

**DIN 25475-2**

ICS 27.120.20

Ersatz für  
DIN 25475-2:2001-08

**Kerntechnische Anlagen –  
Betriebsüberwachung –  
Teil 2: Schwingungsüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von  
Änderungen im Schwingungsverhalten des Primärkreises von  
Druckwasserreaktoren**

Nuclear facilities –

Operational monitoring –

Part 2: Vibration monitoring for early detection of changes in the vibrational behavior of the primary coolant circuit in pressurized water reactors

Installations nucléaires –

Surveillance en exploitation –

Partie 2: Surveillance des vibrations en vue de la détection précoce de modifications du comportement vibratoire du circuit primaire de réacteurs à eau sous pression

Gesamtumfang 62 Seiten

Normenausschuss Materialprüfung (NMP) im DIN

# Inhalt

|                                                                                                       | Seite     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort .....</b>                                                                                  | <b>5</b>  |
| <b>1 Anwendungsbereich .....</b>                                                                      | <b>5</b>  |
| <b>2 Normative Verweisungen .....</b>                                                                 | <b>6</b>  |
| <b>3 Begriffe .....</b>                                                                               | <b>6</b>  |
| <b>4 Beschreibung der Überwachungstechnik.....</b>                                                    | <b>6</b>  |
| <b>5 Anforderungen an das Schwingungsüberwachungssystem .....</b>                                     | <b>9</b>  |
| 5.1 Prinzipieller Aufbau und Auslegungskriterien .....                                                | 9         |
| 5.2 Messwerterfassung .....                                                                           | 11        |
| 5.3 Signalaufbereitung .....                                                                          | 21        |
| 5.4 Signalanalyse .....                                                                               | 21        |
| 5.5 Signaldarstellung.....                                                                            | 21        |
| 5.6 Kalibrierung.....                                                                                 | 22        |
| <b>6 Inbetriebsetzung .....</b>                                                                       | <b>22</b> |
| 6.1 Allgemeines .....                                                                                 | 22        |
| 6.2 Systemprüfungen .....                                                                             | 22        |
| 6.3 Messungen während der Inbetriebsetzung der Reaktoranlage .....                                    | 23        |
| <b>7 Durchführung der Überwachung .....</b>                                                           | <b>23</b> |
| 7.1 Allgemeines .....                                                                                 | 23        |
| 7.2 Voraussetzungen .....                                                                             | 24        |
| 7.3 Messungen .....                                                                                   | 25        |
| 7.4 Überwachung .....                                                                                 | 26        |
| 7.5 Überprüfung des Überwachungssystems .....                                                         | 31        |
| <b>8 Dokumentation.....</b>                                                                           | <b>32</b> |
| <b>Anhang A (informativ) Schwingungsüberwachung, Beispiel 1 .....</b>                                 | <b>34</b> |
| A.1 Allgemeines .....                                                                                 | 34        |
| A.2 Überwachung der Komponenten des Primärkreises und der Reaktordruckbehälter-Einbauten .....        | 34        |
| A.3 Frequenzselektive Überwachung der Wellenschwingungen der Hauptkühlmittelpumpen .....              | 36        |
| <b>Anhang B (informativ) Schwingungsüberwachung, Beispiel 2 .....</b>                                 | <b>46</b> |
| B.1 Überwachung der Komponenten des Primärkreises und der Reaktordruckbehälter-Einbauten .....        | 46        |
| B.2 Frequenzselektive Überwachung der Wellenschwingungen der Hauptkühlmittelpumpen.....               | 48        |
| <b>Anhang C (informativ) Beispiel für das Signalverhalten bei einem Wellenanriss .....</b>            | <b>60</b> |
| <b>Literaturhinweise .....</b>                                                                        | <b>62</b> |
| <b>Bilder</b>                                                                                         |           |
| <b>Bild 1 — Prinzipielle schwingungstechnische Zusammenhänge am Primärkreis .....</b>                 | <b>7</b>  |
| <b>Bild 2 — Beispiele von Signalverläufen und zugehörigen Autoleistungsdichtespektren .....</b>       | <b>8</b>  |
| <b>Bild 3 — Schema eines Schwingungsüberwachungssystems .....</b>                                     | <b>10</b> |
| <b>Bild 4 — Beispiel einer Anordnung der Aufnehmer für eine 4-Loop-Druckwasserreaktoranlage .....</b> | <b>13</b> |
| <b>Bild 5 — Seismischer Absolutwegaufnehmer .....</b>                                                 | <b>16</b> |
| <b>Bild 6 — Fernkalibrierbarer Relativwegaufnehmer .....</b>                                          | <b>17</b> |
| <b>Bild 7 — Piezoelektrischer Druckaufnehmer .....</b>                                                | <b>18</b> |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Bild 8 — Neutronenionisationskammer .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>19</b> |
| <b>Bild 9 — Wellenschwingungsaufnehmer .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>20</b> |
| <b>Bild 10 — Peakänderungen bei Änderungen des Merkmals Frequenz, Magnitude und Form<br/>(idealisiert) .....</b>                                                                                                                                                                                                                  | <b>24</b> |
| <b>Bild 11 — Mögliches Vorgehen beim Vergleich von Betriebsmessungen BM mit der gültigen<br/>Referenzmessung (hier RM 01).....</b>                                                                                                                                                                                                | <b>26</b> |
| <b>Bild 12 — Beispiel für den optischen Vergleich zweier Autoleistungsdichtespektren aus<br/>Referenzmessung und einer Betriebsmessung.....</b>                                                                                                                                                                                   | <b>28</b> |
