

An dem Beispiel des ersten Kriteriums "Gesamtkosten" wird ein solcher Vorschlag im folgenden näher erläutert:

Die Gesamtkosten zur Lösung eines Verschleißproblems x mit

einem Meßverfahren  $y$  setzen sich additiv zusammen aus folgenden Einzelkosten für:

- a) Vorbereitung
- b) Vermessungen
- c) Montagen
- d) Aktivierungen von zu untersuchenden Bauteilen
- e) Prüfstandsstunden
- f) Wartung
- g) Auswertung
- h) Risikozuschlag
- i) Strahlenschutz

Diese einzelnen Kosten lassen sich zum Teil exakt, zum Teil aus innerbetrieblichen Erfahrungswerten ermitteln.

Da Aussagen über Minimal- und Maximal-Gesamtkosten, die zu einer bestimmten Problemlösung bereitgestellt bzw. als optimal betrachtet werden, nur vereinzelt oder nur sehr schwer zu gewinnen sein werden, wird folgende Möglichkeit der Bewertung vorgeschlagen:

Die Gesamtkosten für konventionelle Lösungen ( $K_{\text{konv.}}$ ) erhalten auf dem Kostenmaßstab jeweils die Mittellage. Die Grenzen des Maßstabes werden dann durch prozentuale Schwankungen  $\pm X\%$  um  $K_{\text{konv.}}$  festgelegt (z.B.  $\pm 50\%$ ). Das ergibt eine lineare Kostenskala von  $K_{\text{konv.}} - X\%$  bis  $K_{\text{konv.}} + X\%$ . Eine lineare Präferenzfunktion bildet die Kosten (in DM) auf eine dimensionslose Punkteskala (0 - 100 Punkte) ab. Die konventionellen Kosten würden damit immer eine Bewertung von 50 Punkten erhalten und die RNT-Kosten in Relation dazu gesetzt (siehe auch Anhang II).

#### 4.4.3.2 Expertenumfrage zum Nutzwertanalyzesystem-Entwurf

Der Entwurf des Bewertungssystems sollte in vertretbarem Rahmen mit möglichst geringem Aufwand soweit wie möglich

objektiviert werden. Hierzu wurde eine Befragungsaktion durchgeführt, die ein Test durch Expertenurteile war.

Ca. 30 Experten aus der Industrie (F+E sowie Unternehmensführung) konnten zur Teilnahme gewonnen werden. Dieser Kreis setzte sich zusammen aus Herren der Firmen Daimler-Benz, Klöckner-Humboldt-Deutz, Maschinenfabriken Augsburg-Nürnberg und Adam Opel und bietet insofern Gewähr für die unterschiedlichsten Verschleißproblemstellungen von Klein- bis Großmotoren, wasser- und luftgekühlten Aggregaten, kurz der unterschiedlichsten Konstruktionsprinzipien. Die hierarchische Stellung der Experten reicht von Sachbearbeiter auf dem Verschleißsektor in der Motorenentwicklung bis zur Direktionsebene (siehe Anhang IV). Die Umfrage wurde schrittweise folgendermaßen durchgeführt.

1. Jeder einzelne Experte wurde in einem ca. 1-stündigen Informationsgespräch mit der Thematik vertraut gemacht, wobei folgende wichtige Themen und Fragestellungen erläutert wurden.
  - a) Warum die Umfrage stattfindet
  - b) Erläuterung des "Gesamtsystems"
  - c) Stellung der Nutzwertanalyse im System
  - d) Welche Aussagen das System liefern kann.
2. Mit einem Zeitabstand von ungefähr 2 Wochen wurden den Experten die formulierten Vorschläge zu Kriterien, Bewertungsskalen und Präferenzfunktionen zugesandt, mit den nötig erscheinenden Fragestellungen zur Bearbeitung (siehe Anhang II und III).
3. Nach einem weiteren Zeitabstand von ca. 2 - 4 Wochen wurden neue Termine mit den Experten vereinbart. In diesen nun folgenden Gesprächen nahmen die angesprochenen Herren Stellung zu den Vorschlägen. Wo abweichende bzw. konträre Meinungen zu einzelnen Punkten bestanden, wurden diese zunächst vermerkt und anschließend diskutiert. Über die Einzelgespräche hinaus wurde auch versucht im Team mit mehreren Herren einer

Firma zu diskutieren, was allerdings keinen Aufschluß darüber ergab, welche Form der Befragung die besten Ergebnisse liefert. Vielmehr hat das Engagement der Befragungsteilnehmer die erhaltenen Ergebnisse geprägt.

#### 4.4.3.3 Ergebnisse der Umfrage

Die Umfrage sollte im wesentlichen folgende Sachfragen absichern:

1. Art der Beschreibung und Gehalt der Kriterien
2. Vollständigkeit der Kriterien
3. Unabhängigkeit der Kriterien
4. Liegen die Grenzwerte der Kriterien-Maßstäbe sinnvoll
5. Können die vorgeschlagenen Präferenzfunktionen verallgemeinert werden.

Die Ergebnisse zu den Fragestellungen sehen für die einzelnen Kriterien folgendermaßen aus und sind in Abb.32 dargestellt: (Die Diskussion der Ergebnisse der Umfrage erfolgt unter der Numerierung (I-IV) der Entwürfe siehe Anhang II. Zusätzlich sind die endgültig formulierten Kriterien, wie auch in Abb.32, von 1 - 14 bezeichnet).

#### I. Gesamtkosten

##### 1. Kriterium:

Dem 1. Kriterium (Abb.32) wurde von ca. 90% der Befragungsteilnehmer in der entworfenen Form zugestimmt, wobei für die prozentuale Kostenabweichung von der konventionellen Alternative der Wert  $X = \pm 50\%$  für sinnvoll angesehen wurde. Eventuell wäre die Angabe von höchstzulässigen Kosten zur Lösung eines vorgegebenen Problems möglich, jedoch immer orientiert an dem vorhandenen Budget und dem Nutzen der jeweiligen Verfahren. Da die Kosten als Kriterium unabhängig im Nutzwertanalyse-System bewertet werden sollen, ist diese Angabe von Maximalkosten für die Bewertung nicht möglich. Die maximal zulässigen Kosten zur Lösung eines Problems können nur auf einer

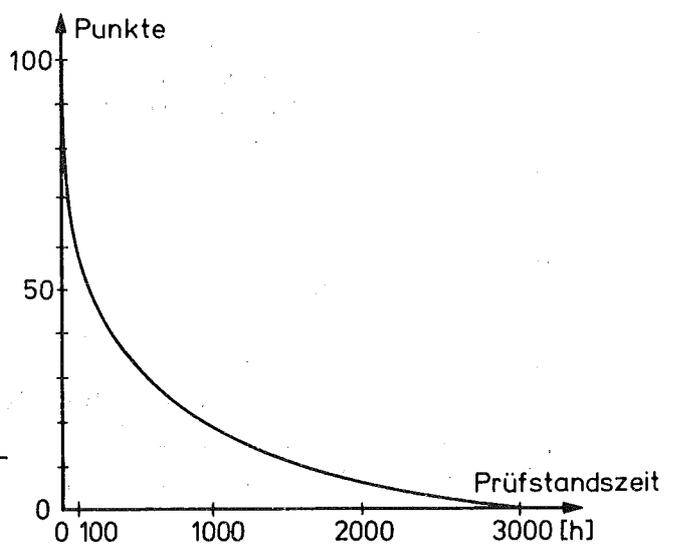
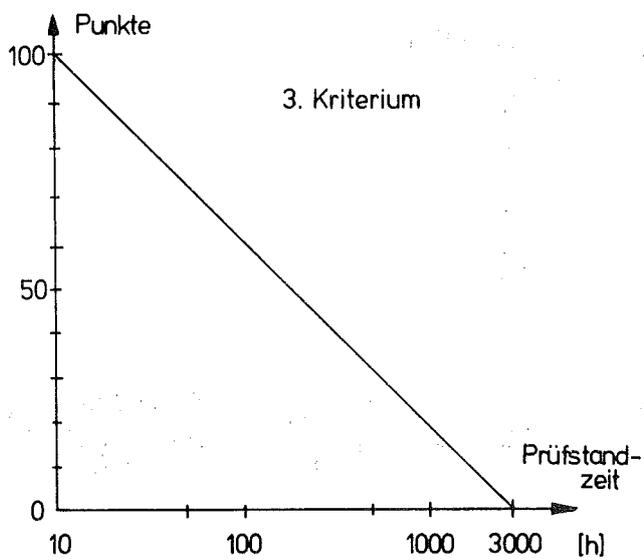
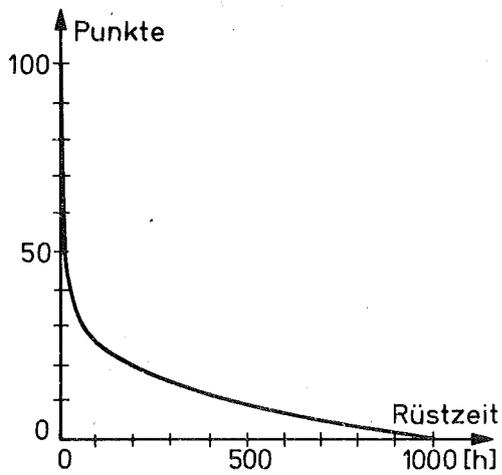
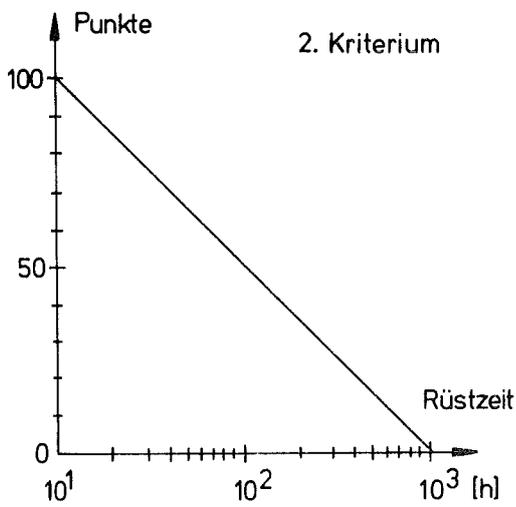
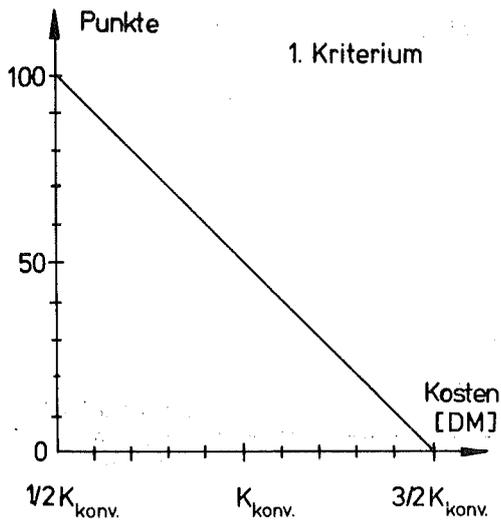
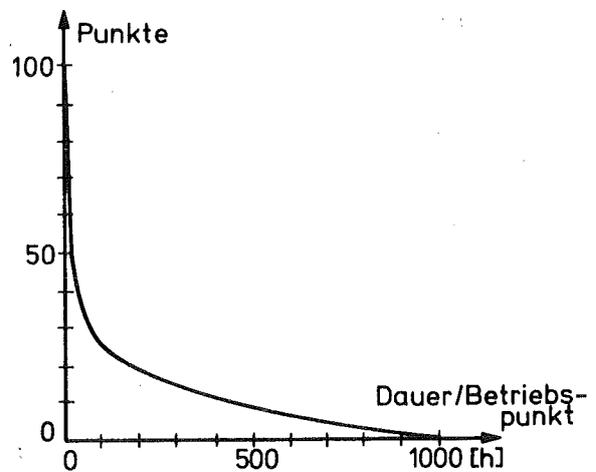
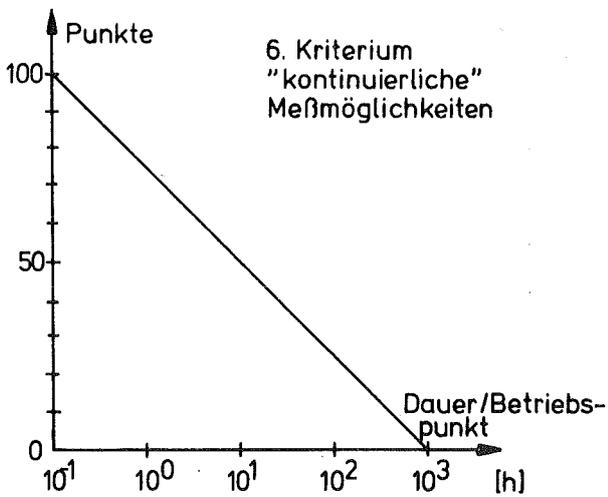
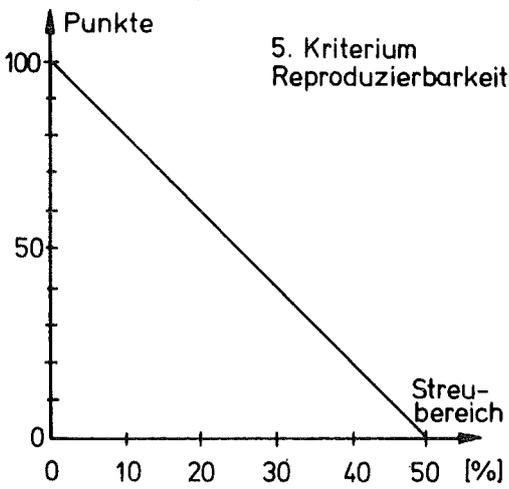
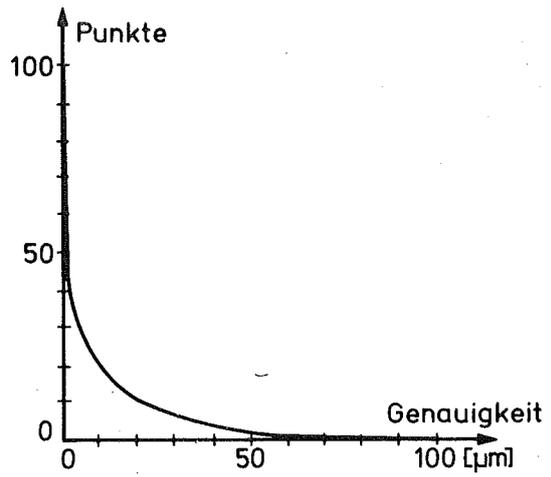
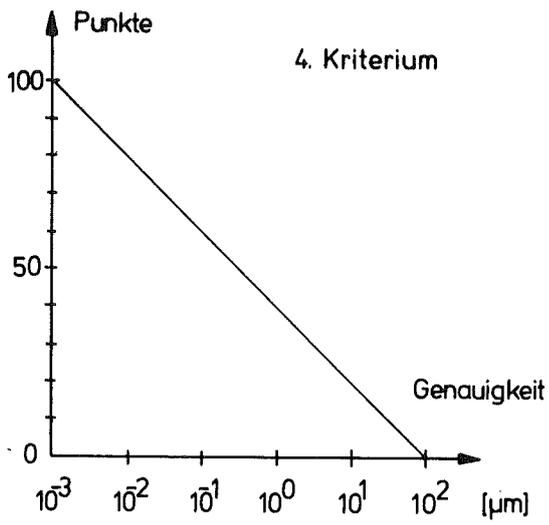
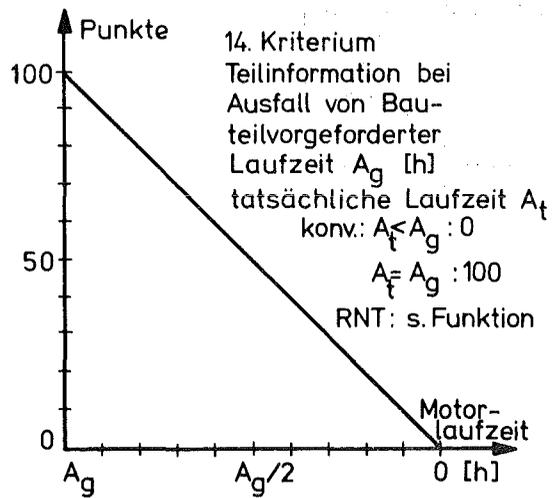
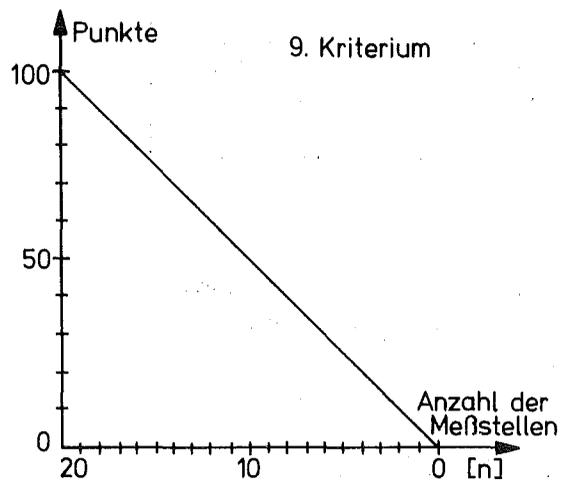
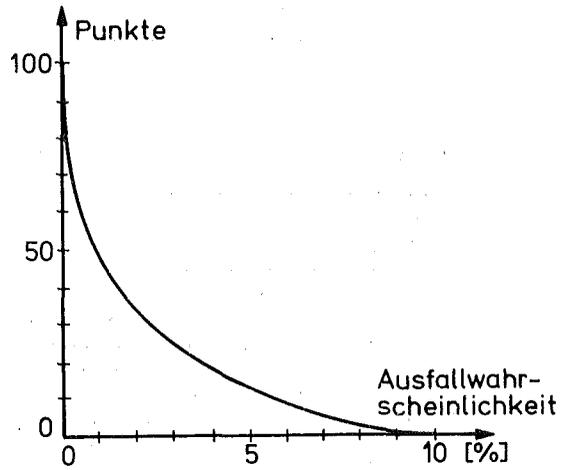
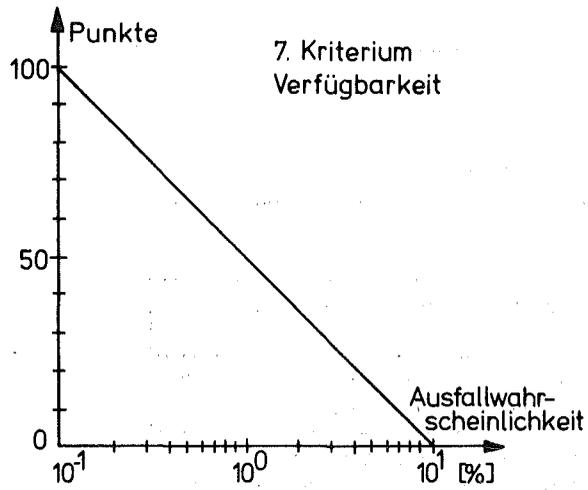


Abb.32: Kriterien und Präferenzfunktionen des erstellten Nutzwertanalyse systems (NWA I) nach der Experten-umfrage



Noch Abbildung 32



Bewertungsschemata für die Kriterien 8, 10 - 13 .

8. Kriterium: Computerweiterverarbeitbarkeit

Zielwerte [Punkte]	
0 - 20	Meßdaten manuell aufgenommen, Verarbeitung und Auswertung manuell
20 - 40	Meßdaten manuell aufgenommen, Speicherung über EDV, Weiterverarbeitung und Auswertung manuell
40 - 60	Meßdaten automatisiert aufgenommen, Speicherung über EDV, Weiterverarbeitung und Auswertung manuell
60 - 80	Meßdaten automatisiert aufgenommen, Speicherung und Weiterverarbeitung über EDV, Auswertung halbautomatisiert
80 -100	Meßdaten automatisiert aufgenommen, automatisierte Speicherung, Weiterverarbeitung und Auswertung über EDV

Für die Kriterien 10 - 13 gibt es nur ja - und nein - Aussagen, d.h.: Das Kriterium wird entweder erfüllt oder nicht erfüllt, was 100 - bzw. 0 - Punkte entspricht.

Nr.	Kriterium	Zielwerte [Punkte]	
		100	0
10	Gesamtverschleiß	ja	nein
11	Verschleißrate	ja	nein
12	Verschleißverteilung	ja	nein
13	Mikrogeometrie	ja	nein

Noch Abbildung 32

Stufe vorher als "Schwellwert" im Aussiebnungsprozeß der zu betrachtenden Alternativen dienen, ebenso wie die höchstzulässige Gesamtdauer pro Problem und die Kriterien der technischen Leistungsfähigkeit, die unbedingt (als "Muß-Ziel") erfüllt werden müssen.

Vereinzelt wurde für das Kosten-Kriterium auch eine logarithmische Präferenzfunktion vorgeschlagen, bzw. ein logarithmischer Bewertungsmaßstab mit den Grenzen  $10^{-1} K_{\text{konv.}}$  bis  $10 K_{\text{konv.}}$ . Diese Art der Skalierung bringt jedoch die Kostenunterschiede der Verfahren, im Punkteabstand auf der Nutzenskala, mit zu geringen Abständen zum Ausdruck.

Eine Minderheit (zwei Herren) vertrat den Vorschlag, das Kostenkriterium ganz aus dem Nutzwertanalyzesystem herauszulösen, die Nutzenkennziffern für die übrigen Kriterien zu ermitteln und die Gesamtnutzenkennziffer pro Alternative in das Verhältnis zu den jeweiligen Gesamtkosten zu setzen. Dieser Wert ergibt eine spezifische Größe mit der Dimension Geld/Punkt. Die Nachteile dieser Vorgehensweise sind:

1. Bei Verhältniszahlen gleicher Größe kommt in dieser Darstellung nicht mehr zum Ausdruck, ob ein Verfahren bei hohen Kosten großen Nutzen, oder bei niedrigen Kosten kleinen Nutzen bringt.
2. Die Möglichkeit der Kostengewichtung ist bereits vorweggenommen, d.h. die Kosten sind gleich hoch wie der Nutzen gewichtet. Nachträglich wäre eine Kostengewichtung nur derart möglich, daß für die Kosten ein Gewichtungsfaktor  $\alpha$  als Exponent eingeht.

$$\frac{\text{Kosten}^\alpha}{\text{Nutzen}} \quad \left[ \frac{\text{DM}}{\text{Punkt}} \right]$$

3. Das Nutzwertanalyzesystem ist nicht mehr vollständig bzw. "verwässert" und die Transparenz der logischen Bewertungs- und Gewichtungsvorgänge geht verloren.

Ein Vorteil wäre, daß die praktisch nicht erhältlichen Grenzwerte für eine Kostenbewertungsskala außer Acht bleiben könnten.

## II. Gesamtdauer

### 2. und 3. Kriterium: Rüst- und Prüfstandszeit (Abb.32)

Etwa im Verhältnis 40 - 60 (prozentual) standen die Aussagen der Experten, ob die Auswertungszeit getrennt auftreten, oder in die definierte Rüstzeit mit eingehen soll. Die Pro-Argumentation wollte die Transparenz durch deutliche Trennung gewährleisten, während die Contra-Seite dahin argumentierte, daß die Auswertungszeit in der Praxis im Mittel kleiner als die Rüstzeit ist und nicht zuletzt wegen der Schwierigkeit der Einzelgewichtung in die Rüstzeit einzubeziehen ist. Im Endeffekt ist die Gesamtzeit wesentlich.

Zur Skalierung der Bewertungsmaßstäbe wurde folgendes festgestellt:

- a) Entweder muß die Skala für Prüfstandszeiten auf 3000 h bzw. sogar 10 000 h ausgedehnt werden (u.U. erforderlich für Großmotoren)
- b) oder verschiedene Skalen nach Motorleistungen verwendet werden
  - bis 500 h für PKW-Motoren
  - bis 3 000 h für mittelgroße Dieselmotoren
  - bis 10 000 h für Großmotoren
- c) Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung Problem-angepaßter Skalen, wobei die Schwelle der höchstzulässigen Zeit als Grenzwert für die Gesamtzeit verwendet wird.

Die logarithmische Aufteilung der Bewertungsskalen wurde durchweg akzeptiert, um

- a) die Mittellagen 100 - 500 h im 50-Punktebereich zum Ausdruck zu bringen
- b) kürzere Zeiten entsprechend hoch zu bewerten.

### III. Technische Leistungsfähigkeit

#### 4. - 14 Kriterium: Kriterien der technischen Leistungsfähigkeit (Abb.32)

##### 4. Kriterium:

Das Kriterium in der vorgeschlagenen Form wurde einschließlich der Grenzwerte ( $10^{-3}$  -  $10^2$   $\mu\text{m}$ ) in logarithmischer Aufteilung sowie zugehöriger linearer Präferenzfunktion durchweg als sinnvoll angesehen. Die als Alternative angedeutete "S"-Funktion wurde abgelehnt, da sie die für viele Probleme nicht notwendige Genauigkeit zu günstig bewerten würde. Andere Alternativen von Präferenzfunktionen wurden nicht vorgeschlagen.

##### Auflösungsvermögen (entfällt)

Das Auflösungsvermögen wurde als Kriterium nach der Umfrage gestrichen, weil die Mehrheit der Experten der Meinung war, daß die technische Leistungsfähigkeit durch die Kriterien Genauigkeit, kont. Meßmöglichkeit sowie Reproduzierbarkeit genügend zum Ausdruck gebracht sei. Außerdem ist die Unabhängigkeit des Kriteriums nicht im geforderten Sinne gewahrt.

##### 5. Kriterium: Reproduzierbarkeit (Abb.32)

Dieses Kriterium wurde allgemein als ein sehr wesentliches Kriterium zum Vergleich von Meßwerten angesehen. Es war jedoch nicht ganz einfach verständlich zu machen, warum das Kriterium in der definierten Form gebraucht wird. (Das liegt wohl hauptsächlich an der ungenügenden Formulierung in der Vorschlagsliste). Eine ausführliche Beschreibung der wesentlichen Punkte zu diesem Kriterium ist bereits in Kap. 2.3.2 gegeben worden.

Reproduzierbarkeit bezieht sich auf folgende möglichen Konstellationen von Vergleichen:

- Verschleißmessungen an gleichen Bauteilen bei konstanten Betriebsgrößen
- Verschleißmessungen an ähnlichen Bauteilen (Konstruktion, Werkstoffe) bei konstanten Betriebsgrößen.

- Vergleich von Verschleißverhalten bei verschiedenen Betriebspunkten bzw. -Parametern
  - a) mit gleichen Bauteilen (konventionell)
  - b) mit demselben Bauteil (RNT evtl. auch konventionell, jedoch jeweils Ein- und Ausbau).

Verschleiß wird jeweils mit einem Meßverfahren gemessen. Mit welchen Streubereichen Messungen zu wiederholen bzw. zu vergleichen sind hängt nicht allein vom Meßverfahren, sondern von dem Gesamtsystem ab. (Objekt, Ort, Meßsystem, Bedingungen, Anwender etc.). Beim Vergleich von Bauteilen sind konventionelle- und RNT-Methoden mit etwa den gleichen Streubereichen behaftet.

Sollen jedoch Betriebsbedingungen bzw. -Parameter verglichen bzw. wiederholt werden, kann die RNT mit wesentlich geringeren Streubereichen rechnen, da sie grundsätzlich solche Vergleiche auf ein und dasselbe Bauteil beziehen kann, während die konventionelle Technik darauf angewiesen ist, jeweils zu demontieren und oft auch neue gleiche Teile verwenden muß.

Mit der Reproduzierbarkeit werden also jeweils nach Problemstellung die unterschiedlichen Streubereiche für die einzelnen Verfahren prozentual zum Ausdruck gebracht.

Im wesentlichen wurde dann noch über die Grenzwerte des Maßstabs diskutiert, wobei sich schließlich die Mehrheit der Befragten für den vorgeschlagenen Bereich von 0 - 50% Streubereich bei linearer Präferenzfunktion entschied.

#### 6. Kriterium: Kontinuierliche Meßmöglichkeit (Abb.32)

Mit diesem Kriterium wird die technische Leistungsfähigkeit durch Meßdauer/Betriebsgröße ausgedrückt. Die Skala könnte für spezielle Messungen an Großmotoren von  $10^3$  auf  $10^4$  Stunden erweitert werden. Es erschien jedoch nicht sinnvoll, durch Einbeziehung von Extremfällen den Maßstab zu verschieben, da somit die langen Zeiten im Mittel zu hoch bewertet werden.

7. Kriterium: Verfügbarkeit (Abb.32)

Die Verfügbarkeit eines Systems soll direkt über die Ausfallwahrscheinlichkeit bewertet werden, wobei dem gemachten Vorschlag nichts weiter hinzugefügt wurde.

8. Kriterium: Computer-Weiterverarbeitbarkeit der Meßergebnisse (Abb.32)

Das Kriterium wurde in vorgeschlagener Form akzeptiert.

9. - 14. Kriterium: Informationsinhalt der Meßergebnisse (Abb.32)

Jedes zu bewertende Meßverfahren muß zur Lösung eines Problems bestimmte Mindestanforderungen erfüllen. In Abhängigkeit vom Verfahren werden jedoch unterschiedliche Zusatzinformationen geliefert, die, wenn sie gewünscht werden, durch diese 6 Kriterien zum Ausdruck gebracht werden können. Sie sollen nach der Umfrage in der vorgeschlagenen Form übernommen werden.

IV. Unternehmenspolitische Kriterien

Mit diesen Kriterien werden die Risiken angesprochen, die bei Verwendung der verschiedenen Verfahren auftreten können. Da auf dieser Ebene der Nutzwertanalyse kein allgemeiner Verfahrensvergleich gemacht wird, sondern die Verfahren anhand konkreter Problemstellungen untersucht werden, sollen die unternehmenspolitischen Kriterien auf einer höheren Ebene der Entscheidungshierarchie behandelt werden, auf der Verfahrensvergleiche herangezogen werden.

#### 4.5 Modifiziertes System in einer Entscheidungshierarchie

Mit den gewonnenen Erfahrungen durch Testen der "Checkliste" in der Industrie sowie aus den Ergebnissen der Umfrageaktion zur Objektivierung und Absicherung des Nutzwertanalyse-systems wurde das Gesamtsystem modifiziert. Die nun erstellte Entscheidungshierarchie (Abb.33) wird im folgenden schrittweise erläutert.

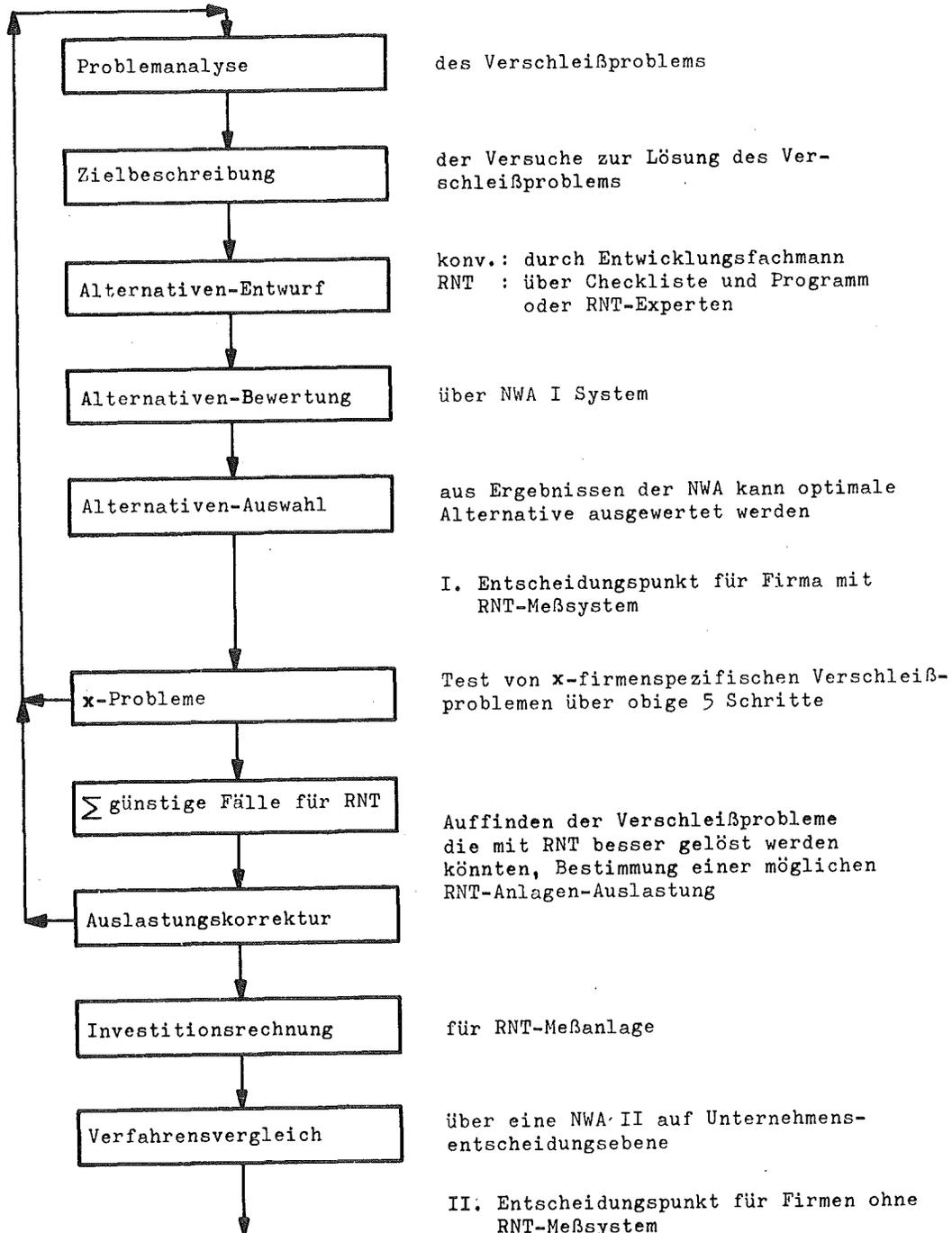


Abb.33: Entscheidungshierarchie

#### 4.5.1 Problemanalyse

Ausgangspunkt: In der Industrie tritt ein Verschleißproblem  $x$  auf. Dieses Problem ist zu analysieren. Allgemein betrachtet kann eine solche Problemanalyse folgendermaßen durchgeführt werden: (Abb.34).

Den Ist- und Soll-Zustand zu formulieren und daraus die Abweichung  $\Delta$  zu beschreiben nach

- Art
- Menge
- Zeitpunkt
- Ortsangabe.

Es folgt eine Analyse der Abweichungen durch Erfassung aller möglichen Ursachen. Daraus ist die wahrscheinlichste Ursache auszuwählen.

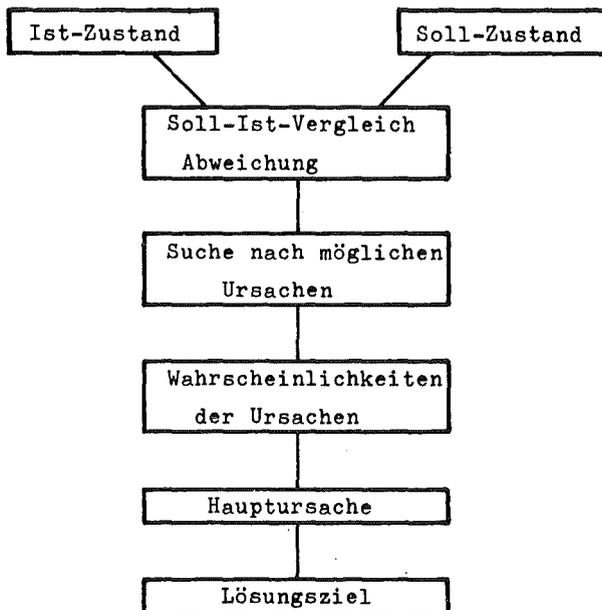


Abb.34: Schema einer Problemanalyse

#### 4.5.2 Zielbeschreibung

Ein Korrekturziel ist festzulegen, das als operationales Ziel zu beschreiben ist, als Ergebnis, das erreicht werden soll nach

- Menge und Art
- Standards
- Zeitpunkt (spätestens)
- Aufwand (höchstmöglichst)

wobei eindeutig unterschieden werden muß zwischen Zielen, die erreicht werden müssen "Muß-Zielen" und zusätzlich gewünschten Zielen "Möchte-Zielen".

#### 4.5.3 Alternativenentwicklung

Um diese Ziele zu erreichen sind alternative Lösungsmöglichkeiten zu entwickeln. Die erste Möglichkeit ist die Planung von "konventionellen" Alternativen, zusätzlich sollen RNT-Alternativen betrachtet werden.

Fachleute aus der Motorenentwicklung beschreiben das Problem in der entwickelten "Checkliste" und geben ihre Ziele mit den verlangten Standards bzw. "Schwellwerten" bezüglich

- Kosten
- Dauer
- technischer Leistungsfähigkeit

an.

Nun wird getestet, ob es RNT-Alternativen aus den Y-Gesamternativen zur Lösung des X-Problems und zusätzlich Z-Arten der Organisation gibt.

Das Programm I bzw. ein RNT-Fachmann liefert die RNT-Alternativen, mit denen die geforderten Schwellwerte erfüllt werden können.

#### 4.5.4 Alternativen-Bewertung

Im nächsten Schritt der Entscheidungshierarchie werden die noch vorhandenen Alternativen (konv. und RNT) bewertet. Hierzu ist das aus 14 Kriterien bestehende Nutzwertanalyse-system entwickelt worden, das in Abb.32 beschrieben ist.

- a) In diesem Nutzwertanalyse-system gehen die Kriterien-Werte pro Alternative sowie die Gewichtungen der Kriterien untereinander ein.
- b) Manuell bzw. über ein Rechenprogramm erhält man Teilnutzen- und Gesamtnutzenkennziffern sowie eine Darstellung als Profilausdruck (Abb.35).
- c) Die erhaltenen Ergebnisse sind zu analysieren und evtl. einer "Empfindlichkeitsanalyse" zu unterziehen, die durch den Spielraum der Gewichtungen möglich ist.

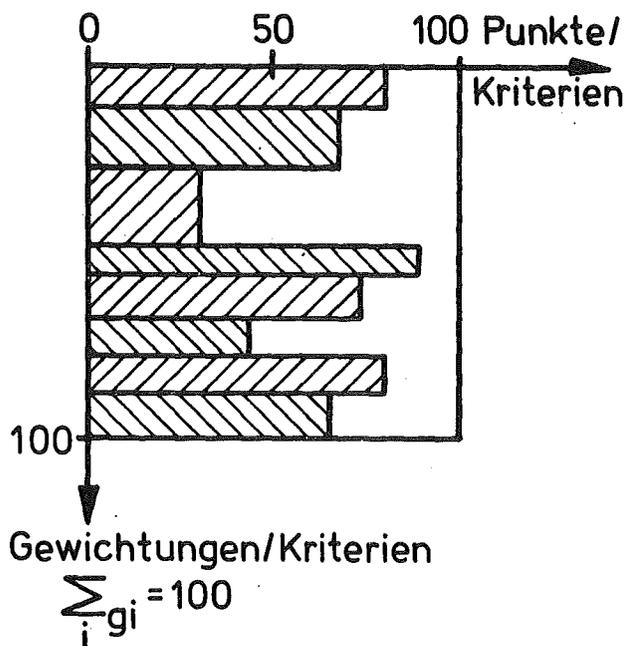


Abb.35: Wertprofil-darstellung der Ergebnisse aus NWA I-System [26]

d) Als zusätzliches Entscheidungshilfsmittel werden die prozentualen Abweichungen der Teilnutzenziffern der RNT-Alternativen zu der oder den konv. Alternative(n) gebildet.

Die Bewertung der Alternativen sieht im einzelnen folgendermaßen aus. Die Alternativen, die zur Auswahl stehen, werden über die Kriterien durch Zielerträge abgebildet.

Die Zielerträge werden über die Präferenzfunktionen (s. Abb. 32) in Zielwerte transformiert.

In Abb. 1 (im Anhang IV) werden die für die betrachtete Problemstellung erforderlichen Gewichte eingegeben, die durch die Randbedingungen des Problems bestimmt sind.

Die Kriteriengewichte multipliziert mit den ungewichteten Zielwerten ergeben die gewichteten Zielwerte. Die Summe der 14 Gewichtungsfaktoren ergibt 100 :  $\sum_{j:1}^{14} g_j = 100$ .

Die Alternativen sind nun im Wertsystem durch 14 dimensionale Präferenzordnungen abgebildet worden. Die gewichteten Zielwerte werden durch Wertsynthese in eine Nutzwertmatrix zusammengefaßt. Die Auswahl der Alternativen erfolgt zweckmäßigerweise nach der höchsten Punktzahl. Die Wertsyntheseregeln lautet:

$$N_i = \sum_{j=1}^{14} g_{ij} \cdot n_{ij} \quad (i=1(1),n)$$

Alternativen	Nutzwerte
$A_1$	$N_1$
$A_2$	$N_2$
$\vdots$	$\vdots$
$A_i$	$N_i$
$\vdots$	$\vdots$
$A_n$	$N_n$

Für den praktischen Gebrauch lassen sich diese einzelnen Schritte in 2 Tabellen zusammenfassen (s. Anhang IV, Tabelle 1,2).

In die Tabelle 1 im Anhang IV werden nach Problemanalyse und Zielbeschreibung von den Fachleuten der Industrie die Gewichtungen der Kriterien sowie die Zielerträge der Kriterien für die konventionelle(n) Alternative(n) eingegeben. Über die Werte der Checkliste ermittelt Programm I oder ein RNT-Experte die mögliche(n) RNT-Alternative(n) sowie ihre Zielerträge.

Tabelle 2 (in Anhang IV) enthält die bis jetzt festgestellten Werte. Außerdem die manuell errechneten ungewichteten und gewichteten Zielwerte, sowie die Gesamtnutzen- und Teilnutzenkennziffern. In die zusätzlichen Spalten der Tabelle werden die prozentualen Abweichungen der RNT-Alternative(n) gegen die konventionelle(n) Alternative(n) angegeben. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 (in Anhang IV) zusammengefaßt. Zusätzlich werden die tatsächlichen Kosten und Zeiten aufgeführt mit den prozentualen Abweichungen gegen die konventionelle Alternative.

#### 4.5.5 Alternativen-Auswahl

Mit diesen Entscheidungshilfsmitteln kann die für die jeweilige Problemstellung optimale Alternative ausgewählt werden, wobei zwei weitere Bedingungen zu beachten sind:

- a) Es sind noch keine Risiken betrachtet worden.
- b) Die Kosten sind für mittlere Auslastungsgrade von RNT-Verschleißmeßanlagen und die heutigen Bestrahlungskosten errechnet worden.