| <b>Bild 13 — Beispiel für den optischen Vergleich zweier Effektivwertspektren aus<br/>Referenzmessung und einer Betriebsmessung.....</b>                                                                                                                                                                                          | <b>30</b> |
| <b>Bild 14 — Trends der Effektivwerte .....</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>31</b> |
| <b>Bild A.1 — Autoleistungsdichtespektrum mit markierten Komponentenfrequenzen .....</b>                                                                                                                                                                                                                                          | <b>37</b> |
| <b>Bild A.2 — Autoleistungsdichtespektrum mit markierten Komponentenfrequenzen und<br/>überwachten Frequenzbändern .....</b>                                                                                                                                                                                                      | <b>38</b> |
| <b>Bild A.3 — Frequenztrend (Pendelschwingung des Reaktordruckbehälters) ohne<br/>Überschreiten der Aufmerksamkeitsschwellen .....</b>                                                                                                                                                                                            | <b>40</b> |
| <b>Bild A.4 — Frequenztrend (erste Schemelbiegeschwingung) mit Überschreiten einer<br/>Aufmerksamkeitsschwelle .....</b>                                                                                                                                                                                                          | <b>40</b> |
| <b>Bild A.5 — Quotientenspektrum der Autoleistungsdichte aus Betriebsmessung und<br/>Referenzmessung eines Absolutwegaufnehmersignals.....</b>                                                                                                                                                                                    | <b>41</b> |
| <b>Bild A.6 — Wasserfalldarstellung von Autoleistungsdichtespektren eines<br/>Absolutwegaufnehmersignals .....</b>                                                                                                                                                                                                                | <b>41</b> |
| <b>Bild A.7 — Wasserfalldarstellung von Quotientenspektren mit definierten Aufmerksamkeits-<br/>schwellen, berechnet für die Autoleistungsdichtespektren von Bild A.6, bezogen auf das<br/>Referenzspektrum von RM01 .....</b>                                                                                                    | <b>42</b> |
| <b>Bild A.8 — Vergleich des Effektivwertspektrums einer Betriebsmessung mit dem der<br/>Referenzmessung .....</b>                                                                                                                                                                                                                 | <b>43</b> |
| <b>Bild A.9 — Trends der Effektivwertspektren (Wasserfalldiagramm).....</b>                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>43</b> |
| <b>Bild A.10 — Trends der drehzahlharmonischen Effektivwerte (Trenddiagramm) .....</b>                                                                                                                                                                                                                                            | <b>44</b> |
| <b>Bild A.11 — Wellenorbits und Wellenschwingungssignale einer Betriebsmessung und einer<br/>Referenzmessung .....</b>                                                                                                                                                                                                            | <b>45</b> |
| <b>Bild B.1 — Vergleich von Autoleistungsdichtespektren (Referenz- und Betriebsmessung) mit<br/>überwachten Frequenzbändern .....</b>                                                                                                                                                                                             | <b>51</b> |
| <b>Bild B.2 — Jahrestrendverläufe der drei überwachten Merkmale Frequenz, Magnitude und<br/>Diskriminante in den Frequenzbändern von Bild B.1 (im Original in Farbe) .....</b>                                                                                                                                                    | <b>52</b> |
| <b>Bild B.3 — Ergebnisse der Schwingungsüberwachung in Form eines Statusplots<br/>(Ausschnitt): Spektren der Referenzmessung und der letzten Betriebsmessung mit<br/>farbcodierten überwachten Frequenzbändern, darunter jeweils zugehörige<br/>Trenddarstellungen des angewählten überwachten Merkmals (hier Frequenz) .....</b> | <b>54</b> |
| <b>Bild B.4 — Spektrenfolge eines Relativwegaufnehmersignals in Wasserfalldarstellung mit<br/>einer Peakänderung (Magnitude) im nicht automatisch überwachten Frequenzbereich .....</b>                                                                                                                                           | <b>55</b> |
| <b>Bild B.5 — Spektrenfolge eines Relativwegaufnehmersignals in Wasserfalldarstellung mit<br/>einer Peakänderung (Frequenz) im nicht automatisch überwachten Frequenzbereich .....</b>                                                                                                                                            | <b>56</b> |
| <b>Bild B.6 — Effektivwertspektrum der Referenzmessung und Effektivwertspektren von<br/>Betriebsmessungen .....</b>                                                                                                                                                                                                               | <b>57</b> |
| <b>Bild B.7 — Trends der Änderungen der drehzahlharmonischen Anteile zweier<br/>Wellenschwingungssignale einer Hauptkühlmittelpumpe in einem BEZ .....</b>                                                                                                                                                                        | <b>58</b> |
| <b>Bild C.1 — Beispiel für Trends des maximalen Wellenausschlags und der<br/>drehzahlharmonischen Effektivwerte bei einem Wellenanriss .....</b>                                                                                                                                                                                  | <b>61</b> |