Unter diesen Voraussetzungen sind die ermittelten Nutzensziffern zu sehen. Sind für eine Firma andere Auslastungsgrade vorhanden bzw. zu erwarten, so sind diese Zahlen in das Nutzwertanalysesystem I einzugeben. Für die Problemstellungen, für die die RNT die optimale Alternative darstellt, gilt:

- Liegen die Auslastungsgrade einer RNT-Meßanalyse  $< 50\%$ , so

sind mit den höheren Kosten weitere Nutzwertanalyseprogramm-durchläufe notwendig, die Ergebnisverschiebungen bewirken können. Bei Auslastungsgraden  $> 50\%$  werden die RNT-Kosten kleiner und damit die RNT-Alternative noch günstiger. (Eine Ausnahme: Kosten sind mit 0 gewichtet!). Eine Firma, die eine RNT-Anlage bereits betreibt, kann an dieser Stelle die Entscheidung treffen, welche Alternative zur Problemlösung verwendet werden soll. Besitzt sie jedoch keine solche Anlage, muß sie die weiteren Schritte verfolgen, um eine Entscheidung treffen zu können.

#### 4.5.6 Aufsummierung der günstigen Fälle für die RNT

Es muß ein Katalog der möglichen Einsatzmöglichkeiten erarbeitet werden, wobei nach Häufigkeit und bisherigem Aufwand zu sortieren ist. Diese Probleme sind über die verschiedenen Stufen von Problemanalysen bis zur Alternativen-Auswahl zu betrachten. Daraus ergeben sich die Aufgaben, die mit der RNT optimal zu lösen sind. Dieser Summe von günstigen Fällen für die RNT lassen sich Auslastungsgrade von Meßanlagen zuordnen, aus denen sich wiederum Kostenkorrekturen ergeben können.

#### 4.5.7 Investitionsrechnung

Im Anschluß ist eine Investitionsrechnung für die Kapitalrückflußzeit einer Anlage durchzuführen. Fällt dieser Schritt positiv aus, d.h. ist der Kapitalrückfluß  $\leq 3$  Jahre [22], folgt als letzter Schritt zur Entscheidungsfindung eine Nutzwertanalyse II, auf Unternehmensentscheidungsebene, wo die Kosten-Daten der Investitionsrechnung den unternehmenspolitischen Kriterien gegenübergestellt werden. Diese Kriterien zeigt Abb.36.

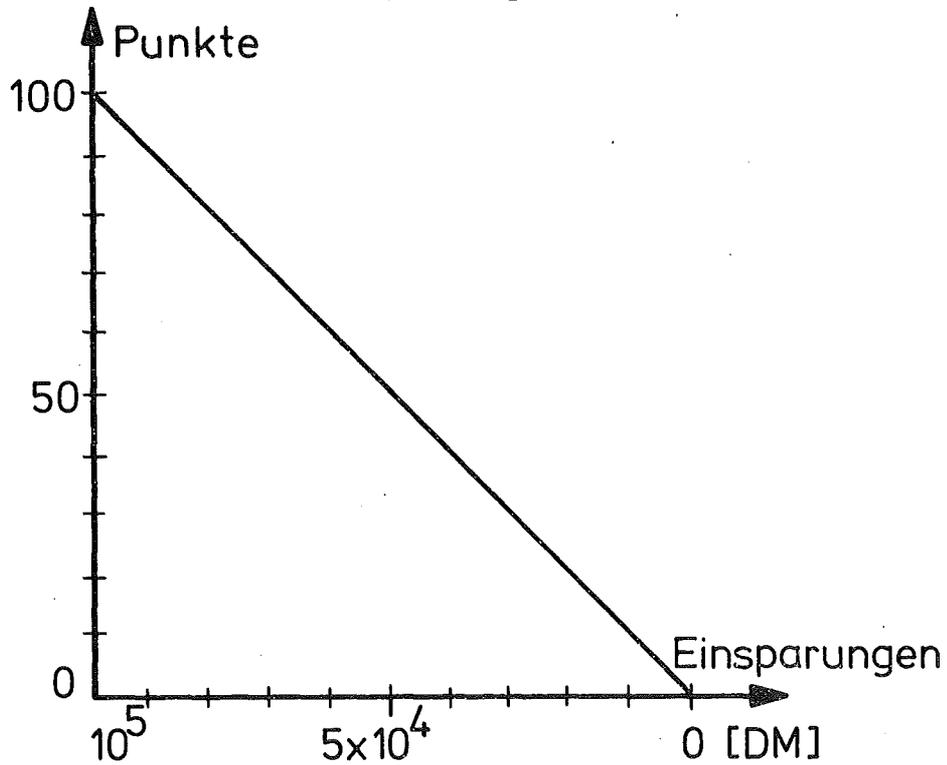
Es sind im einzelnen:

1. Kosten-Einsparungen
2. Umweltbelastung
3. Ausreifeegrad
4. Unabhängigkeit von know-how, Spezialisten und Organisationen.

In Kapitel 5.6 und 5.7 wird an einem Beispiel eine Investitionsrechnung und ein Verfahrensvergleich durchgeführt.

## Unternehmenspolitische Kriterien

### 1. Kosten-Einsparungen [DM]



### 2. Kriterium: Umweltbelastung

Zielwerte [Punkte]	
0 - 20	Sehr großer technischer und organisatorischer Aufwand zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften (Personaleinsatz zeitlich begrenzt infolge Strahlenbelastung)
20 - 40	Großer technischer und organisatorischer Aufwand zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften
40 - 60	Mittlerer technischer und organisatorischer Aufwand zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften
60 - 80	Geringer technischer und organisatorischer Aufwand zur Einhaltung gesetzlicher Vorschriften
80 -100	Sehr geringe bzw. keinerlei Umweltbelastung

Abb.36: Unternehmenspolitische Kriterien

3. Kriterium: Ausreifegrad  
(bzgl. Wartung, Bedienung, Flexibilität, Verfügbarkeit, gemessen am Standard der konv. Verfahren)

Zielwerte [Punkte]	
0 - 20	schlecht
20 - 40	unbefriedigend
40 - 60	befriedigend
60 - 80	gut
80 -100	sehr gut

4. Kriterium: Unabhängigkeit von know how,  
Spezialisten und Organisationen

Zielwerte [Punkte]	
0 - 20	Abhängig von know how, Spezialisten und Organisationen
20 - 40	Abhängig von Organisationen
40 - 60	Abhängig von Spezialisten
60 - 80	Abhängig von know how
80 -100	Völlig unabhängig

Noch Abbildung 36

## 5. P R A K T I S C H E E R P R O B U N G D E S E R - S T E L L T E N S Y S T E M S

### 5.1 Feld der typischen Verschleißprobleme und ihren Rand- bedingungen

In weiteren Gesprächen mit den zuständigen Experten der Motorenentwicklung wurden beispielhafte Problemstellungen ausgewählt, um das entwickelte Gesamtsystem, sowie die vollständige Entscheidungshierarchie, zu testen.

Die Problemstellungen selbst beziehen sich auf die folgenden Bauteilgruppen von Hubkolbenmotoren:

- a) Lager - Welle
- b) Zylinder-Laufbüchse, Kolben, Ringe
- c) Ventiltrieb

Aus den Problemanalysen ergaben sich folgende typische Zielbeschreibungen wie:

- a) Ermittlung von Betriebspunkten für Bauteile bzw. Bauteilgruppen, bei denen der größte Verschleiß auftritt.
- b) Ermittlung der Betriebsparameter für Bauteile bzw. Bauteilgruppen, bei denen minimaler bzw. maximaler Verschleiß auftritt.
- c) Optimale Auswahl von Bauteilen verschiedener Konstruktionen.
- d) Optimale Werkstoffwahl für gleiche Bauteile.

Für jedes durchgetestete Beispiel werden in das Bewertungssystem verschiedene Gewichtungen eingegeben, wie sie sich in der Praxis aus Randbedingungen ergeben können. Die Mindestanforderungen an die technische Leistungsfähigkeit/Verfahren und Problemstellung müssen eingehalten werden, die höchstzulässigen Angaben über Gesamtkosten bzw. -zeiten dürfen nicht überschritten werden. Innerhalb dieses abgesteckten Spielraumes können folgende Extrem-Gewichtungen auftreten:

- a) Häufig auftretende Problemstellungen sollen ausreichend kostengünstig

- b) unter Zeitdruck zu behandelnde Problemstellungen ausreichend schnell
- c) technisch markante Problemstellungen ausreichend gut gelöst werden.

Diese Randbedingungen können so extrem, teils allein, teils kombiniert, auftreten.

Nach diesem Überblick nun zu den einzelnen Beispielen. Das erste Beispiel wird ausführlich abgehandelt.

## 5.2 Test des Systems mit einem typischen Verschleißproblem

Im 1. Beispiel handelt es sich um die Ermittlung ungünstiger Betriebspunkte, die zum vorzeitigen Ausfall von Pleuellagern führen. Die Problemanalyse in der Firma führte zu folgender Hauptursache, die sich in der Zielbeschreibung der Checkliste ausdrückt. Von 10 Betriebspunkten führen wahrscheinlich 3, bzw. einer von 3 in kurzer Zeit (ca. 50 - 100 h) zu so hohen Verschleißwerten, daß die geforderte Lebensdauer des Motors stark verkürzt wird. Dieser Betriebspunkt, bzw. die Betriebspunkte, mit ihren Auswirkungen sind zu finden. Ein Möchte-Ziel, das es zu erreichen gilt, ist die Kenntnis, inwieweit sich die Verwendung einer anderen Ölart auf den Verschleiß auswirkt. Randbedingungen: Das Problem muß in spätestens 8 Wochen gelöst sein. Die Firma hat keine RNT-Anlage. Die Kosten für eine konventionelle Lösung werden als sehr hoch betrachtet.

Von dem zuständigen Abteilungsleiter in der Firma wurde folgende Gewichtung von Kosten/Zeit/technischer Leistungsfähigkeit gewählt: 20/40/40. Die einzelnen Gewichtungen pro Kriterium sind in Tabelle 4 in der Spalte g dargestellt.

### Folgende konventionelle Alternative wurde entwickelt:

1. Bereitstellung von 12 Sätzen von Pleuellagern
2. Sichtbeurteilung der Lager nach jeweils einem Betriebspunkt (evtl. Vermessung).
3. Vorgesehen ist ein 600 h Prüfstandslauf für die 10 zu untersuchenden Betriebspunkte à 50 h mit jeweils neuen Lagern

sowie die Reproduktion der beiden schlechtesten Betriebspunkte.

Die Gesamtkosten betragen ca. 120.000,--DM. Gesamtdauer ca. 6 Wochen.

Die in die Checkliste eingegebenen Daten werden in das Programm übernommen, das RNT-Alternativen angibt. In diesem Fall ergeben sich 2 Alternativen:

- a) Durchflußverfahren ohne Einschränkungen
- b) Dünnschichtdifferenzverfahren mit Einschränkungen.

Da das Durchflußverfahren in der Regel genauere Ergebnisse als das Dünnschichtdifferenzverfahren liefert, und das Dünnschichtdifferenzverfahren nur mit Einschränkungen einsetzbar ist, ergibt sich eine technische RNT-Alternative zur konventionellen Methode, mit folgendem Versuchsprogramm:

Einlauf	5 h
10 Betriebspunkte à 2 h	20 h
kritische Betriebspunkte reproduzieren	10 h
dito. mit anderer Ölsorte	30 h
ca. 20% Risikozuschlag	<u>15 h</u>
Gesamtprüfstandszeit	80 h

Gesamtkosten: a) mit stationärem Meßsystem ca. 39.000,--DM  
mit mobilem Meßsystem ca. 34.000,--DM

Die Ergebnisse des Bewertungssystems für die 2 ausgewählten Alternativen (konventionell und RNT), die zu betrachten sind, sind in den Tabellen 4,5 dargestellt.

Ergebnisse: (siehe Tabellen 4,5)

Die RNT ist für diese Art der Problemstellung und Gewichtung der konventionellen Technik in allen Belangen überlegen, wobei der Kostenvorteil bei dem gewählten Maßstab gar

Teil- ziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	20	120000	39000		50	100		1000	2000				
		20	120000	39000		50	100		1000	2000		+100%		
Zeiten	2	10	100	500		67	43		670	430				
	3	30	600	100		41	67		1230	2100				
		40	700	600		54	55		1900	2540		+33%		
T.L.	4	2	1	10 <sup>-2</sup>		40	80		80	160				
	5	10	40	10		20	80		200	800				
	6	5	50	1		33	75		165	375				
	7	3	0,2	3		90	30		270	90				
	8	0	I	V		20	100		0	0				
	9	6	10	1		50	5		300	30				
	10	0	ja	ja		100	100		0	0				
	11	14	nein	ja		0	100		0	1400				
	12	0	ja	nein		100	0		0	0				
	13	0	ja	nein		100	0		0	0				
	14	0	0	ja		0	100		0	0				
			40				50,3	60,9		1015	2855		+181%	
		Σ	100				154,3	215,9		3915	7395		+88,6%	

Tabelle 4: Ergebnisse: 1. Beispiel "Lagerproblem" (s. Kap. 5.2)

	ungewichtete Zielwerte			% Abweichung		gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten (DM)	120000	39000		+ 67,4						
Kostenbewertung	50	100		+ 100		1000	2000		+ 100	
Zeit (h)	700	600		+ 14,3						
Zeitbewertung	54	55		+ 1,8		1900	2530		+ 33	
Technische Leistungsfähigk. Bewert.	50,3	60,9		+ 21,1		1015	2855		+ 181	
<b>M</b>	154,3	215,9		+ 40		3915	7385		+ 88,6	

Tabelle 5: Ergebnisse: 1. Beispiel "Lagerproblem" (s. Kap. 5.2)

nicht voll durch die Bewertung zum Ausdruck kommt. Der Kostenmaßstab soll dennoch mit den  $\pm 50\%$  Schwankungen gegen die konventionelle Alternative beibehalten werden, sonst würden Kostenunterschiede im Bereich  $- 50\%$  punktemäßig unterrepräsentiert werden; mehr als  $+ 50\%$  zur konv. Alternative ist nicht sinnvoll, da nur schwerlich eine Bereitschaft zu finden ist, für ein neues, wenn auch mehr Informationen lieferndes Verfahren mehr als  $50\%$  als für das zur Verfügung stehende konv. Verfahren auszugeben.

Die einzelnen Ergebnisse zeigt Tabelle 4 in der letzten Ergebnisspalte. Insgesamt ist die RNT-Alternative der konventionellen Lösung um  $88,6\%$  überlegen, was sich in Nutzenpunkten 7385 zu 3915 darstellt. -

Die Ergebnisse sind zusätzlich graphisch in einem Nutzwertprofil in Abb.37 dargestellt.

Empfindlichkeitsanalysen für dieses Beispiel, bei Veränderung der Gewichtungen, resultierend aus anderen Randbedingungen, werden in Kapitel 5.4 betrachtet.

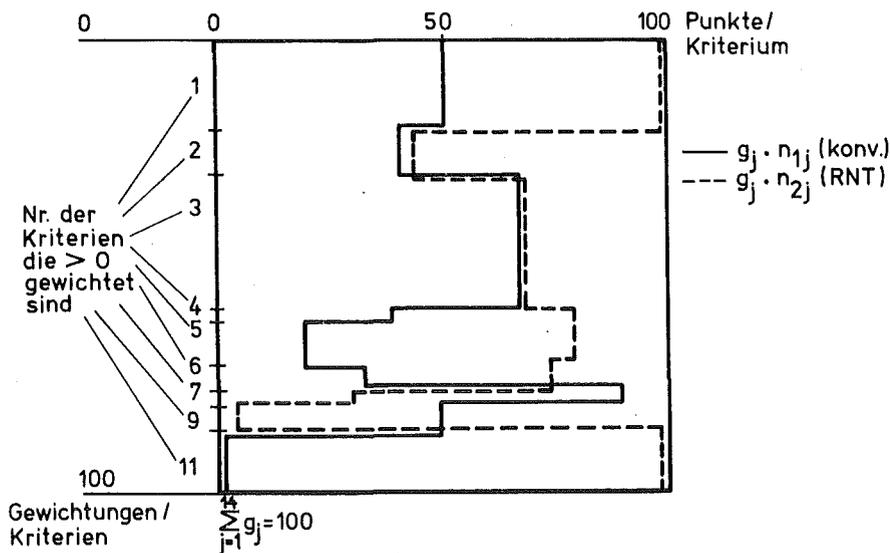


Abb.37: Wertprofil Darstellung der Ergebnisse des 1. Beispiels: Lagerproblem

### 5.3 Zusätzliche Tests mit Beispielen aus der Praxis

#### 5.3.1 Kritische Betriebspunkte für Bauteile (2. Beispiel)

Problem: Vereinzelt treten Ausfälle von Nocken-Stößel-Paarungen infolge Verschleiß auf (200 PS, 6-Zylinder-Dieselmotor).

Zielbeschreibung: Ermittlung der kritischen Betriebsgrößen am Bauteilprüfstand, wobei 4 Betriebspunkte und 2 Öltemperaturen zu untersuchen sind. Wünschenswert: 10 anstatt 4 Betriebspunkte für 2 Ölsorten und 2 Öltemperaturen.

Randbedingungen: Die technische Problemlösung genießt höchste Priorität. Kosten und Zeit spielen untergeordnete Rollen.

Gewichtung: Kosten/Zeit/technischer Leistungsfähigkeit = 20/10/70.

Konventionelle Alternative  $A_1$ : 4 Betriebspunkte bei jeweils 2 Öltemperaturen, je 100 h.  
Prüfstandszeit: 800 h  
Gesamtkosten: ca. 41.000,--DM

RNT-Alternative  $A_2$ : 10 Betriebspunkte bei jeweils 2 Ölsorten sowie 2 Öltemperaturen, je 2 h, 20 h für Reproduktion der kritischen Größen.  
Prüfstandszeit: 100 h  
Gesamtkosten:  
 $A_2$  (mobiles Meßsystem): ca. 29.000,--DM  
 $A_3$  (stationäres Meßsystem): ca. 24.000,--DM.

Ergebnisse: siehe Tabellen 6,7.

Die RNT schneidet bei geringfügig (-5,7%) ungünstigerer TL aufgrund der Kosten- und Zeitvorteile insgesamt um + 7,5% (+ 10,9%) besser ab als die konventionelle Alternative. Außerdem werden mit der RNT 10 Betriebspunkte und 2 Öle zusätzlich untersucht.

Teil- ziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	20				50	73	80	1000	1460	1600			
		20				50	73	80	1000	1460	1600	+ 46	+ 60	
Zeiten	2	5				35	15	15	175	75				
	3	5				22	58	58	110	240				
		10				28,5	36,5	36,5	285	315	315	+10,5	+10,5	
T.L.	4	0				40	80	80	0	0				
	5	20				20	50	50	400	1000				
	6	10				17	67	67	170	670				
	7	5				80	20	20	400	80				
	8	0				20	100	100	0	0				
	9	10				50	5	5	500	50				
	10	0				100	100	100	0	0				
	11	10				0	100	100	0	1000				
	12	10				100	0	0	1000	0				
	13	5				100	0	0	500	0				
	14	0				50	100	100	0	0				
			70				52,5	56,5	56,5	2970	2800	2800	-5,7	-5,7
		Σ	100				131	166	166	4255	4575	4715	+7,5	+10,9

Tabelle 6: Ergebnisse: 2. Beispiel "kritische Betriebspunkte" (s. Kap. 5.3.1)

	ungewichtete Zielwerte			% Abweichung		gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten (DM)	41000	29000	24000	+29,3	+41,5					
Kostenbewertung	50	73	80	+46	+60	1000	1460	1400	+46	+60
Zeit (h)	1000	600	600	+40	+40					
Zeitbewertung	28,5	36,5	36,5	+28	+28	285	315	315	+10,5	+10,5
Technische Leistungsfähigk. Bewert.	52,5	56,5	56,5	+7,6	+7,6	2970	2800	2800	-5,7	-5,7
<b>M</b>	131	166	173	+26,7	+32,1	4255	4575	4715	+7,5	+10,9

Tabelle 7: Ergebnisse: 2. Beispiel "Kritische Betriebspunkte" (s. Kap. 5.3.1)

### 5.3.2 Kritische Betriebsparameter für Bauteile (3. Beispiel)

Problem: Verschleißverhalten von Zylinderlaufbüchse und Kolbenring bei Verwendung verschieden legierter HD-Öle (160 PS, 6 Zylinder-Diesel-Motor).

Zielbeschreibung: Ermittlung des Ringrohrverschleißes bei Volllastbetriebspunkt für 3 verschieden legierte HD-Öle (evtl. in Abhängigkeit von verschiedenen Öltemperaturen).

Randbedingungen: a) Zeitlimit: 3 Monate

b) konventionelle Kosten erscheinen sehr hoch

c) technisch sichere Aussage zur Vorschrift der zu verwendenden Ölsorte

Gewichtung: 30/10/60.

Konventionelle Alternative  $A_1$ : 3 mal 500 h Prüfstandsstunden (können parallel gefahren werden).

Prüfstandszeit: 500 h (ges. 1500 h)

Gesamtkosten: 300.000,--DM

RNT-Alternative  $A_2$ : 40 h Einlauf, 3 mal 20 h für 3 Öle bei je- (stat.Meßsystem) weils 4 verschiedenen Öltemperaturen, 2-Komponenten-Messung.

Prüfstandszeit: 100 h

Gesamtkosten: ca. 45.000,--DM

(Sollen Bauteile reproduziert werden, kann der Versuch dreimal gefahren werden).

Ergebnisse: (siehe Tabellen 8,9)

Eindeutige Entscheidung zugunsten der RNT-Alternative (+ 94,8%). Wenn der Versuch dreimal gefahren wird, sind die RNT-Kosten immer noch unter 50% der konventionellen Kosten, so daß sich in der Kostenbewertung nichts ändert, während die Ergebnisse der Versuche um Bauteilvergleiche bereichert werden.

Teil- ziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	30				50	100		1500	3000				
		30				50	100		1500	3000		+100		
Zeiten	2	5				33	15		175	75				
	3	5				22	48		110	240		+10,5		
		10				28,5	31,5		285	315				
T.L.	4	0				40	80		0	0				
	5	20				40	80		850	1600				
	6	15				10	80		150	1200				
	7	3				90	20		270	60				
	8	2				50	100		100	200				
	9	5				100	10		500	50				
	10	0				100	100		0	0				
	11	10				0	100		0	1000				
	12	0				100	0		0	0				
	13	3				100	0		300	0				
	14	2				0	90		0	180				
			60				57,3	60		2120	4290		+102	
	Σ	100							3905	7605		+94,8		

Tabelle 8: Ergebnisse: 3. Beispiel "Ring-Rohr-Verschleiß" (s. Kap. 5.3.2)

	ungewichtete Zielwerte			% Abweichung		gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten (DM)	300000	45000		+86,3						
Kostenbewertung	50	100		+100		1500	3000		+100	
Zeit (h)	700	700		± 0						
Zeitbewertung	28,5	31,5		+10,5		285	315		+10,5	
Technische Leistungsfähigk. Bewert.	57,3	60		+ 4,7		2120	4290		+102	
<b>M</b>	135,8	191,5		+ 41		3905	7605		+94,8	

Tabelle 9: Ergebnisse: 3. Beispiel "Ring-Rohr-Verschleiß" (s. Kap. 5.3.2)

### 5.3.3 Optimierung der Werkstoffe von Bauteilen (4. Beispiel)

Problem: Vereinzelte, noch nicht alarmierende Ausfälle von Kolbenringen (100 PS, 4-Zylinder-Otto-Motor).

Zielbeschreibung: Auswahl des verschleißgünstigsten Kolbenrings aus vier zur Verfügung stehenden, kritische Betriebspunkte bekannt.

Randbedingungen: a) stärkere Zeitgewichtung  
b) sichere reproduzierbare Aussagen auch über Festigkeitsverhalten  
c) Kosten spielen keine dominierende Rolle

Gewichtung: 20/50/30

Konventionelle Alternative  $A_1$ : 2 mal 400 h Prüfstandszeit mit jeweils 2-facher Bestückung der zu untersuchenden Kolbenringe.

Prüfstandszeit (parallel gefahren): 400 h

Gesamtkosten: ca. 90.000,--DM

RNT-Alternative  $A_2$ : 4 mal 25 h für 4 verschiedene Kolbenringe.

Der als optimal gefundene Kolbenring ist einem 400 h-Dauerlauf zu unterziehen. (Evtl. doppelte Bestückung, 1-Komponentenmessung mit je 2 aktivierten Ringen).

Prüfstandszeit: 100 h + 400 h

Gesamtkosten: ca. 100.000,--DM

Ergebnisse: (siehe Tabellen 10,11)

Bei gegebener Gewichtung eindeutige Entscheidung zur konventionellen Alternative (RNT: - 40,5%). Auch die drei Teilnutzenwerte für Kosten, Zeiten und technische Leistungsfähigkeit, sprechen jeweils für die konventionelle Alternative.

Teilziele	Krit. Nr.	E	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung			
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>		
Kosten	1	20				50	39		1000	780					
		20				50	39		1000	780		-22			
Zeiten	2	20				35	15		700	300					
	3	30				50	43		1500	1290					
		50				42,5	29		2200	1590		-27,7			
T.L.	4	0				40	80		0	0					
	5	10				50	50		500	500					
	6	0				25	75		0	0					
	7	5				90	40		450	200					
	8	0				30	100		0	0					
	9	5				10	5		50	25					
	10	0				100	100		0	0					
	11	0				0	100		0	0					
	12	10				100	0		1000	0					
	13	0				100	0		0	0					
	14	6				0	90		0	0					
			30				49,5	58,2		2000	725		-63,8		
		Σ	100				142	126,2		5200	3095		-40,5		

Tabelle 10: Ergebnisse: 4. Beispiel "Werkstoffoptimierung" (s. Kap. 5.3.3)

	ungewichtete Zielwerte			% Abweichung		gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten (DM)	90000	100000		-11,1						
Kostenbewertung	50	39		-22		1000	780		-22	
Zeit (h)	500	1000		-100						
Zeitbewertung	42,5	29		-31,8		2200	1590		-22,7	
Technische Leistungsfähigk. Bewert.	49,5	58,2		+17,6		2000	725		-63,8	
<b>M</b>	142	126,2		-11,1		5200	3095		-40,5	

Tabelle 11: Ergebnisse: 4. Beispiel "Werkstoffoptimierung" (s. Kap. 5.3.3)

#### 5.4 Empfindlichkeitsanalysen des Systems durch Veränderung der Kriterien-Gewichtungen für die behandelten Beispiele

##### 1. Beispiel: Lagerversuch

Für das behandelte Beispiel "Lagerproblem" (siehe Kapitel 5.2) wurde das Bewertungssystem getestet, wie empfindlich es reagiert. Drei Fallunterscheidungen wurden getroffen:

- a) Die Zeit hat keine Priorität, die Kosten und die technische Leistungsfähigkeit sind 40/60 gewichtet.

Ergebnis: siehe Tabelle 12

Bei dieser Gewichtsverteilung ist die RNT insgesamt zu 98,5% besser beurteilt als die konventionelle Alternative.

- b) Gleiche Kosten und Zeitpriorität bei Forderung nach hoher technischer Leistungsfähigkeit bezüglich Reproduzierbarkeit, Anzahl der Meßstellen sowie Messungen der Verschleißverteilung.

Ergebnis: siehe Tabelle 13

Die kostengünstigere RNT (100%) wird durch die Forderungen nach Verschleißverteilungsmessungen etc., bei der technischen Leistungsfähigkeit relativ um 35% schlechter beurteilt als die konventionelle Alternative, was absolut im Gesamtergebnis sich zu -18,6% widerspiegelt. Das System reagiert sehr stark auf die Forderung der technischen Leistungsfähigkeit. Die Kosten der RNT, die nur ca. 30% der der konventionellen Alternativen betragen, sowie der Absolutunterschied von ca. 80.000,--DM kommen dem gegenüber nicht so sehr stark zum Ausdruck. Es muß überlegt werden, ob Messungen von Verschleißverteilungen wirklich eine so hohe Priorität genießen wie vorher angenommen wurde und ob evtl. mit Angaben über Verschleißraten-Änderungen zufrieden wäre.

- c) Gewichtung: 20/20/60 (jedoch techn. Leistungsfähigkeit unterschiedlich zu b)).

Ergebnis: siehe Tabelle 14

Die RNT wird bezüglich der Kosten und technischen Leistungsfähigkeit ca. 100% besser beurteilt, bei etwa gleicher Zeitdauer.

2. Beispiel: Nocken-Stößel-Verschleiß (s.a.Kap.5.3.1)

Die Ausfälle in der Serie treten gehäuft auf. Die Zeit zur Problemlösung erhält höhere Priorität.

Gewichtung: 10/60/30

Ergebnis: siehe Tabelle 15

Die RNT ist etwas schneller in der Ergebnisbereitstellung und erhält infolge der höheren Zeitgewichtung weitere Vorteile. Die TL verschiebt sich bei niedrigerer Gewichtung zugunsten der RNT. Die RNT war bei der Gewichtung 20/10/70 ca. 7 - 11% günstiger als die konventionelle Technik. Mit der Gewichtung 10/60/30 liegt die RNT um 34 - 36% günstiger.

Teilziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	40							2000	4000				
		40							2000	4000		+100		
Zeiten	2	0							0	0				
	3	0							0	0				
		0							0	0		±0		
T.L.	4	5							200	400				
	5	20							400	1600				
	6	10							330	750				
	7	0							0	0				
	8	0							0	0				
	9	10							500	50				
	10	0							0	0				
	11	10							0	1000				
	12	5							500	0				
	13	0							0	0				
	14	0							0	0				
			60							1930	3800		+97	
		Σ	100							3930	7800		+98,5	

Tabelle 12: Ergebnisse: 1. Beispiel (a. Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

Teil- ziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	20							1000	2000				
		20							1000	2000		+100		
Zeiten	2	10							670	430				
	3	10							410	670				
		20							1080	1100		+1,85		
T.L.	4	0							0	0				
	5	20							800	1600				
	6	0							0	0				
	7	0							0	0				
	8	0							0	0				
	9	20							1000	100				
	10	0							0	0				
	11	0							0	0				
	12	20							2000	0				
	13	0							0	0				
	14	0							0	0				
		60								3800	2400		-35	
		Σ	100							5880	4800		-18,6	

Tabelle 13: Ergebnisse: 1. Beispiel (b. Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

Tabelle 14: Ergebnisse: 1. Beispiel (c. Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

Teilziele	Krit. Nr.	s	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung		
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>	
Kosten	1	20							1000	2000				
		20							1000	2000		+100		
Zeiten	2	10							670	430				
	3	10							410	670				
		20							1080	1100		+1,85		
T.L.	4	0							0	0				
	5	20							800	1600				
	6	0							0	0				
	7	0							0	0				
	8	0							0	0				
	9	20							1000	100				
	10	0							0	0				
	11	20							0	2000				
	12	0							0	0				
	13	0							0	0				
	14	0							0	0				
			60							1800	3700		+105,5	
		Σ	100							3880	6800		+96	

Teil- ziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten	1	10							500	730	800		
		10							500	730	800	+46	+60
Zeiten	2	30							1050	450			
	3	30							660	1740			
		60							1710	2190	2190	+28,1	+28,1
T.L.	4	0							0	0			
	5	10							200	500			
	6	5							85	335			
	7	2							160	40			
	8	0							0	0			
	9	4							200	20			
	10	0							0	0			
	11	4							0	400			
	12	3							100	0			
	13	2							200	0			
	14	0							0	0			
			30							945	1295	1295	+37,1
	Σ	100							3155	4215	4285	+33,6	+35,8

Tabelle 15: Ergebnisse: 2. Beispiel (Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

3. Beispiel: Ring-Rohr-Verschleiß (Öltest) (s.a.Kap.5.3.2)

Das Verschleißverhalten von Zylinderlaufbüchse und Kolbenringen soll verstärkt als Beurteilungskriterium für Öle herangezogen werden. Das zur Verwendung gelangende Verfahren soll routinemäßig eingesetzt werden und somit in erster Linie kostengünstig arbeiten.

Gewichtung: 70/10/20

Ergebnis: siehe Tabelle 16

Die RNT verschlechtert sich bei höherer Gewichtung der Kosten von insgesamt +94,8% auf + 89,2% gegenüber der konventionellen Technik, die TL geht relativ, bei niedrigerer Gewichtung von + 102% auf +70,7% zurück.

4. Beispiel: (Kolbenring-Verschleiß (Werkstoffoptimierung)  
(s.a.Kap. 5.3.3)

Es sollen grundsätzlich Untersuchungen gemacht werden, wobei jetzt auf die Messung des Verschleißratenverlaufs zusätzlicher Wert gelegt wird. Kosten- und Zeitprioritäten treten zurück.

Gewichtung: 10/20/70

Ergebnis: siehe Tabelle 17

Insgesamt ergeben sich fast gleiche Nutzenskizzen für beide Verfahren mit einem geringfügigen Plus von 2,7% zugunsten der RNT, die vorher -40,5% gegenüber der konventionellen Technik erreichte. Wenn die zusätzliche Meßmöglichkeit von Verschleißraten die Kostendifferenz von 10.000,--DM, sowie die Zeitverzögerung des Gesamtergebnisses von 500 h wert ist, wäre die RNT-Alternative zu wählen. Andernfalls die konventionelle Alternative.

Teilziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung			
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>		
Kosten	1	70							3500	7000					
		70							3500	7000		+100			
Zeiten	2	5							175	75					
	3	5							110	240					
		10							285	315		+10,5			
T.L.	4	0							0	0					
	5	7							280	560					
	6	5							50	400					
	7	1							90	20					
	8	0							0	0					
	9	2							200	20					
	10	0							0	0					
	11	4							0	400					
	12	0							0	0					
	13	1							100	0					
	14	0							0	0					
			20							820	1400		+70,7		
		Σ	100							4605	8715		+89,2		

Tabelle 16: Ergebnisse: 3. Beispiel (Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

Tabelle 17: Ergebnisse: 4. Beispiel (Empfindlichkeitsanalyse s. Kap. 5.4)

Teilziele	Krit. Nr.	g	Zielerträge			Zielwerte			gewichtete Zielwerte			% Abweichung	
			A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>2</sub> /A <sub>1</sub>	A <sub>3</sub> /A <sub>1</sub>
Kosten	1	10							500	390			
		10							500	390		-22	
Zeiten	2	10							350	150			
	3	10							500	430			
		20							850	580		-31,8	
T.L.	4	10							400	800			
	5	20							1000	1000			
	6	5							125	375			
	7	5							450	200			
	8	0							0	0			
	9	10							100	50			
	10	0							0	0			
	11	10							0	1000			
	12	10							1000	0			
	13	0							0	0			
	14	0							0	0			
		70							3075	3575		+16,2	
	Σ	100							4425	4545		+2,7	

## 5.5 Günstige Probleme für die RNT

Das erstellte Bewertungssystem ist anhand von typischen Problemstellungen aus der Industrie getestet und Empfindlichkeitsanalysen unterzogen worden.

In diesem Abschnitt wird ein Résumé der erhaltenen Ergebnisse gezogen, wobei insbesondere die Problemstellungen herausgestellt werden, für welche die RNT die günstigste Alternative zur Lösung bietet.

### a) Kostenspezifisch

In den Abb.38 und 39 sind die Kostenverhältnisse von konventionellen- und RNT-Kosten über der Anzahl der zu untersuchenden Bauteile und Betriebspunkte dargestellt.

Soll nur ein Bauteil gezielt untersucht werden, so ist die RNT immer die günstigste Alternative. Der Wert 10 h/Betriebspunkt für die RNT ist bewußt hoch angesetzt. In dieser Zeit lassen sich die meisten Probleme bewältigen. Die 50 h/Betriebspunkt für die konventionellen Verfahren sind in etwa die untere Nachweisgrenze. Die meisten Bauteile müssen länger betrieben werden, um mit konventionellen Verfahren Verschleiß zu messen (siehe auch Kapitel 3.3.3.2). Das Kostenverhältnis für die RNT wird also oft besser liegen als in Abb.38 gezeigt. Die Kostenvorteil für die RNT wird größer mit wachsender Leistung der zu untersuchenden Motoren.

Mit der Anzahl der zu untersuchenden Bauteile (Abb.39) verschiebt sich das Kostenverhältnis zugunsten der konventionellen Verfahren. Die RNT kann pro Versuch höchstens drei Bauteile untersuchen. Daraus ergeben sich die "Kostensprünge" in Abb.39. Bis zu drei Bauteilen benötigt die RNT, z.B. um 10 Betriebspunkte zu untersuchen, 100 Stunden. Die Bauteile 4 - 6 erfordern einen neuen Versuchslauf von wiederum 100 Stunden.

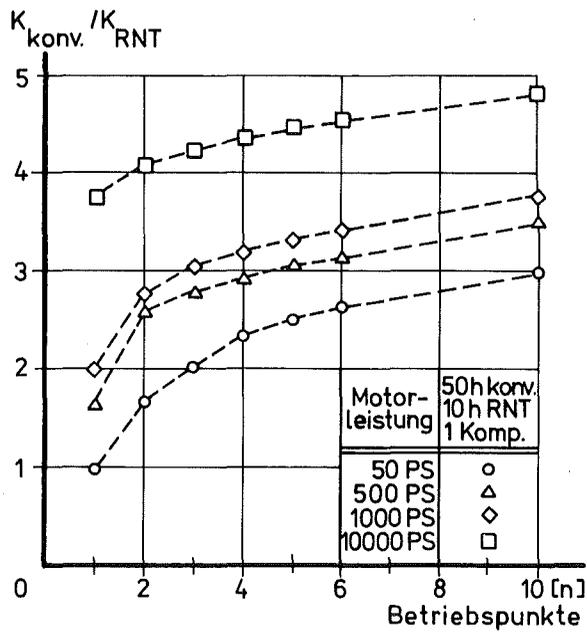


Abb.38: Kostenverhältnisse von konventionellen und RNT-Kosten für zu untersuchenden Betriebspunkte

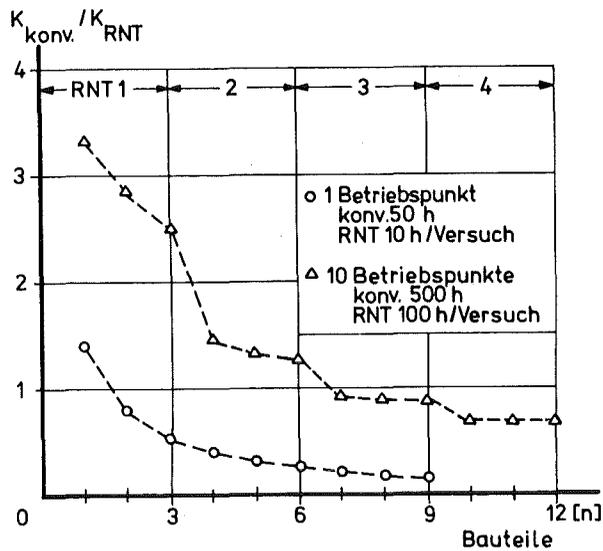


Abb.39: Kostenverhältnisse von konventionellen und RNT-Kosten für zu untersuchende Bauteile

b) Zeitspezifisch

Die RNT ist bei Berücksichtigung des Kriteriums Zeit bei vielen Problemen etwas langsamer als die konventionellen Methoden, was aber nur auf die Zeit zur Bereitstellung der aktivierten Bauteile zurückzuführen ist. Dieser Nachteil wirkt sich allerdings nur dann aus, wenn kurzfristig zu lösende Probleme auftreten (z.B. gehäufte Ausfälle von Serienteilen). Wenn es von der Halbwertszeit der Radionuklide her möglich ist, (HWZ > 50 Tage) kann die RNT infolge Lagerhaltung aktivierter Bauteile, auch kurzfristige Probleme schneller als die konventionelle Technik lösen.

c) Technische Leistungsfähigkeit-spezifisch

Die RNT ist dann günstig, bzw. die einzige Meßmöglichkeit, wenn Verschleißratenänderungen in kurzen Zeiten zu messen sind (z.B. Einlaufverschleiß). In Konkurrenz zu den konventionellen Verfahren bietet die RNT durchweg kleinere Streubereiche beim Vergleich (Reproduzierbarkeit) von Betriebspunkten.

Verschleißmessungen mit der RNT können von einem Rechner ausgewertet direkt während des Versuchslaufs dargestellt werden. Die RNT bietet bei einem Ausfall des Versuchsmotors bzw. des Versuchsteils eine lückenlose Information bis zu diesem Zeitpunkt, während die konventionelle Technik u.U. einen 100%-igen Informationsverlust erleidet, d.h. ohne Ergebnis bleibt.

## 5.6 Beispiel einer statischen Investitionsrechnung

Das vorliegende Bewertungssystem ermöglicht es, aus der Summe der insgesamt auftretenden Verschleißprobleme diejenigen auszusondern, welche mit der RNT günstiger gelöst werden können.

Eine Vielzahl der RNT-günstigen Problemstellungen läßt sich mit geringeren Kosten lösen als mit konventionellen Verfahren. Einsparungen, die sich aufgrund von Entwicklungszeitverkürzungen ergeben, sind in der Praxis weit schwerer zu er-

fassen. Ebenso diejenigen Einsparungen, die sich aus zusätzlichen Informationen mit der RNT ergeben.

Eine Investitionsrechnung für RNT-Meßverfahren läßt sich auf der Basis der Kostenvergleichsrechnungen zur Lösung von Verschleißproblemen durchführen. Die Gesamtkosten zur Lösung von Verschleißproblemen mit konventionellen- und RNT-Verfahren lassen sich direkt ermitteln. Die Kostendifferenzen ( $K_{\text{konv.}} - K_{\text{RNT}}$ ) sind die direkten Einsparungen durch Einsatz der RNT. Dem gegenüber stehen die Investitionen für RNT-Meßsysteme, sowie die Betriebskosten.

Aus der Summe der günstigen Verschleißprobleme für die RNT läßt sich der Auslastungsgrad einer RNT-Meßanlage bestimmen. Über diesen tatsächlichen Auslastungsgrad, sowie der Abschreibungszeit der Meßanlage, errechnen sich die Gesamtkosten.

$$\text{POP: I} = \frac{\text{Kapitaleinsatz DM}}{\text{durchschnittl. Rückfluß DM/Jahr}} \text{ Jahre}$$

POP: Pay of Period, I: Kapitalrückflußzeit

Der Kapitaleinsatz setzt sich zusammen aus der Investition für das RNT-Meßsystem plus den Umstellungs- bzw. Anlaufkosten für die neue Anlage. Der Rückfluß ergibt sich aus der Differenz der Gesamtkosten für n-Verschleißproblemlösungen mit konventionellen Verfahren und n-Verschleißproblemlösungen mit RNT-Verfahren.

Beispiel:

1. Kapitaleinsatz

Investitionssumme für Meßsystem: 150.000,--DM (5 Jahre Abschreibung)	
Gebäudeanpassung: (20 Jahre Abschreibung)	100.000,--DM
Strahlenschutzgeräte (5 Jahre Abschreibung)	50.000,--DM
Anlaufkosten	<u>50.000,--DM</u> 350.000,--DM

## 2. Rückfluß/Jahr

Die Verschleißprobleme einer Firma ergeben z.B. eine Auslastung der Anlage von 600 h/Jahr.

(bei 5 Jahre Nutzendauer): 50,--DM/h.

Die Problemstellungen, die in dieser Zeit gelöst werden, ergeben Einsparungen von 175.000,--DM gegenüber konventionellen Verfahren.

d.f.:  $\rightarrow$  I = 2 Jahre.