**Tabellen**

|                                                                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabelle 1 — Spektrenvergleich aus Bild 12 .....</b>                                                                                                             | <b>29</b> |
| <b>Tabelle A.1 — Beispiel einer ausgefüllten Tabelle zur Überwachung der Komponenten des<br/>Primärkreises .....</b>                                               | <b>39</b> |
| <b>Tabelle A.2 — Auszug einer Überwachungstabelle für Hauptkühlmittelpumpen-<br/>Wellenschwingungen (Abkürzungen, siehe Legende zu Tabelle A.1) .....</b>          | <b>44</b> |
| <b>Tabelle B.1 — Beispiel einer ausgefüllten Tabelle zur Festlegung der Merkmale<br/>Diskriminante, Frequenz und Magnitude .....</b>                               | <b>50</b> |
| <b>Tabelle B.2 — Ergebnisse einer Schwingungsüberwachung mit Angabe der überwachten<br/>Merkmale, bei denen Aufmerksamkeitsschwellen überschritten wurden.....</b> | <b>53</b> |
| <b>Tabelle B.3 — Frequenzbänder, Bandgrenzen, Referenzwerte und Ansprechwerte am<br/>Beispiel zweier Wellenschwingungs- und Relativwegsignale .....</b>            | <b>59</b> |

## Vorwort

Dieses Dokument wurde vom NA 062-07-48 AA „Betriebsüberwachung — Kerntechnik“ erarbeitet. Es werden Anforderungen an das Schwingungsüberwachungssystem, dessen Inbetriebsetzung, die Durchführung der Überwachung und die Dokumentation festgelegt, zu dem Zweck, Änderungen im Schwingungsverhalten der Komponenten des Primärkreises, der Reaktordruckbehälter-Einbauten und der Hauptkühlmittelpumpenwellen so frühzeitig zu erkennen, dass hinreichend Zeit für die Bewertung des veränderten Schwingungszustandes gewonnen wird, um etwaige sich anbahnende Fehler oder Schäden zu identifizieren und so gezielte Inspektionen zu ermöglichen.

In Anlehnung an KTA 3201.4 ist der Titel der Norm „Betriebsüberwachung“.

DIN 25475 *Kerntechnische Anlagen — Betriebsüberwachung* besteht aus:

- *Teil 1: Körperschallüberwachung zum Erkennen loser Teile*
- *Teil 2: Schwingungsüberwachung zur frühzeitigen Erkennung von Änderungen im Schwingungsverhalten des Primärkreises von Druckwasserreaktoren*

Die Anhänge A, B und C sind informativ.

## Änderungen

Gegenüber DIN 25475-2:2001-08 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Überwachung der Hauptkühlmittelpumpenwellen ergänzt;
- b) Änderungen aufgrund der Betriebserfahrung eingearbeitet;
- c) Begriffe überarbeitet;
- d) Bilder angepasst;
- e) Anhänge A und B überarbeitet, Anhang C ergänzt.

## Frühere Ausgaben

DIN 25475-2: 2001-08

## 1 Anwendungsbereich

Diese Norm ist anzuwenden für Verfahren zum frühzeitigen Erkennen von Änderungen im Schwingungsverhalten der Komponenten des Primärkreises, der Reaktordruckbehälter-Einbauten und der Hauptkühlmittelpumpenwellen von Druckwasserreaktoren. Bei dem hierzu verwendeten Überwachungssystem handelt es sich um eine betriebliche Einrichtung, die nicht nach KTA 3501 ausgelegt werden muss.

Diese Norm ist nicht anzuwenden auf Verfahren zur Überwachung des maximalen Wellenausschlags der Hauptkühlmittelpumpen. Einzelheiten zum maximalen Wellenausschlag sind z. B. DIN ISO 7919-1 und VDI 2059 Blatt 5 zu entnehmen.

## 2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

DIN 25404:1991-01, *Kerntechnik — Formelzeichen*

KTA 3204, *Reaktordruckbehälter-Einbauten*

KTA 3501, *Reaktorschutzsystem und Überwachungseinrichtungen des Sicherheitssystems*

## 3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

### 3.1

#### **Aufmerksamkeitsschwellen**

Werte, die für die zu überwachenden Merkmale individuell festzulegen sind und bei deren Überschreitung weiterführende Maßnahmen durchzuführen sind

### 3.2

#### **Peak**

ein in einer Kennfunktion identifizierbarer Kurvenabschnitt, der durch ein lokales Maximum und eine endliche Bandbreite gekennzeichnet ist

### 3.3

#### **Frequenzband**

definierter Frequenzbereich, der durch einen oberen und unteren Frequenzwert festgelegt ist

### 3.4

#### **Magnitude**

Wert des Autoleistungsdichtespektrums bei der betrachteten Frequenz

### 3.5

#### **Resonanzfrequenzen**

die durch den Einfluss der Dämpfungen und Kopplungsbedingungen veränderten Eigenfrequenzen der Komponenten des Primärkreises

### 3.6

#### **Schwingungsform**

das zur jeweiligen Resonanzfrequenz gehörende zeit- und ortsabhängige Schwingungsbild eines Bauteils

## 4 Beschreibung der Überwachungstechnik

Das Schwingungsüberwachungssystem hat die Aufgabe, möglichst frühzeitig Änderungen im Schwingungsverhalten der Reaktordruckbehälter-Einbauten, weiterer Primärkreiskomponenten und der Hauptkühlmittelpumpenwellen anzuzeigen. Die das Schwingungsverhalten bestimmenden Größen sind Massen, Federkonstanten, Dämpfungen, Anregungskräfte, Spiele und Anschläge.

Das Schwingungsverhalten wird im Wesentlichen erfasst durch Messwertgeber zur Messung

- der mechanischen Schwingungen an der Außenseite der druckführenden Umschließung,
- des Neutronenflussrauschens,

- der Druckfluktuation,
- der Hauptkühlmittelpumpen-Wellenschwingung.

Diese Messgrößen liefern Informationen, die entweder für sich alleine aussagefähig sind, sich zum Teil überdecken oder sich gegenseitig ergänzen. Der prinzipielle Zusammenhang zwischen Schwingungsanregungen und den zur Verfügung stehenden Messgrößen sowie den daraus zu beziehenden Informationen ist in Bild 1 dargestellt.