Nach den Richtwerten für Dringlichkeiten von Investitionen besteht 1.Dringlichkeitsstufe, da die Investitionen innerhalb von 2 Jahren rückverdient werden, d.h. die Rückflußrendite beträgt 50% pro Jahr [23].

Es liegt hier eine gewünschte Rationalisierungs- und Ersatzinvestition vor.

Bei einer technisch wirtschaftlichen Nutzenzeit der Meßanlage von 5 Jahren ist sozusagen der "Break-Even-Point", ab dem die Anlage zu direkten Einsparungen führt, nach 2 Jahren erreicht.

### 5.7 Beispiel eines Verfahrensvergleiches

Ist die Entscheidung von der Kostenseite zugunsten der RNT gefallen (wie im Beispiel in 5.6), sind zusätzlich zur Entscheidung über die Anschaffung eines Meßsystems die unternehmenspolitischen Kriterien heranzuziehen.

Es ist vorgeschlagen worden, eine NWA II zu machen mit den 4 Kriterien (s.a.Abb.36).

1. Kosteneinsparungen
2. Umweltbelastung
3. Ausreifegrad
4. Abhängigkeiten

Hierzu folgendes Beispiel:

1. Einsparungen: 525.000,--DM/5 Jahre (Nutzendauer der Anlage)  
= 105.000,--DM/Jahr
2. Umweltbelastung: Innerhalb der Richtlinien der 1.Strahlenschutzverordnung keine Gefährdung, geringes Risiko.
3. Ausreifegrad: Insgesamt schlechter als konventionelle Verfahren.
4. Abhängigkeit: Starke Abhängigkeit von Spezialisten und Organisationen (Aktivierungen von Bauteilen)

Gewichtung: 40/10/30/20

Krit.	Gewichtung g	ungew.Zielwerte für		gew.Zielwerte für		% Abw.: $A_2/A_1$
		$A_{1, \text{konv.}}$	$A_{2, \text{RNT}}$	$A_{1, \text{konv.}}$	$A_{2, \text{RNT}}$	
1	40	0	100	0	4000	
2	10	100	80	1000	800	
3	30	100	50	3000	1500	
4	20	100	20	2000	400	
$\sum_{i=1}^4$	100			6000	6700	+11,5%

Ergebnis:

Die RNT-Alternative, die zu Kosten-Einsparungen von 525.000,--DM führen kann, wird trotz schlechterem Ausreifegrad und starken Abhängigkeiten gegenüber Spezialisten und Organisationen insgesamt 11,5% günstiger beurteilt als die konventionelle Alternative.

## 6. M A R K T P R O G N O S E F Ü R R N T - V E R - S C H L E I S S M E S S V E R F A H R E N

In den bisherigen Darstellungen wurde ein entwickeltes System erläutert, das es gestattet, innerhalb einer Entscheidungshierarchie die Verschleißproblemstellungen auszusondern, welche mit der RNT technisch vorteilhaft und wirtschaftlich günstig gelöst werden können. Das Feld für diese Fälle wurde abgesteckt. Außerdem wurde darauf hingewiesen, welche Risiken beim Einsatz der RNT-Verfahren auftreten und am Beispiel diese Risiken dem Rentabilitätsgrad des Meßsystems gegenübergestellt.

In diesem abschließenden Kapitel sollen die Bedingungen und Abhängigkeiten aufgezeigt werden, die für den routinemäßigen Einsatz der RNT-Verfahren und somit eine günstige Marktentwicklung maßgebend sind. In Abb.40 ist eine Struktur dieser Parameter dargestellt. Daraus läßt sich eine grobe Marktprognose formulieren.

### 6.1 Meßsystem bezogene Faktoren

#### 6.1.1 Ausreifegrad der Meßsysteme

##### a) Meßanlage

Eine RNT-Meßanlage wird in industriemäßiger Ausführung bereits bei der Firma AVIA-Test in Lizenz gebaut. Diese Anlage ist derart flexibel aufgebaut, daß die verschiedenen Problemstellungen nach Durchflußverfahren und Dünnschichtdifferenzverfahren gelöst werden können. Je nach Häufigkeit von Verschleißproblemen könnte es sinnvoll sein, diese Art von Anlage als problembezogenes Meßsystem weiterzuentwickeln, unter Einschränkung der Flexibilität, aber mit vereinfachter Bedienbarkeit.

##### b) Aktivierungen

Auf dem Gebiet der Bestrahlung von Maschinenbauteilen sind folgende Punkte wesentlich für die Zukunft:

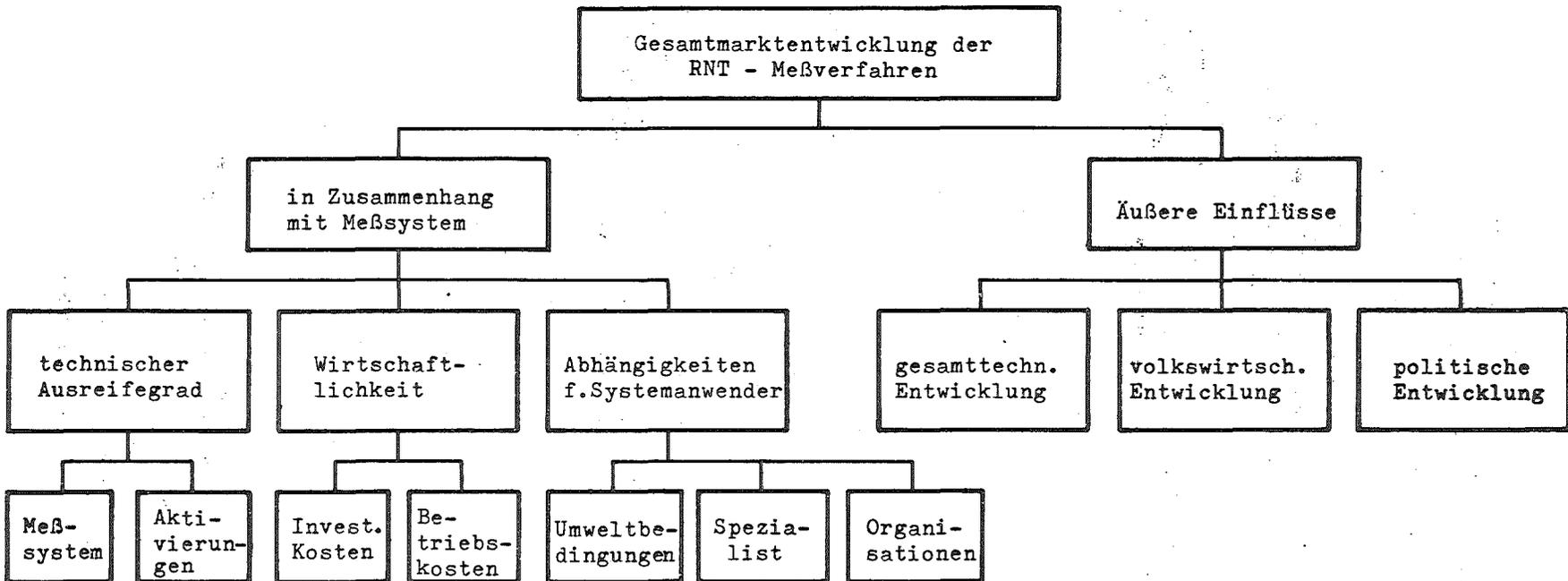


Abb.40: Struktur der Bedingungen und Abhängigkeiten für Markt-Entwicklung der Radionuklidtechnik

- Die Aktivierbarkeit der wichtigsten Metalle im Motorenbau ist überprüft [15]. Für einige Bauteile (Lager, Wellen, Zylinderbüchsen, Kolbenringe) werden Aktivierungen routinemäßig vorgenommen.
- Für noch nicht erfaßte Metalle und Legierungen müssen Untersuchungen zur Aktivierbarkeit durchgeführt werden.
- Die Bestrahlungen sind in Zukunft mit sicher angebbaren Streubereichen durchzuführen.
- Die Genauigkeit der Meßmethoden ist z.B. durch gezielte Entwicklung von Schrägbestrahlung zu steigern.
- Bestrahlungsmöglichkeiten von komplizierten Geometrien (wie z.B. Verzahnungen) sind zu erweitern.

#### 6.1.2 Wirtschaftliche Faktoren

Das Meßsystem kann von den Investitionskosten her billiger werden, bei der Serien-Produktion (wenn auch nur in Kleinserie). Das Meßsystem selbst kann rentabel ab einem bestimmten Auslastungsgrad (ca. 25 - 35% Auslastung bzw. 400 - 600 Betriebsstunden) und für RNT günstige Verschleißprobleme arbeiten. Die Betriebskosten sind in erster Linie abhängig von der Anzahl aktivierter Bauteile bzw. der Auslastung der aktivierten Bauteile pro Versuch. Die Aktivierungskosten für Bauteile bezüglich der Dünnschichtaktivierung könnten bei Erstellung eines speziellen Beschleunigers für Maschinenbauteilaktivierungen durch die Industrie gesenkt werden.

Abschätzungen für die Erstellung und den Betrieb eines solchen Zyklotrons haben bei den aufgeführten Leistungsdaten zu folgenden Kostenwerten geführt:

a) Leistungen:	p	: 26,5	MeV	
	d	: 15	MeV	
(Energien):	$\alpha$	: 30	MeV	bei Strahlstromstärken von
	He 3:	39	MeV	20 - 30 $\mu$ A extern

b) Gesamtkosten: Ca.  $10^6$  DM/a (bei 10% Anlagenabschreibung und 5% Gebäudeabschreibung sowie Personal: 1 Akademiker, 2,5 Ingenieure, 8 Operateure)

c) Bestrahlungskosten (Kostendeckung): (230 Arbeitstage bei 24 h Schichtbetrieb): Ca. 5500 h/a.  
bei 50% Auslastung (= 2750 h/a): Ca. 360 DM/h,  
bei 70% Auslastung (= 3850 h/a): Ca. 265 DM/h.

Bei den Bestrahlungskosten ist zu beachten, daß die Bestrahlzeit selbst größer ist als die Aktivierungszeit pro Bauteil, weil je nach Größe und Geometrie der zu bestrahlenden Fläche Verlustzeiten auftreten.

Heute werden vom LIT bei Bestrahlungen am Zyklotron Karlsruhe bei derzeitiger personeller Besetzung ca. 700 Bestrahlstunden geleistet. Bei optimaler personeller Besetzung und optimaler Auslastung der vom LIT zur Verfügung stehenden Zeit sind ca. 1600 Stunden möglich.

Eine Meßanlage in der Industrie benötigt unter den Voraussetzungen

- a) durchschnittliche Anzahl akt. Teile/Prüflauf: 1,5 Stück
- b) durchschnittliche Aktivierungszeit pro 1,5 Bauteile: 10 Std.
- c) durchschnittliche Programmlänge (h)/Prüflauf: 50 Std.

und den Grenzfällen:

- a) 25% Auslastung der Meßanlage } (1. bezogen auf 8 h-Tag,  
230 Arbeitstage = 1840 h)
- b) 50% Auslastung der Meßanlage } (2. bezogen auf 24 h-Tag,  
300 Arbeitstage = 7200 h)

a<sub>1</sub>) 460 h                      a<sub>2</sub>) 1800 h

b<sub>1</sub>) 920 h                      b<sub>2</sub>) 3600 h

folgende Anzahl von Bestrahlstunden/Jahr und Meßanlage für

a <sub>1</sub> ) 92 h	b <sub>1</sub> ) 184 h
a <sub>2</sub> ) 360 h	b <sub>2</sub> ) 720 h

Vergleicht man diese Werte mit den fiktiven Kostenwerten eines Kompakt-Zyklotrons bei 50%-Auslastung, erhält man folgende Aussagen:

Bei pessimistischer Betrachtung der Auslastung von Meßanlagen (Fall a<sub>1</sub>) müssen ca. 25 Meßsysteme betrieben werden, um ein Kompakt-Zyklotron zu rechtfertigen. Bei mittlerer Auslastung von Meßsystemen (Fall b<sub>1</sub>) müssen 12 Meßsysteme bei optimistischer Betrachtung der Auslastung von Meßsystemen ca. 6 Meßsysteme betrieben werden.

### 6.1.3 Abhängigkeiten bei der Anwendung des Meßsystems

#### a) Umweltbelastung durch Meßsystem

Die Grenzwerte für die zulässigen Aktivitäten bezüglich Umweltbelastung (z.B. Aktivitäten in Auspuffgasen) sowie der Belastung des strahlenexponierten Personals, sind durch die 1. Strahlenschutzverordnung und die Umgangsgenehmigungen für Meßsystem-Anwender gegeben. Diese Werte sind bei Meßsystemanwendung einzuhalten.

Die durch Bestrahlungen von Maschinenteilen auftretende Gesamtaktivität wurde mit einer Trendextrapolation mit den erfaßten Bestrahlungszeitwerten von 1968 - Mitte 1974, bis zum Jahr 1980 gemacht (Abb.41).

Daraus ergeben sich bei einem Limit der Bestrahlstunden von 1680 h/a folgende Gesamtaktivitätswerte:

$$1974: \text{ca. } 1,5 \cdot 10^4 \mu\text{Ci}$$

$$1980: \text{ca. } 3-4 \cdot 10^4 \mu\text{Ci}$$

Mit der sicheren Abschätzung, daß die Aktivität durch Abdeckungen, die für die Bestrahlungen benötigt werden, höchstens 10 mal so groß ist wie die der Masch.-Teile, ergibt sich im Jahre 1980 eine Gesamtaktivität durch Beschleuniger-aktivierte Maschinenteile von ca.  $3-4 \cdot 10^5 \mu\text{Ci}$ .

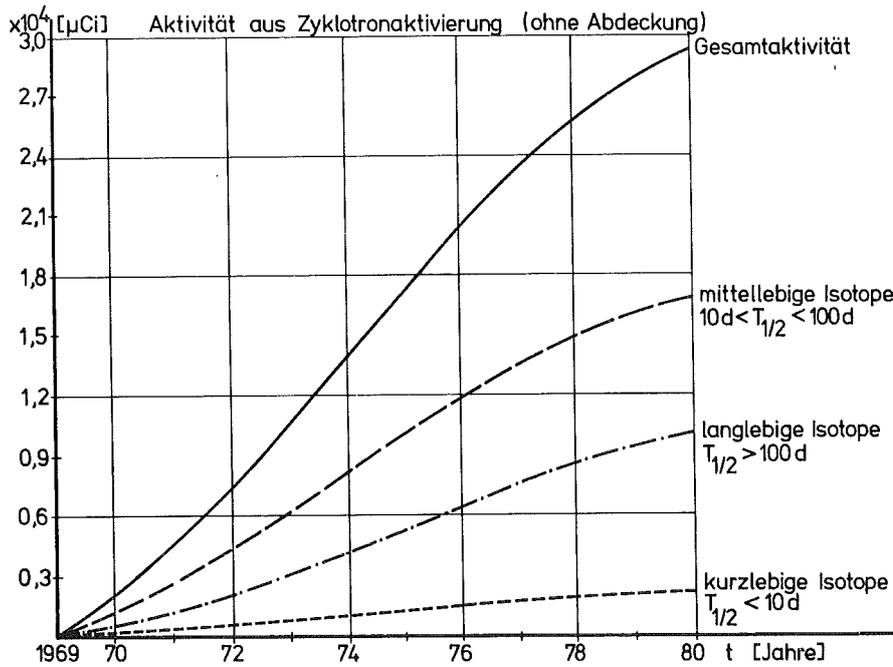


Abb.41: Trendextrapolation für anfallende Aktivität aus Bestrahlungen von Maschinenteilen mit geladenen Teilchen

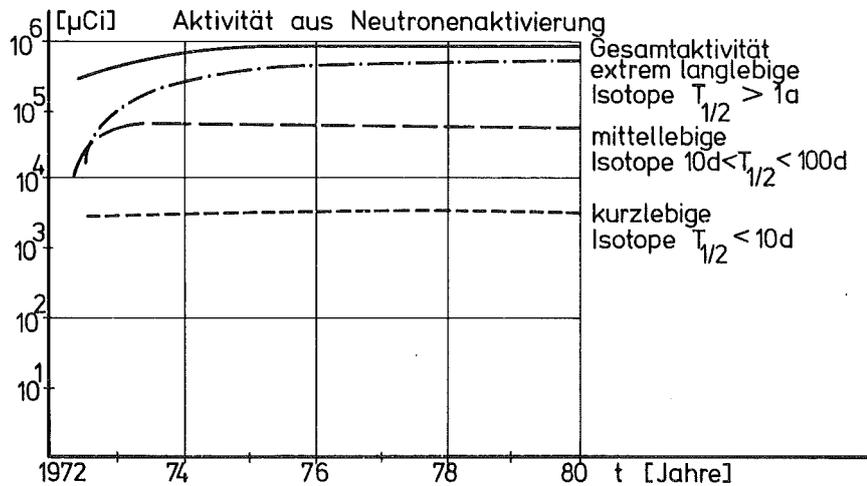


Abb.42: Trendextrapolation für anfallende Aktivität aus Bestrahlung von Maschinenteilen mit Neutronen

Betrachtet man eine äußerst günstige Entwicklung der RNT (Voraussetzung 2 Beschleuniger werden gebaut), so wäre 1980 ein Bedarf von 10 000 Bestrahlstunden vorhanden und somit die erzeugte Aktivität um den Faktor 7 größer als die mit dem bisherigen Kapazitätslimit errechnete:

$$\text{ca. } 2-3 \cdot 10^6 \mu\text{Ci} = 2-3,5 \text{ Ci.}$$

Mit Neutronen werden nur noch sehr wenig Teile bei ungleichmäßiger zeitlicher Verteilung übers Jahr bestrahlt. Man kann davon ausgehen - es ist nahezu unmöglich eine Zeitfunktion zu formulieren -, daß insgesamt die Aktivität aus Neutronenaktivierung konstant bleibt. Sie beträgt dann ca. 1 Ci, siehe Abb.42.

Bei Betrachtung eines geschätzten Maximalbedarfs von Maschinenbauteilen bei sehr günstiger Entwicklung der RNT (siehe auch oben), würde die Neutronenaktivität ebenfalls um den Faktor 7 größer sein im Jahre 1980 und somit ca. 7 Ci betragen.

Insgesamt kann man davon ausgehen, daß die geschätzte Maximal-Aktivität aus der Bestrahlung von Maschinenbauteilen und deren Abdeckungen im Jahr 1980 höchstens ca. 10 Ci betragen wird.

#### b) Abhängigkeiten von Spezialisten und Organisationen

Die RNT-Meßverfahren können zu relativ einfach bedienbaren Meßsystemen weiterentwickelt werden. Zur Anwendung der RNT werden trotzdem Fachkräfte notwendig sein. Es ist eine Aufgabe des Staates, Ausbildungswege und Möglichkeiten gezielt für die RNT zur Verfügung zu stellen, und zwar auf Techniker- sowie Ingenieur-Ebene. Der Industrie ist es auf Dauer nicht zumutbar, Systeme einzusetzen, die nur von wenig, speziell geschulten Fachleuten bedienbar sind. Die Abhängigkeit von den durch Forschungseinrichtungen bereitgestellten Bestrahlungskapazitäten kann nur durch Eigeninvestition der Industrie (s.a. Kap.6.1.2) beseitigt werden.

## 6.2 Äußere Einflüsse auf die Marktentwicklung der RNT

Die ganzen bisherigen Betrachtungen sind nur dann realistisch, wenn sich die RNT innerhalb der gesamttechnischen Entwicklung behaupten kann, auch gegen evtl. neue potentielle Konkurrenten.

Das gleiche gilt für politische Einflüsse, die sich z.B. in drastisch verschärften Strahlenschutzverordnungen ausdrücken könnten.

Auch volkswirtschaftliche sowie branchenbezogene wirtschaftliche Entwicklungen können sich auf den Einsatz der RNT-Verfahren auswirken. Dies soll an einem Beispiel erläutert werden.

Ein wesentlicher Teil der Motorenentwicklung bezieht sich auf die Automobilindustrie. Eine Shell-Prognose über die Motorisierung in der Bundesrepublik aus dem Jahre 1973 [35] weist darauf hin, daß wir auf eine Sättigungsgrenze zustreben. Die Hochrechnungen ergeben bei ungestörter Entwicklung die Sättigungsgrenze 1990, bei von außen gestörter Entwicklung bereits 1982. Diese äußeren Einflüsse berücksichtigen jedoch noch nicht eine "Ölkrise" (bzw. "Rohstoffkrise").

Folgendes Szenario wurde abgefaßt, das auf die Automobil-Markt-Entwicklung eingeht sowie die äußeren konkurrierenden Einflüsse für die Motorenentwicklung und die sich daraus ergebenden Konsequenzen, z.B. für den Einsatz der RNT.

### Szenario für Automobil (PKW)-Markt-Entwicklung:

1. Es kann davon ausgegangen werden, daß die Zahl der Neuzulassungen im Inland stagniert, d.h. sich auf einen festen Wert pro Jahr einpendelt.
2. Der Exportanteil kann nicht mehr vergrößert werden. Es wird zu einer Stagnation kommen, d.h. man muß in der PKW-Industrie ohne Zuwachsraten leben. Für den F+E-Bereich bedeutet das ein Einfrieren des Budgets. Strenge Prioritäten zur Mittelverteilung müssen gesetzt werden, wobei sich die

Zielsetzung für die Motorenentwicklung an Forderungen wie folgt orientieren muß:

- Umweltfreundlichkeit
- weitgehende Wartungsfreiheit
- gutes Langzeitverhalten
- Energie-Einsparung
- Rohstoff-Optimierung (Rezyklierfreundlichkeit)

Im Jahre 1935 wurden die Mittel im F+E-Bereich für Motor und Karosserie (Styling) im Verhältnis 60/40 aufgeteilt. Bis Ende der 60-iger Jahre erfolgte eine Verschiebung des Verhältnisses zugunsten des Stylings zu 30/70, während seitdem wieder der umgekehrte Trend wahrzunehmen ist 3. Dabei liegen die Schwerpunkte z.B. auf Motor (Umwelt) und Fahrgastzelle, Bremsen.

Die Forderungen für die Motorenentwicklung führen grundsätzlich zu konkurrierenden Zielen, so z.B.

a) Umweltfreundlichkeit

Es werden möglichst saubere Abgase gefordert, was wiederum eine optimale Verbrennung bzw. guten Wirkungsgrad verlangt. Dies wiederum bedingt hohe Verdichtungen, was Blei im Kraftstoff erforderlich macht, das sich in die Umwelt niederschlägt. Nieder verdichtete Motoren können mit bleifreien Kraftstoffen betrieben werden, jedoch arbeiten diese Motoren mit schlechteren Wirkungsgraden, d.h. sie verbrauchen relativ mehr Kraftstoff pro Leistungseinheit, was im Endeffekt bedeutet, daß die Absolutwerte der Schadstoffe im Abgas eher größer werden. Es wird immer ein Kompromiß notwendig sein, bei dem einige Faktoren optimiert werden können, auf Kosten der restlichen.

b) Politische Einflüsse

Weltweit durchgesetzte Geschwindigkeitsbeschränkungen bedingen keine Hochleistungsmotoren. Aufgrund der Anfor-

derungen der passiven Sicherheit wird das Automobil schwerer werden. Zur aktiven Sicherheit des Automobils sind jedoch genügende Motorleistungen erforderlich.

#### Folgen für die Motorenentwicklung:

Diese Auflistung von Problemen, die nur beispielhaft ist, zeigt deutlich, daß sehr viele konkurrierende Faktoren vorhanden sind, mit denen sich die Motorenentwicklung auseinandersetzen muß. Bei einem begrenzten konstanten F+E-Budget werden strenge Prioritätensetzungen für den Motorenentwicklungsbereich nötig sein.

Neu- bzw. Umkonstruktionen von Motoren werden erforderlich, Dabei sind für die Verschleißprobleme im Verhältnis zu den Umwelt- und sonstigen politischen Einflüssen unterworfenen Problemen relativ weniger Mittel vorhanden.

Die Summe der Verschleißprobleme wird etwa konstant bleiben. Der Etat für die Lösung wird eher kleiner. Darum müssen Einsparungen erfolgen.

#### Folgen für die RNT:

Die RNT kann ihren Beitrag leisten, indem sie gezielt eingesetzt wird. Die Folgen können Verkürzung von Entwicklungszeiten und Einsparungen sein, insbesondere von Prüfstandskosten.

In Abb.43 ist die mögliche Entwicklung der RNT bis zum Jahre 1985 im Vergleich zur konventionellen Technik dargestellt, unter der Annahme der Konstanz der Verschleißprobleme.

Eine solche ausgedehnte Entwicklung ist jedoch nur dann möglich, wenn die in Kap. 6.1 angedeuteten Bedingungen teilweise, sowie die Voraussetzungen in diesem Kapitel erfüllt werden.

Für Verschleißmessungen an Motoren größerer Leistungen sieht die Markt-Entwicklung für die RNT noch günstiger aus, da die Einsparungen mit der RNT mit steigender Motorleistungen größer werden (s.auch Kap. 5.5).

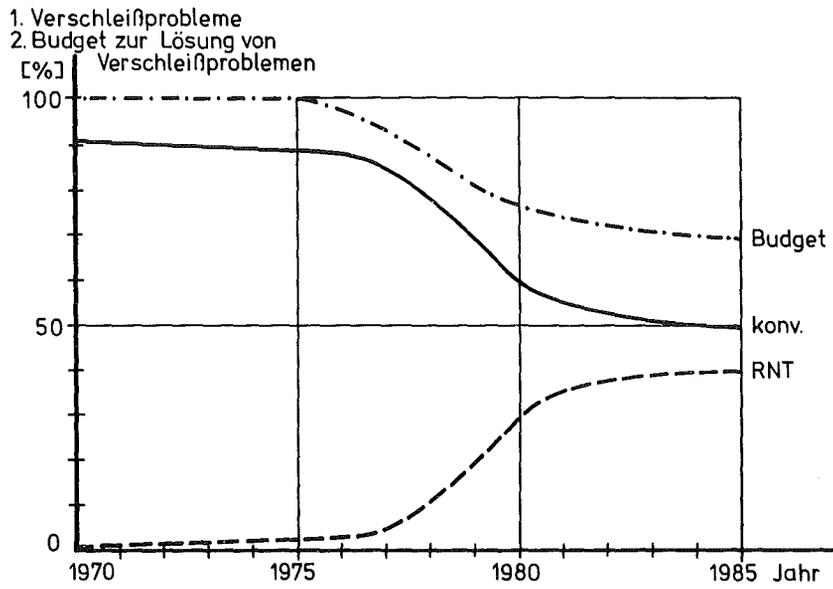


Abb.43: Mögliche RNT-Machtentwicklung (in Abhängigkeit der in Kap. 6.1 diskutierten Punkte)

## 7. Z U S A M M E N F A S S U N G D E R E R G E B N I S S E

Die Aufgabe bestand darin, eine technisch-wirtschaftliche Analyse eines derzeit denkbaren, in Zukunft routinemäßig möglichen industriellen Einsatzes der RNT-Verschleißmeßverfahren zu erstellen. Es war das Ziel, aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen Aussagen zu machen über:

- a) Nutzen der RNT-Verfahren in funktionaler Abhängigkeit von Kosten, Zeit, technischer Leistungsfähigkeit und Risiken, insbesondere im Vergleich zu den konventionellen Verfahren.
- b) Schwerpunktsetzung für die gezielte Weiterentwicklung der RNT zu möglichst einfachen Meßsystemen.
- c) Mögliche Markt-Entwicklung der RNT.

Aus detaillierten Voruntersuchungen (s. auch Kap. 1 und 2) wurde die Erkenntnis gewonnen, daß ein reiner Verfahrensvergleich nur ungenügende Ergebnisse liefern kann.

Es wurde ein System erstellt, das in eine Entscheidungshierarchie eingebaut, folgende Ergebnisse liefert:

- a) Für jeweils ein bestimmtes Verschleißproblem wird das Nutzenoptimale Verfahren zur Lösung ausgewählt.
- b) Ein Feld der Verschleißproblemstellungen, die mit höherem Nutzen durch die RNT-Verfahren als mit konventionellen Verfahren gelöst werden können.
- c) Eine Entscheidungsvorbereitung zum Einsatz der RNT-Verfahren in der Industrie unter Berücksichtigung von unternehmenspolitischen Kriterien.

Im einzelnen lassen sich die erhaltenen Ergebnisse derart zusammenfassen, daß die RNT dann günstig einzusetzen ist, wenn folgende Punkte erfüllt sind:

- a) Verschleißuntersuchungen beschränkt auf maximal 3 Bauteile.

- b) Verschleißraten der zu untersuchenden Bauteile sind gering.
- c) Verschleißuntersuchungen an Bauteilen zu machen sind, welche unter gleichen Einsatzbedingungen infolge nicht quantitativ erfaßbaren Verschleißeinflüsse, resultierend aus Einbauverhältnissen, mit großen Streubereichen behaftet sind.
- d) Anzahl der zu untersuchenden Betriebspunkte größer eins ist. Der Nutzen wächst mit der Anzahl der zu untersuchenden Betriebspunkte.
- e) Langfristige Optimierung von Werkstoffen und konstruktive Formgebung von Bauteilen durchzuführen ist.

Ein Meßsystem zum Einsatz in der Industrie ist dann sinnvoll, wenn sich nach Aufsummierung der für die RNT günstigen Verschleißprobleme Auslastungsgrade von Meßsystemen ergeben, die durch Einsparungen (z.B. an Prüfstandsstunden) zu Kapitalrückflußzeiten  $< 3$  Jahre führen. Andernfalls wäre eine Auftragsvergabe an eine Fremdfirma mit stationären bzw. mobilen Meßsystem günstiger. -

Wenn Zeitprioritäten zur Untersuchung von Verschleißproblemen bestehen, d.h. in erster Linie Probleme kurzfristig zu lösen sind, ist zu beachten, daß die RNT heute noch verhältnismäßig lange Rüstzeiten benötigt. Ausnahmen sind die Probleme, bei denen durch Lagerhaltung von aktivierten Bauteilen nur geringe Rüstzeiten auftreten. Auf jeden Fall sind detaillierte Betrachtungen im Einzelfall notwendig. -

Die konventionelle Verschleißmeßtechnik ist in der Regel dann günstiger, wenn:

- a) In Dauerversuchen gleichzeitig viele Bauteile zu beurteilen und
- b) Bauteile bei bekannten kritischen Betriebsgrößen verglichen werden sollen. -

Den potentiellen Anwendern ist hiermit ein System an die Hand gegeben, mit dem sie die Zweckmäßigkeit und die Wirtschaftlichkeit der RNT für ihre eigenen Probleme untersuchen können.

## 8. L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. Gervé, A.: Moderne Möglichkeiten der Verschleißmessung mit radioaktiven Isotopen  
Zeitschrift für Werkstofftechnik, 3.Jhg., Heft 2 (1972) S.81-86
2. Gervé, A.: Die wichtigsten Verschleißmeßmethoden der Isotopentechnik  
Kerntechnik, 14.Jhg., (1972), Heft 5, S.204-209
3. Informationen aus den Motoren-Entwicklungsabteilungen der Firmen Daimler-Benz, Klöckner-Humboldt-Deutz, Opel, Motoren-Werke Mannheim, Motoren-Werke Augsburg-Nürnberg, Volkswagenwerk, anlässlich verschiedener Gespräche in den Jahren 1972 - 1974
4. Volz, J.: Verschleißmessungen an Kolbenringen (PKW-Diesel)  
(1974) unveröffentlicht
5. DIN 50 320
6. DIN 50 321
7. Gairing, M.: Motorölerprobung im OM 615  
Mineralöltechnik Nr.11-12 (1974)  
19.Jhg., Technischer Dienst MZV-UNITI  
Seite 1 ff.
8. Schastlivenko, F.E., Novozhilov, O.Yu., Skorynin, Yu.V., Nasledyshev, Yu.K.: Anwendungsbereich der Differentialmethode der radioaktiven Indikatoren und der Methode der ausgeschnitten Kolkungen bei Verschleißuntersuchungen an Werkzeugmaschinen  
Stanki i Instrument, 42, (1971) No.9, S.45

9. Herkert, B.: Bestimmung des Verschleißes und der Kinematik schnelllaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope  
KFK-Bericht Nr.1569, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe
10. Nitsche/Wiebach: Einführung in die Längenmeßtechnik  
Leipzig, VEB Fachbuchvertretung, (1966)
11. Eckerkunst: Automatisierung in der Längenmeßtechnik  
Berlin, VEB-Verlag-Technik (1964)
12. Klingelberg, W.: Technisches Hilfsbuch  
Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag 1967
13. Postnikow, W.J.: Radioaktive Isotope bei Untersuchungen und automatische Kontrolle des Verschleißes  
Moskau 1967(russisch)
14. Gervé, A.: Einsatzmöglichkeiten von Radionukliden zur Untersuchung konstruktiver und schmierstoffabhängiger Einflüsse auf den Verschleiß von Maschinenteilen  
VDI-Bericht Nr.196, 1973, S.43-47
15. Herkert, B.: Die Aktivierung von metallischen Maschinenteilen mit geladenen Teilchen zur Durchführung von Verschleißmessungen  
KFK-Bericht Nr.2096, Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe
16. DIN 878
17. DIN 879

18. DIN 1319 (Blatt 2,3)
19. DIN 2257 (Blatt 2)
20. VDE/VDI-Richtlinien 2621
21. Informationen über Kostendaten im Entwicklungsbereich der Firmen Daimler-Benz, Klöckner-Humboldt-Deutz, Maschinenfabriken Augsburg-Nürnberg, Opel sowie der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe
22. Essig, G.: Untersuchung der Verschleißvorgänge an Dichtleiste und Mantellaufbahn im Wankelmotor KKM 612  
(1974) unveröffentlicht
23. Rühl, G.: Rahmenmanuskript zur Vorlesung "Fertigungswirtschaft"  
Universität Karlsruhe 1973
24. Wöhe, G.: Einführung in die allgemeine BWL  
Berlin, Frankfurt 1968
25. Dworatscheck, S.: Wirtschaftlichkeitsanalyse von Informationssystemen  
Donike H.:  
Berlin 1972
26. Zangenmeister, Ch.: Nutzwertanalyse in der Systemtechnik  
München 1972
27. Miller, T.T.: A Major Shift in Emphasis  
AMA Management Report Nr.39, New York 1959

28. Reuter, J.F.: Verfahren zur betrieblichen Entscheidung über den Forschungs- und Entwicklungsaufwand  
Zeitschrift für Betriebswirtschaft 38 (1968) S.526-552
29. Dean, B.V.  
Nishry: Scoring and Profitability Models for Evaluation and Selecting Engineering Projects  
Operations Research, Vol.13, 1965, Seite 550-569
30. Mottleg, C.M.,  
Newton, R.D.: The Selecting of Projects for Industrial Research  
Operations Research Vol.7, 1959, S.740-751
31. Hirsch, V.: Bewertungsprofile bei der Planung neuer Produkte  
Schmalenbach's Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 20 (1968), S.291-303
32. O'Meara, Jr.: Selecting Profitable Products  
Harvard Business Review Vol.39, 1961, Nr.1
32. Dathe, H.M.: Moderne Projektplanung in Technik und Wissenschaft  
München 1971
34. Kronenberger, F.: Datenbank "Aktivierungsmöglichkeiten von Werkstoffen des Maschinenbaus"  
(1975) unveröffentlicht
35. Deutsche Shell AG  
Shell Prognose über weitere Motorisierung in der Bundesrepublik  
ATZ 75, (1973) 11

A N H A N G I - V

I. "Checkliste" (1-10)

## I. Motordaten

---

1. Bauart

2. Zylinder- bzw. Kammeranzahl Z

Z =

3. Verbrennungsverfahren

Ottomotor  
Dieselmotor  
anderes Verfahren

4. Brennstoffverteilung

Vergaser  
Einspritzer

5. Art der Kühlung

Flüssigkeit  
Luft

6. Bauform

Reihen-,  
V-,  
Stern-,  
Boxer-,  
Kreiskolben-,  
Gegenkolbenmotor

7. Gesamtabmaße in m

Länge l = ..... m  
Breite b = ..... m  
Höhe h = ..... m

8. Nenndaten

Nennleistung  $P_N = \dots\dots PS$   
Nendrehzahl  $n_N = \dots\dots U/min$   
Maximalleistung  $P_{max} = \dots PS$   
Höchstzahl  $n_{max} = \dots U/min$   
Max. Drehmoment  $M_{d,max} = \dots mkp$   
bei Drehzahl  $n_{M_{d,max}} = \dots U/min$

9. Art der Schmierung

10. Verbrennungsluftdurchsatz

$$V_{+L} = \dots\dots m^3/\text{min}$$

11. Gesamtes Ölvolumen

$$V_{\ddot{O}l \text{ min}} = \dots\dots L$$

$$V_{\ddot{O}l \text{ max}} = \dots\dots L$$

12. Brennstoffdurchsatz (bei  
Maximalleistung)

$$B_{+} = \dots\dots \text{kg/h}$$

13. Ölverbrauch

$$\text{ca. } V_{+\ddot{O}l} = \dots\dots \text{g/PSh}$$

14. Art der Ölfilter

15. Ist ein Ölfilter für das vorgesehene  
Versuchsprogramm notwendig ?

ja                      nein

16.1 Ölkühler notwendig ?

ja                      nein

16.2 Wenn ja, welche Bauart

17.1 Automatische Prüfstandssteuerung  
erforderlich ?

ja                      nein

17.2 Wenn ja, welche Art der Steuerung

## II. Bauteile

		Beilegen von:			
		a. Bauteilzeichnung			
		b. Übersichtszeichnung			
					<u>Dimension</u>
1.	Lieferung von 2 Zeichnungen				
2.1	Gesamtmasse von jedem zu untersuchenden Bauteil	$G_1 =$			kg
		$G_2 =$			kg
		$G_3 =$			kg
2.2	Größe der zu messenden Versuchsfläche	$F_{V1} =$			mm <sup>2</sup>
		$F_{V2} =$			mm <sup>2</sup>
		$F_{V3} =$			mm <sup>3</sup>
2.3	Schichtdicken der Versuchsteile	$S_{11} =$	$S_{12} =$	$S_{13} =$	µm
		$S_{21} =$	$S_{22} =$	$S_{23} =$	µm
		$S_{31} =$	$S_{32} =$	$S_{33} =$	µm
2.4	Bezeichnung der Werkstoffe aller unter 2.3 aufgeführten Schichten	$W_{11} =$	$W_{12} =$	$W_{13} =$	
		$W_{21} =$	$W_{22} =$	$W_{23} =$	
		$W_{31} =$	$W_{32} =$	$W_{33} =$	
2.5	Analyse der Werkstoffe aller unter 2.2 aufgeführten Schichten	$W_{11} :$			
		$W_{12} :$			
		$W_{13} :$			
		$W_{21} :$			
		$W_{22} :$			
		$W_{23} :$			
		$W_{31} :$			
		$W_{32} :$			
		$W_{33} :$			

### III. Fragen zur Durchführbarkeit der Meßverfahren

---

#### 1. Durchflußverfahren

- |       |  |   |      |
|-------|--|---|------|
| 1.1   | Gelangen die zu untersuchenden Verschleißteilchen in ein Transportmedium (z.B. Öl, Wasser) ?   | ja  | nein |
| 1.2.1 | Wenn ja, bildet das Transportmedium einen Kreislauf ?  | ja  | nein |
| 1.2.2 | Wenn nein, ist die Bildung eines Kreislaufs möglich ?  | ja  | nein |
| 1.2.3 | Wenn nein, ist ein konstanter Abfluß von Transportmedium gewährleistet ?   | ja  | nein |
| 1.3.1 | Sind Kenntnisse über Verschleißablagerungen vorhanden ?  | ja  | nein |
| 1.3.2 | Wenn ja, wo (z.B. Ölkühler, Kolben etc.)   |   |      |
| 1.4.1 | Sind Angaben über Betriebsbedingungen des Motors, die Konzentrationsveränderungen des Verschleißes im Transportmedium verursachen, möglich ? | ja  | nein |
| 1.4.2 | Wenn ja, welche ?  | a. Ölverschäumung<br>b. Ölverbrauch<br>c. Ölfilter<br>d. Ölverdünnung<br>e. anderer Art |      |
| 1.5.1 | In welchen Bereichen sind Ölmengenänderungen durch den Meßkreislauf zulässig ?   | $V_{\text{Öl}} = + \dots l$   |      |
| 1.5.2 | In welchen Bereichen sind Temperaturänderungen des Öls durch den Meßkreislauf zulässig ?   | $T_{\text{Öl}} = \pm \dots \text{grad}$   |      |



2.7.4.2 Wenn ja, Einsätze aus welchem  
Werkstoff ?

2.7.5 Welche Zeitdauer ist für die  
Montage des zu untersuchenden  
Bauteils nötig ?

$t_m = \dots$  min

2. Dünnschichtdifferenzverfahren

2.1 Aus Zeichnung

Geometrie- sowie Werkstoffangaben der Umgebungsmaterialien der zu untersuchenden Bauteile

Werkstoffe in Zeichnung eintragen

2.2.1 Sind Ablagerungen der Verschleißteilchen möglich ?

ja

nein

2.2.2 Wenn ja

wo

Beschreibung

2.3 Beschreibung der Ortsänderung des Bauteils beim Betrieb ausgedrückt durch Weg und Geschwindigkeit

$s_o = \dots$  mm

$v_o = \dots$  m/sec

2.4 Umgebungstemperaturen der Motoraußenwand im Bereich der zu untersuchenden Bauteile

$T_{U_{max}} = \dots$  °C

2.5 Sind Veränderungsmöglichkeiten durch Verlegen bzw. Weglassen von Nebenaggregaten (z.B. Luftfilter) in der Umgebung der zu untersuchenden Versuchsteile möglich ?

ja

nein

2.5.1 Wenn ja, welche Aggregate ?

#### IV. Meßgrößen

##### 4.1.1 Verschleißmeßgrößen

In die folgende Tabelle sind für die jeweiligen Verschleißflächen (Komponenten) die geforderten Werte bezüglich Genauigkeit G und die geschätzten Werte bezüglich Verschleißraten und max. Gesamtverschleiß anzugeben.

Verschleiß- fläche	Kompo- nente	G ( $\mu\text{m}$ )	Verschleißrate		Max. Gesamt- verschleiß $\mu\text{m}$
			M <sub>min</sub> $\mu\text{m/h}$	M <sub>max</sub> $\mu\text{m/h}$	

##### 4.1.2 Wie sind die zu erwartenden Verschleißverteilungen auf den interessierenden Verschleißflächen ?

Komponente	Gleichmäßig	Unbekannt	Bekannt (An- gabe des Ver- laufs)

## 4.2 Prüfstandsmeßgrößen

Diese Meßgrößen werden angeboten mit üblichen Standardgenauigkeiten.  
Falls Sonderwünsche, zusätzliche Angaben

### 4.2.1 Drehzahl

### 4.2.2 Last

### 4.2.3 Temperaturen

#### 4.2.3.1 Angabe der gewünschten Anzahl (bis 20) von Meßstellen und wo.

### 4.2.4 Öldruck

### 4.2.5 Ölverbrauch (konventionell gemessen)

### 4.2.6 Durchblasemenge

### 4.2.7 Brennstoffverbrauch

## V. Versuchsprogramm

---

### 5.1 Genaue Zielbeschreibung des Versuches

### 5.2 Versuchsprogramm

#### 5.2.1 Welche Betriebspunkte sollen bei welchen Parametern gefahren werden ?

Betriebspunkte	Drehzahl	Last	Betriebsparameter
Lfd.-Nr.	(U/min)	(mkp)	

#### 5.3 Wie lang ist die gesamte Prüfstandzeit ?

$t_{\text{ges}} =$  h bzw. Tage

II. Entwurf eines Nutzwertanalyse-Systems  
zur Expertenbefragung

(1-17)

### Zusammenfassung

Mit diesem Papier erhalten Sie ein detailliertes Zielprogramm mit dem Oberziel:

"Auswahl der technisch-wirtschaftlich optimalen Alternative aus i-technisch durchführbaren Alternativen von Verschleißmeßverfahren zur Lösung eines bestimmten Verschleißproblems k in der Motorenentwicklung" das bis zur 3.Ebene in 20 Kriterien aufgegliedert worden ist.

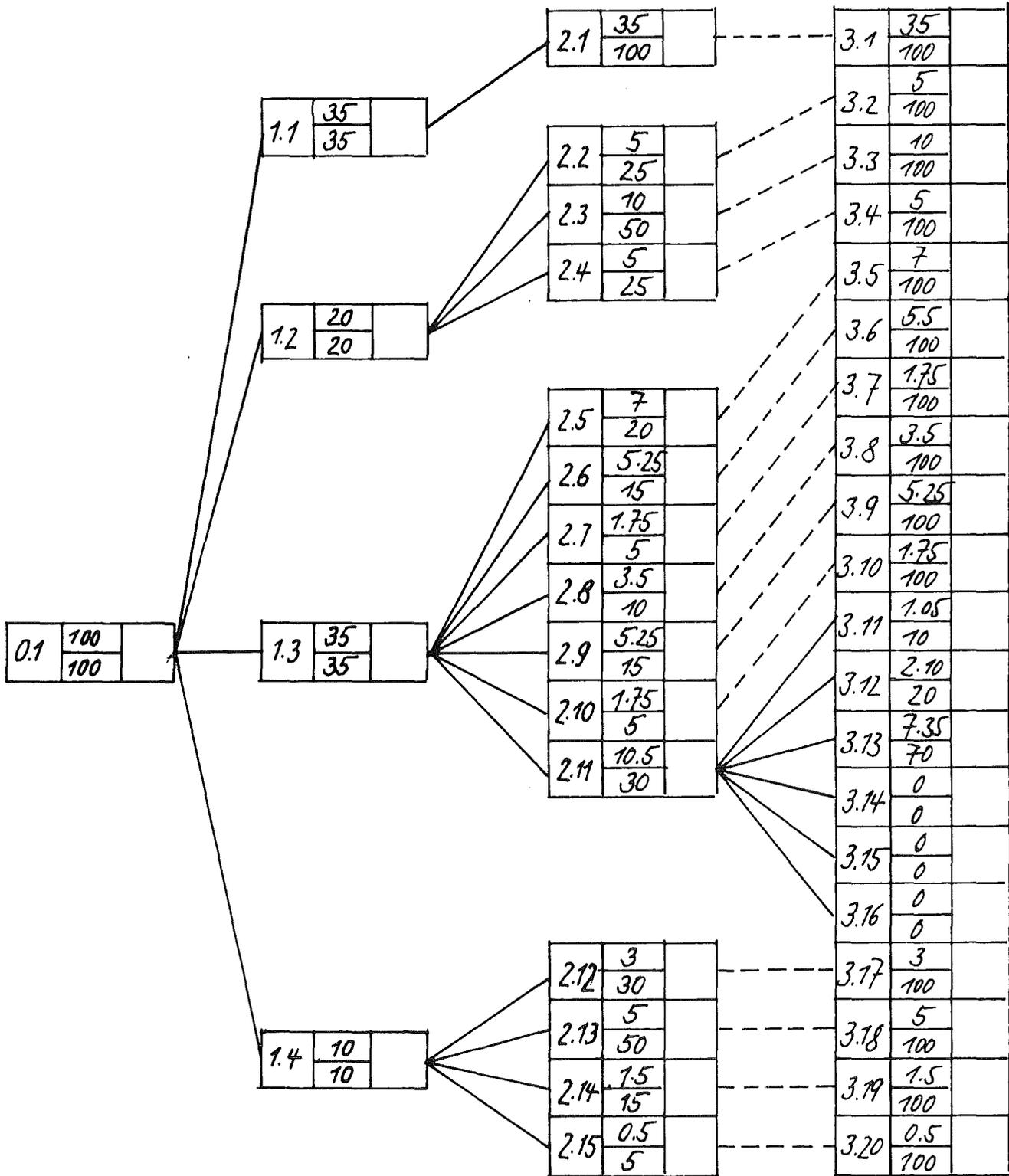
Diese 20 von uns vorgeschlagenen Kriterien sowie die zugehörigen Bewertungsmaßstäbe werden danach beschrieben und erläutert.

Auf die Gewichtungen der Kriterien untereinander wird nicht eingegangen, da diese jeweils für die konkreten Problemstellungen mit Randbedingungen vorgenommen werden müssen.

Ebene	Nr. t	Bezeichnung der Ziele des Zielprogrammes
0	1	Auswahl der techn.-wirtschaftl. optimalen Alternative aus i-techn. durchführbaren Alternativen von Verschleißmeßverfahren zur Lösung eines bestimmten Verschleißproblems k in der Motorenentwicklung
1	1	Gesamtkosten
	2	Gesamtdauer (Zeit)
	3	Techn. Leistungsfähigkeit
	4	Unternehmenspolitische Kriterien
2	1	Gesamtkosten
	2	Rüstzeiten (Vorbereitungszeiten)
	3	Prüfstandszeiten (Motorlauf)
	4	Auswertungszeiten
	5	Genauigkeit
	6	Auflösungsvermögen
	7	Reproduzierbarkeit
	8	Kontinuierliche Meßmöglichkeit
	9	Verfügbarkeit
	10	Computerverarbeitbarkeit der Meßergebnisse
	11	Informationsinhalt der Meßergebnisse
	12	Umweltsicherheit
	13	Unabhängigkeit von Spezialisten und Organisationen
	14	Erwerb von know-how
	15	Werbeeffekt
3	1	Gesamtkosten
	2	Rüstzeiten
	3	Prüfstandszeiten
	4	Auswertungszeiten
	5	Genauigkeit
	6	Auflösungsvermögen

Ebene	Nr. t	Bezeichnung der Ziele des Zielprogrammes
	7	Reproduzierbarkeit
	8	Kontinuierliche Meßmöglichkeit
	9	Verfügbarkeit
	10	Computerverarbeitbarkeit der Meß- ergebnisse
	11	Anzahl der Meßstellen
	12	Gesamtverschleiß/Meßstelle
	13	Verschleißrate/Meßstelle
	14	Verschleißverteilung/Meßstelle
	15	Mikrogeometrie der Oberfläche
	16	Teilinformation bei vorzeitigem Bauteilausfall
	17	Umweltsicherheit
	18	Unabhängigkeit
	19	Erwerb von know-how
	20	Werbeeffekt

# Zielwerthierarchie mit "Gewichtungsbeispiel"



## I. Gesamtkosten

Die Gesamtkosten zur Lösung eines gestellten Problemes  $k$  bezüglich des Meßverfahrens  $i$  setzen sich additiv zusammen aus folgenden Einzelkosten für:

- a) Vorbereitung
- b) Vermessungen
- c) Montagen
- d) Aktivierungen (Bestrahlungen von Bauteilen)
- e) Prüfstandsstunden
- f) Wartung
- g) Auswertung
- h) Risikozuschlag
- i) Strahlenschutz

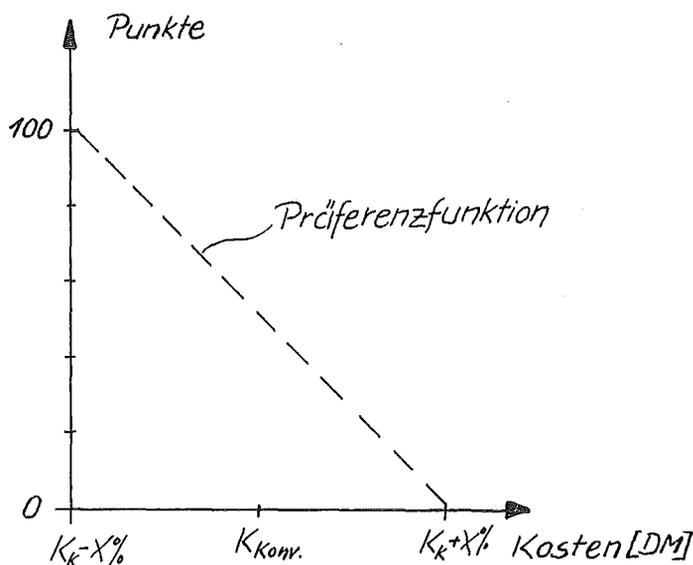
Diese Kosten lassen sich zum Teil exakt, zum Teil aus innerbetrieblichen Erfahrungswerten ermitteln.

### Bewertungsmaßstab

Da die Aussagen über Min.- und Max.-Kosten, die zu einer bestimmten Problemlösung bereitgestellt bzw. als optimal betrachtet werden, nur vereinzelt oder sehr schwer zu gewinnen sein werden, schlagen wir zur Bewertung vor:

Die Kosten für die konventionelle Lösung erhalten die Mittel- lage. Der Maßstab wird durch prozentuale Schwankung von  $\pm X\%$  festgelegt.

- Die Kostenskala wäre linear auszudrücken und die Präferenzfunktion wäre ebenfalls linear. Der Bewertungsmaßstab könnte also folgendermaßen aussehen:



## II. Gesamtdauer

Die Gesamtdauer kann aufgeteilt werden in beispielsweise 3 Bereiche:

- Rüstzeiten
- Prüfstandszeiten
- Auswertungszeiten

Unter Rüstzeiten wollen wir verstehen:

Konv.	RNT
Bereitstellung von Bauteilen	Bereitstellung von Bauteilen
1. Vermessung	Abdeckungsbau, Vorber. f. Bestrahl.
2. Vermessung	Bestrahlung
Montage	Anpassung des Meßsystems an Problem (Eichung etc.)
Demontage	Montage
	Demontage
	Aktivitätsbeseitigung

Prüfstandszeiten sollen beinhalten:

Konv.	RNT
Laufstunden	dito jedoch bezogen auf Gesamtsystem
Wartung bezogen auf Prüfstand	Prüfstand + Meßsystem
Ausfall	

Auswertungszeiten stellen Zeitaufwand zur Verarbeitung, Interpretation und Dokumentation der Ergebnisse dar.

### Bewertungsmaßstab

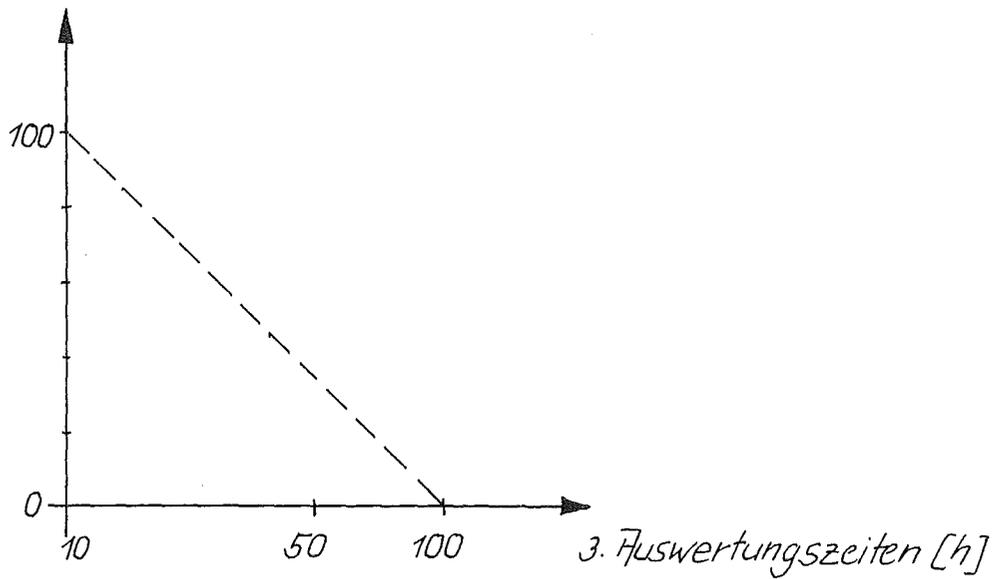
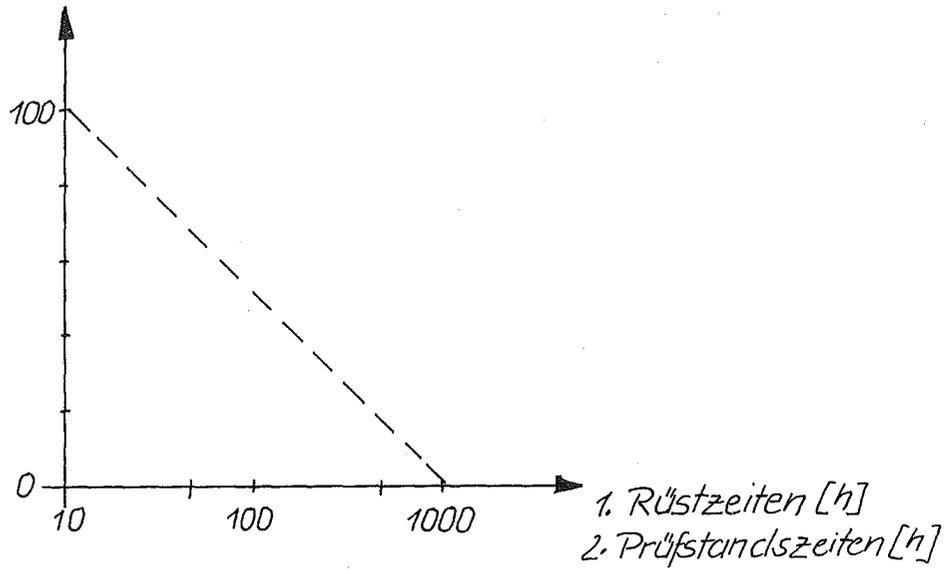
Für die Zeitbewertungen schlagen wir folgende Grenzwerte und Maßstäbe vor:

Rüstzeiten: 10 - 1000 h-Skala in logarithmischem Maßstab und linearer Präferenzfunktion bzw. linearer Maßstab und Präferenz e-Funktion.

Prüfstandszeiten: dito

Auswertungszeiten: 10 - 100 h-Skala logarithmischer Maßstab und lineare Präferenzfunktion.

Die Bewertungsmaßstäbe und Präferenzkurven könnten somit folgendermaßen aussehen:



### III. Technische Leistungsfähigkeit

#### 1. Genauigkeit

Diese Angabe der Genauigkeit soll sich nur auf das Meßsystem selbst beziehen, wie genau eine Messung des speziellen Problems mit den zur Verfügung stehenden Meßverfahren möglich ist. Die Genauigkeit soll in  $\mu\text{m}$  angegeben werden.

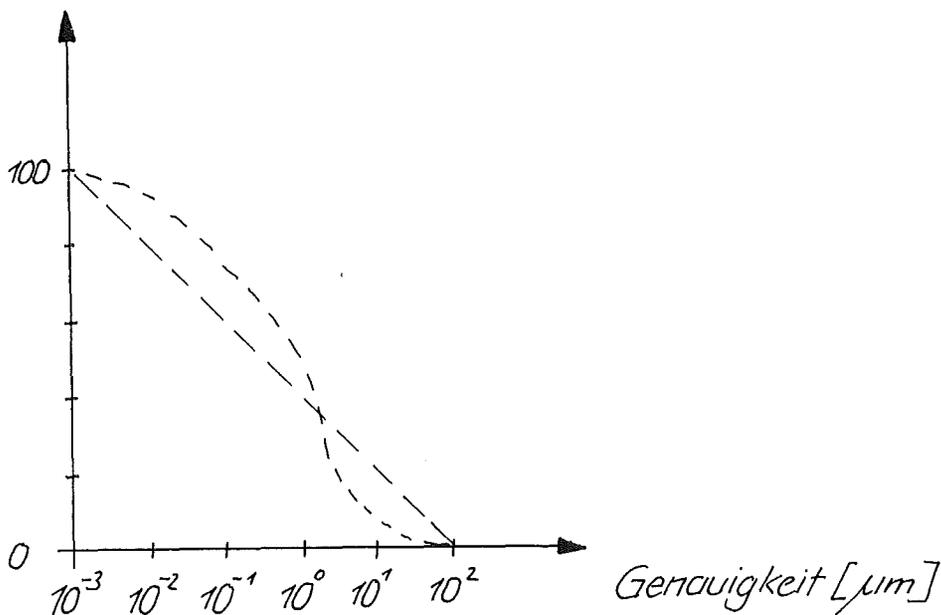
Als Grenzlagen werden vorgeschlagen:

$$10^2 \mu\text{m} - 10^{-3} \mu\text{m},$$

d.h.: eine Schieblehre sei gerade noch zugelassen; besser messen zu wollen als  $10^{-3} \mu\text{m}$  erscheint nicht sinnvoll.

Als Maßstab bietet sich in diesem Fall wieder der Logarithmische an, während die Abbildungsfunktion sehr schwer zu erfassen ist. Aus den praktischen Problemstellungen könnte sich eine "s-Funktion" herauskristallisieren.

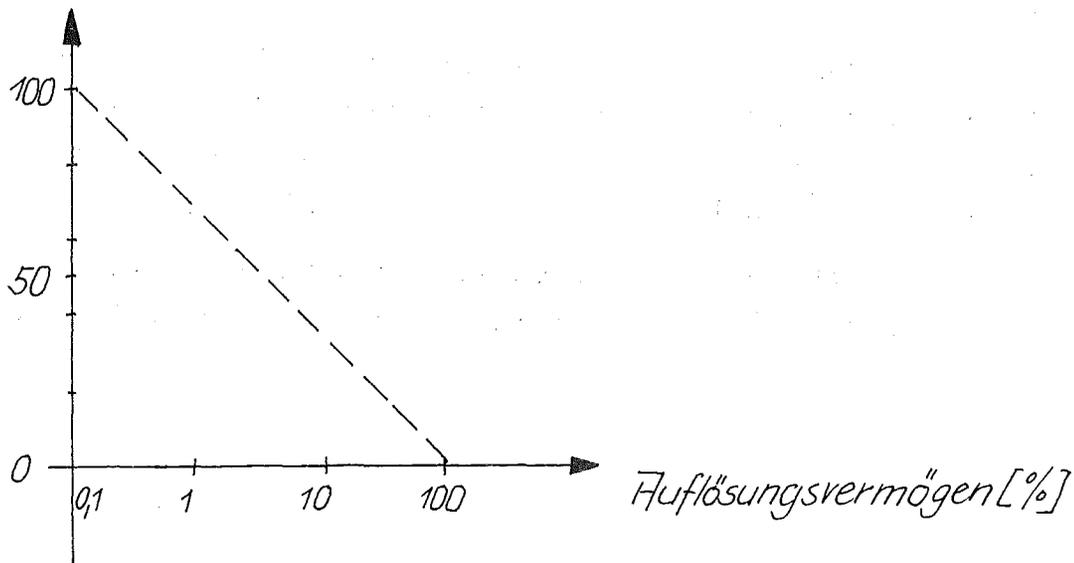
Somit ergäbe sich folgendes Aussehen:



## 2. Auflösungsvermögen

Als weiteres Kriterium, um die techn. Leistungsfähigkeit eines Meßverfahrens zu beschreiben, soll das Auflösungsvermögen des Systems dienen.

Hier ist an eine Beschreibung in Prozent gedacht, die zwischen 0,1 - 100% liegen soll. Der Maßstab ist wiederum logarithmisch vorgesehen bzw. die Präferenzkurve als e-Funktion gedacht.



Bei Längenmessungen ist das Auflösungsvermögen eine Funktion des Abriebs, also proportional der Laufzeit

$$\text{konv. } A \approx f(\text{Abrieb} \hat{=} \text{Stunden})$$

Bei RNT-Meßverfahren ist es abhängig von Abrieb, Zählzeit, Aktivierung

$$\text{RNT } A \approx f(\text{Abrieb, Zählzeit})$$

Akt. Ölmenge  
DfV

Abstand  
DDV

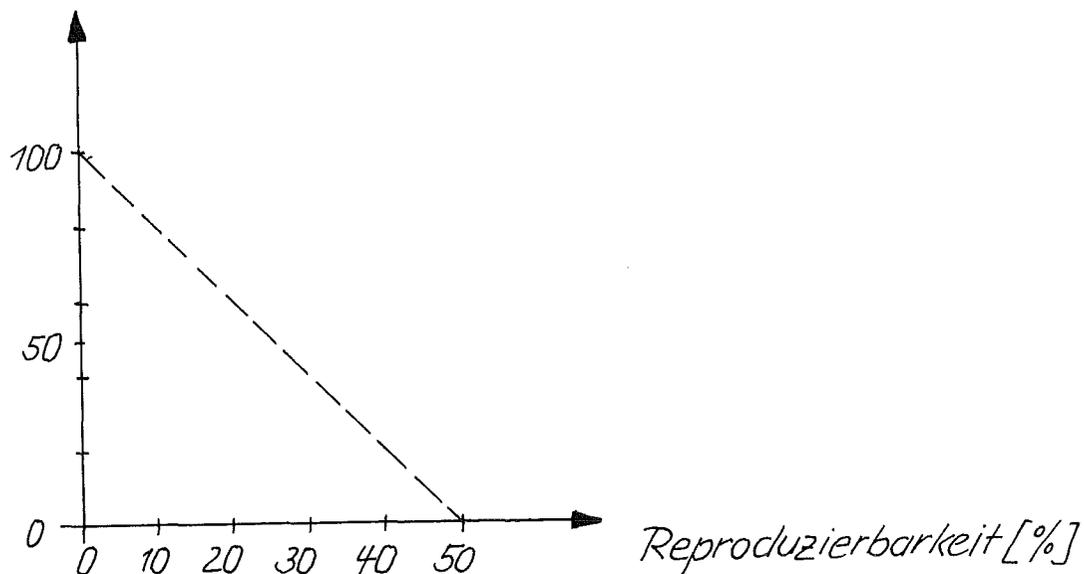
### 3. Reproduzierbarkeit

Das Kriterium Reproduzierbarkeit bezieht sich auf das Gesamtsystem (Motor, Prüfstand, Meßverfahren) und beinhaltet die DIN-Bezeichnungen Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit von Messungen. Wir wollen unter Reproduzierbarkeit von Meßergebnissen die prozentuale Abweichung von Messungen der Gesamtsysteme für gleiche Betriebsbedingungen verstehen.

Gesamtsystem deswegen, weil bei bestimmten Aufgabenstellungen unterschiedliche Einflüsse in die Reproduzierbarkeit eingehen.

So müssen z.B. für konventionelle Vergleichsmessungen, auch am selben Bauteil, die nicht beherrschbaren Einflüsse, die durch Ein- und Ausbau auftreten, immer berücksichtigt werden. Dies ist bei der RNT nicht bei allen Problemstellungen der Fall.

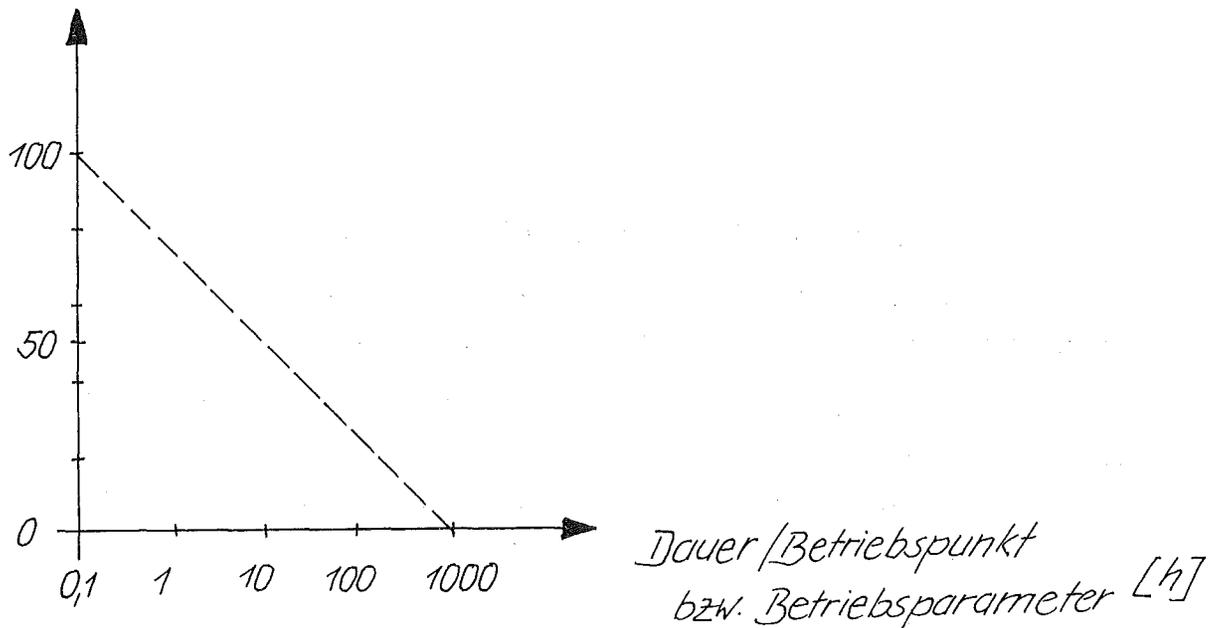
Wir schlagen als zu bewertenden Bereich für die Reproduzierbarkeit 0 - 50% vor mit einer linearen Präferenzfunktion.



#### 4. Kontinuierliche Meßmöglichkeit

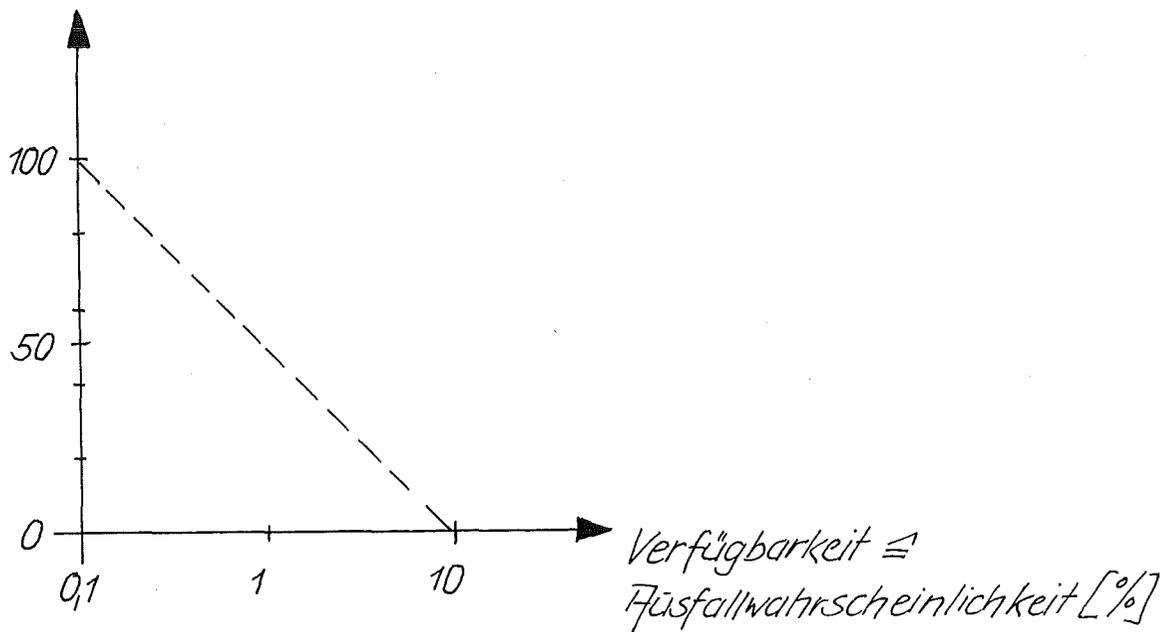
Die Leistungsfähigkeit eines Meßverfahrens drückt sich nicht nur durch die Genauigkeit und das Auflösungsvermögen aus, sondern noch zusätzlich durch die Zeitdauer die pro Betriebspunkt bzw. Parameter gefahren werden muß, um diese Genauigkeiten bzw. Auflösungsvermögen zu erreichen. Deswegen als zusätzliches Kriterium "kontinuierliche" Meßmöglichkeit, wo die Dauer/Betriebspunkt bzw. Parameter beschrieben wird.

Wir schlagen einen Maßstab von 0,1 - 1000 h vor, der wiederum logarithmisch ausgelegt ist mit linearer Präferenzfunktion.



#### 5. Verfügbarkeit

Die Verfügbarkeit des Meßsystems soll über die Ausfallwahrscheinlichkeit als Quotient aus mittlerer Störzeit und mittlerer Meßzeit (bis zum Störfall) definiert werden und könnte mit einer %-Skala von 0,1 - 10% in logarithmischer Aufteilung, sowie einer linearen Präferenzkurve, dargestellt werden.



### 6. Computer-Weiterverarbeitbarkeit der Meßergebnisse

Die Weiterverarbeitbarkeit von Daten wird heute weitgehend über ihre Eignung zur EDV bewertet.

Dieses Kriterium soll deswegen auch zur Bewertung der anfallenden Verschleißmeßgrößen herangezogen werden. Das Kriterium soll über eine verbale Beschreibung der Zielwerte punktmäßig abgebildet werden und könnte folgendes Aussehen haben:

Punkte	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	Daten werden v. Hand aufgenommen. Eingabemöglichk. in Rechner zur Speicherung und Weiterverarb.				Daten liegen über Rechenprogramme auf Drucker bzw. geplottet vor, vollautomatisch

## 7. Informationsinhalt der Meßergebnisse

Der Informationsinhalt soll über 6 Kriterien beschrieben werden:

- 7.1 Anzahl der Meßstellen
- 7.2 Gesamtverschleiß pro Meßstelle
- 7.3 Verschleißrate pro Meßstelle
- 7.4 Verschleißverteilung über Meßstelle
- 7.5 Mikrogeometrie der Oberfläche
- 7.6 Teilinformation bei vorzeitigem Bauteilausfall

Nur die für die jeweilige Problemstellung notwendigen bzw. zusätzlich wünschenswerten Kriterien sollen zur Beschreibung des Informationsinhaltes verwendet werden.

Das Kriterium 7.1, Anzahl der Meßstellen, ist in sofern wesentlich, da bei notwendigen längeren Laufzeiten zur Anwendung der konv. Meßverfahren, außer den durch die konkrete Problemstellung anfallenden Informationen, Zusatzinformationen durch die Möglichkeit der Vermessung anderer Bauteile vorhanden sind. Die RNT-Meßverfahren erfassen zum gegenwärtigen Zeitpunkt in der Praxis maximal 3 Komponenten.

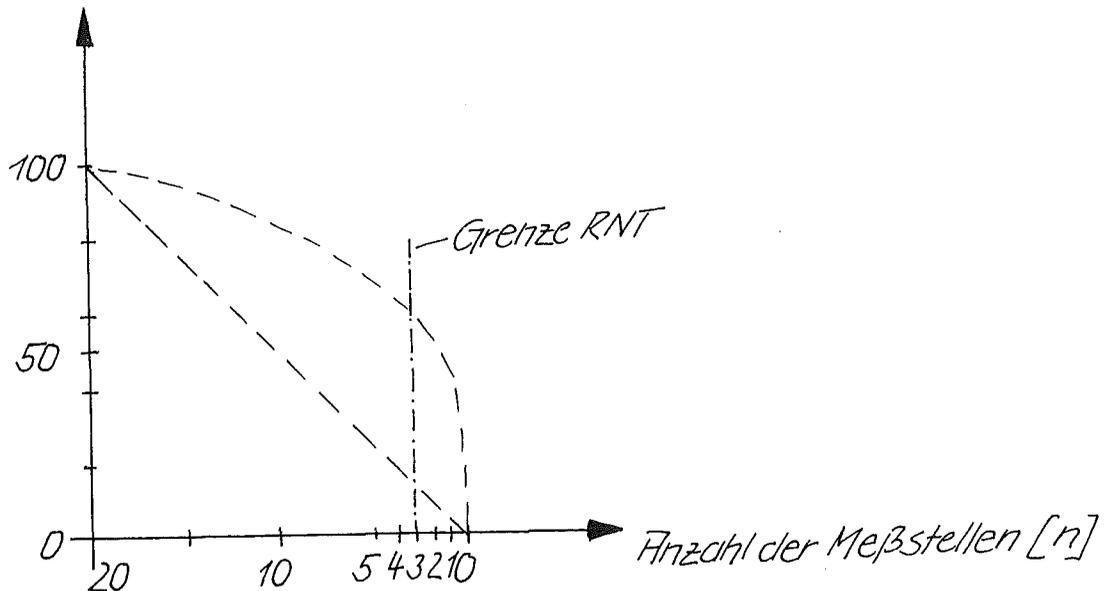
Andererseits berücksichtigt das Kriterium 7.6, Teilinformation bei vorzeitigem Bauteilausfall, diejenigen Informationen, die bei Anwendung der RNT vorhanden sind, während die Information durch konv. Messungen in diesem Fall gleich Null ist.

Die 4 Kriterien 7.2 - 7.5 berücksichtigen das Volumen an Informationen, wie es durch die verschiedenen Meßverfahren erfaßt werden kann.

### Bewertungsmaßstäbe

#### 7.1 Anzahl der Meßstellen

Es besteht die Vorstellung, daß im Mittel ca. 20 Meßstellen am Motor von vorrangigem Interesse sind. Das würde einer Skala von 0 - 20 entsprechen. Dazu eine lineare Präferenzkurve. Die Präferenzfunktion ist linear aber auch als Funktion 2. Grades möglich.



7.2 - 7.5: Diese Kriterien beinhalten, wie teilweise auch 7.6, Ja-Nein-Aussagen, die zu einer 0 bzw. 100 Punkte-Zuordnung führen.

Ja	Nein
100 Punkte	0 Punkte

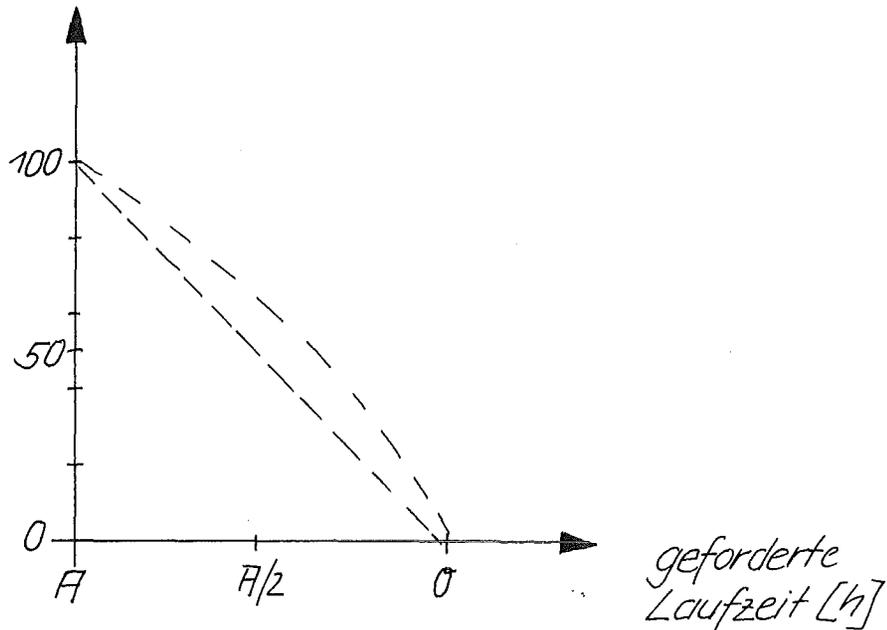
Dabei beziehen sich die Größen Gesamtverschleiß, Verschleißrate, Verschleißverteilung auf Längen- bzw. Gewichtsgrößen, wie folgt nach DIN ausgedrückt.

- Linearer absoluter Verschleißbetrag
- Lineare Verschleißgeschwindigkeit
- speziell bezogener linearer Verschleißbetrag (z.B. hier auf Wegstrecke)
- Gewichtsbezogener absoluter Verschleißbetrag
- Gewichtsbezogene Verschleißgeschwindigkeit
- Gewichtsbezogener Verschleißbetrag (z.B. hier auf Weg)

Kriterium 7.6, Teilinformation bei vorzeitigem Bauteilausfall, ist einmal über die zur konv. Messung notwendigen

Motorlaufzeit sowie über der Ausfallwahrscheinlichkeit des Motors und des spez. Bauteils über der Zeit zu sehen.

Der Maßstab ist also festgelegt zwischen 0 und geforderter Motorlaufzeit A (in h).



Zum Einstieg in die Kurve, um eine Bewertung der Meßverfahren vornehmen zu können, ist eine Abschätzung der Ausfallwahrscheinlichkeit/Zeit des Motors bzw. Bauteils notwendig.

Bei vorzeitigem Ausfall, der hier betrachtet wird, ist der Informationswert für konv. Messungen gleich Null, der der RNT abhängig von den Laufstunden bis zum Ausfall.

#### IV. Unternehmenspolitische Kriterien

##### 1. Umweltsicherheit (-freundlichkeit) des Systems

Bei Verwendung der RNT treten Strahlenbelastungen auf

- a) bei Aktivierung
- b) bei Montagen
- c) im Ölkreislauf bzw. Auspuff, Ablagerungen
- d) durch Abfall akt. Teile

Für konventionelle Messungen ist durch längere Laufzeiten die Schadstoffmenge in den Auspuffgasen bedeutend größer. Man könnte die Umweltfreundlichkeit verbal in z.B. 5 Gruppen beschreiben und diesen Gruppen eine Punkteskala zuordnen. Die Grenzwerte dieser Skala könnten folgendermaßen beschrieben sein.

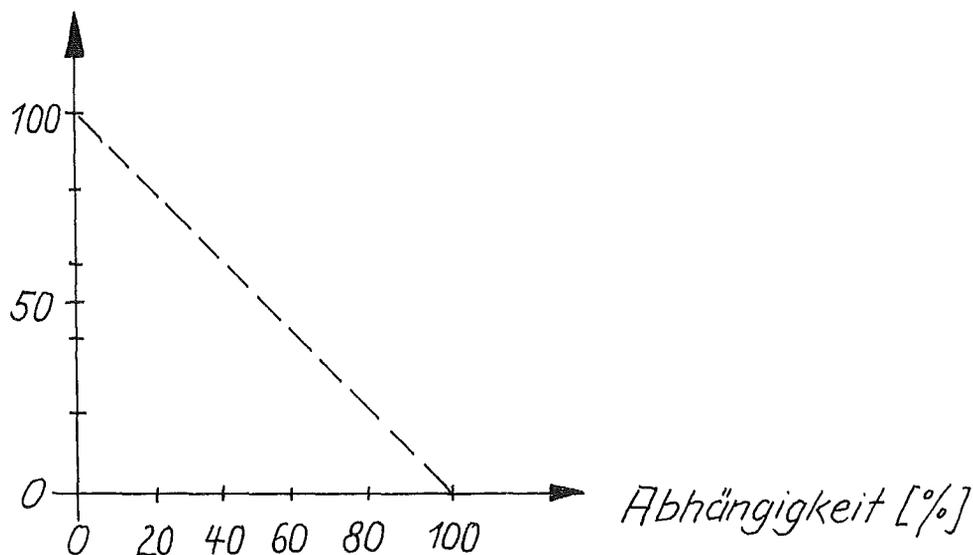
Punkte	0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
	großer organisatorischer u. techn. Aufwand, Gefährdung des Personaleinsatzes durch Dauerbelastung von Schadstoffen		mittlerer Aufwand für Einhaltung und Vorschriften		gesetzl. Auflagen ohne zusätzl. techn. bzw. organisatorischen Einsatz sehr gut einzuhalten. Keine Belastung des Personals.

##### 2. Unabhängigkeit von externen Spezialisten, Organisationen und know-how

Dieses Kriterium berücksichtigt eventuelle Abhängigkeiten, in die sich eine Firma bei Verwendung neuer Techniken begeben muß. Hier bieten sich zur sinnvollen Beschreibung dieses Kriteriums ca. 5 Gruppen an, deren Bewertungsintervalle folgendermaßen aussehen könnten:

80 - 100 Punkte	völlig unabhängig
60 - 80 Punkte	abhängig von know-how
40 - 60 Punkte	abhängig von Spezialisten
20 - 40 Punkte	abhängig von Organisationen
0 - 20 Punkte	gekoppelte Abhängigkeit

Man könnte auch einen Maßstab für die Abhängigkeit in % angeben mit einer linearen Präferenzfunktion.



Die beiden restlichen Kriterien sollen nur kurz angedeutet werden.

### 3. Erwerb von know-how für neue Technologien

Dieses Kriterium soll den unternehmerischen Standpunkt zum Neuerwerb von know-how beschreiben. Die Skala der verbalen Beschreibung des Bewertungsmaßstabes könnte von keinen Erkenntnissen bis zu sehr wichtigen Erkenntnissen reichen.

### 4. Werbeeffekt

Die Verwendung von neuen Technologien im F- + E-Bereich kann u.U. einen Werbeeffekt für das produzierte Gut mit sich bringen. Hier bietet sich wieder eine verbale Beschreibung des möglichen Werbeeffektes von

kein Effekt bis sehr guter Effekt an.

### III. Brief der Expertenurfrage (1)



IV. Zusammensetzung des  
Expertenkreises (1)

Experte Nr.	Berufsbezeichnung	Funktion
1	DI	SB
2	Dr.rer.nat.	GL
3	Ing.	GL
4	DI	HAL
5	DI	GL
6	DI	HAL
7	DI	GL
8	Dr.-Ing.	GL
9	Ing.	Dir-Ass.
10	DI	GL
11	DI	AL
12	Ing.	SB
13	Ing.	SB
14	Ing.	SB
15	Ing.	SB
16	Ing.	SB
17	Dr.-Ing.	Dir.

Experte Nr.	Berufsbezeichnung	Funktion
18	Prof.Dr.-Ing.	Ber.
19	DI	AL
20	DI	GL
21	DI	GL
22	Ing.	SB
23	Ing.	GL
24	Ing.	SB
25	Ing.	SB
26	DI	HAL
27	Ing.	AL
28	Dr.-Ing.	AL
29	DI	AL
30	DI	AL
31	DI	AL
32	DI	HAL
33	DI	AL
34	Ing.	GL

SE = Sachbearbeiter  
 GL = Gruppenleiter  
 AL = Abteilungsleiter  
 HAL = Hauptabteilungsleiter

Dir-Ass. = Direktions-Assistent  
 Dir. = Direktor  
 Ber. = Berater

V. Eine Abbildung und zwei Tabellen (1,2)  
zur Durchführung einer Nutzwert-  
analyse