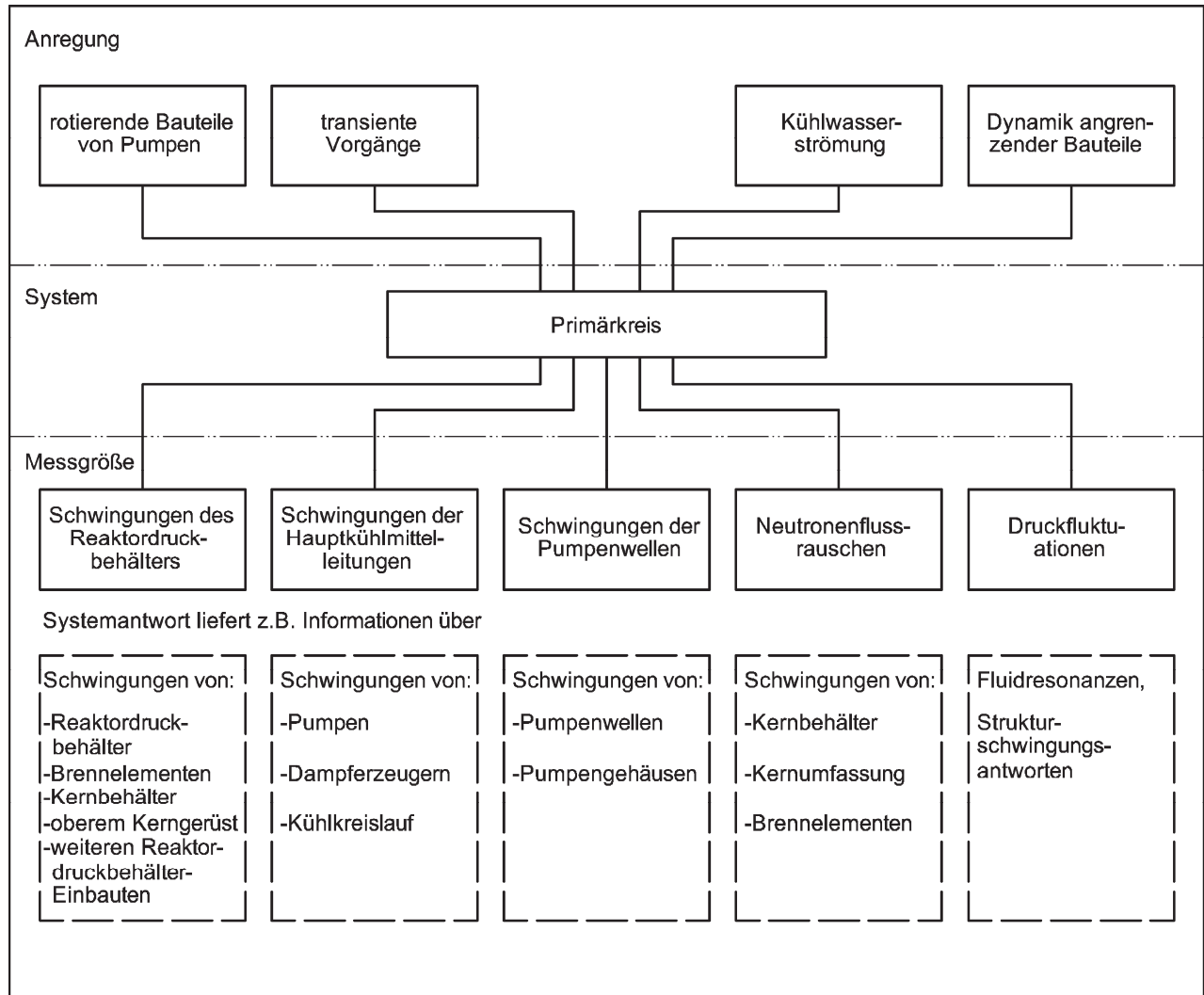


**Bild 1 — Prinzipielle schwingungstechnische Zusammenhänge am Primärkreis**

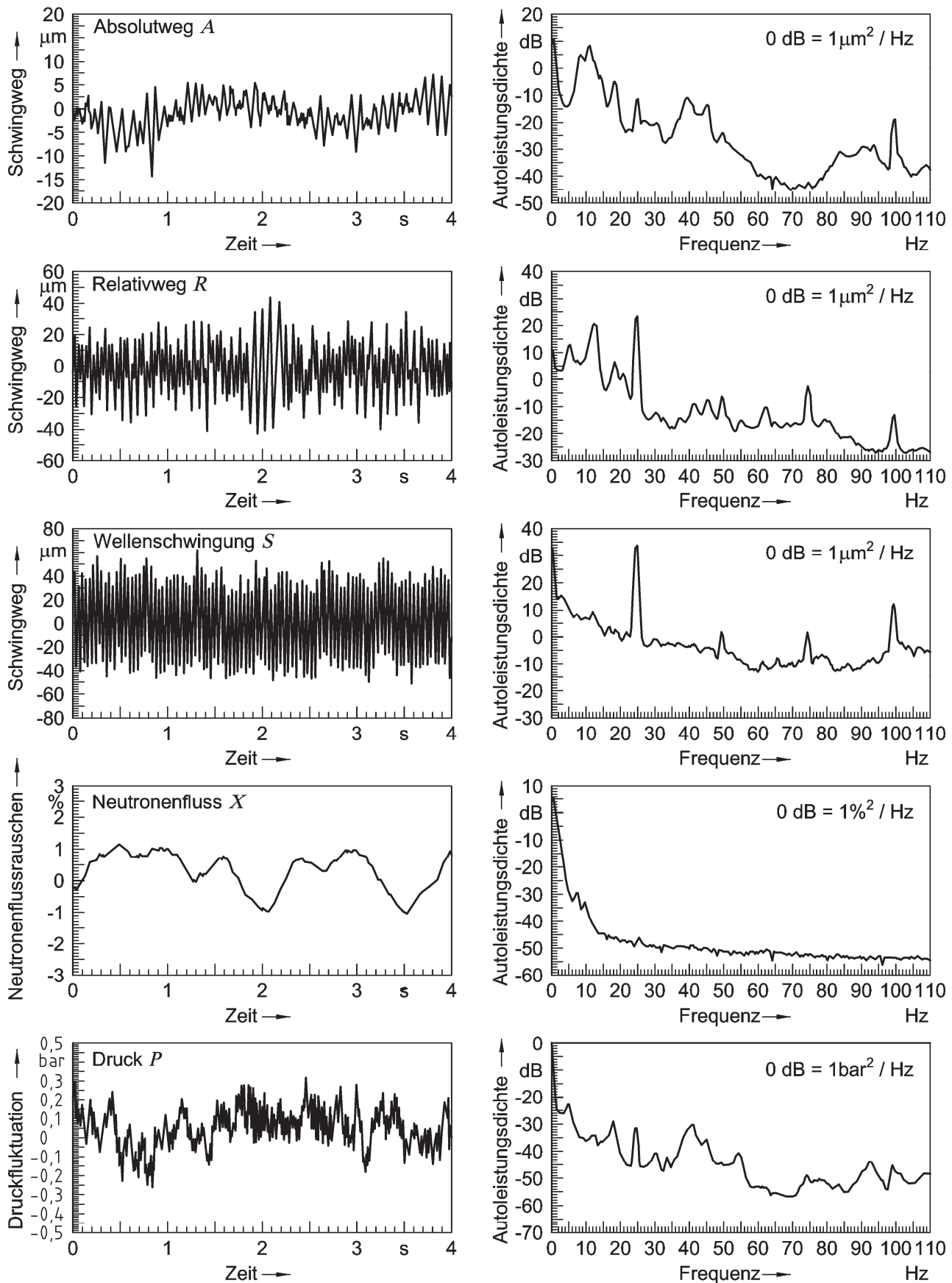


Bild 2 — Beispiele von Signalverläufen und zugehörigen Autoleistungsdichtespektren

Aus strukturdynamischer Sicht stellen die Bauteile des Primärkreises ein schwingfähiges gekoppeltes Vielmassensystem dar. Wenn nachfolgend von zu überwachenden Komponenten und zugehörigen Peaks gesprochen wird, so ist dies vereinfachend, da über die Kopplung grundsätzlich das Gesamtsystem betroffen ist. Je nach Kopplungsgrad kann bei Änderung des Schwingungsverhaltens einer Komponente auch das Schwingungsverhalten der anderen Komponenten (und damit den zugeordneten Peaks) beeinflusst werden. Somit enthalten die Signale der Aufnehmer des Schwingungsüberwachungssystems immer Informationen über das Schwingungsverhalten mehrerer Komponenten.

Das Schwingungsverhalten lässt sich durch Kennfunktionen und Kenngrößen charakterisieren. Im bestimmungsgemäßen Betrieb werden Referenzmessungen mit dem Ziel durchgeführt, Referenzfunktionen, Referenzkenngrößen und deren Werte (Referenzwerte) der Messsignale zu ermitteln. Diese Referenzmessungen erfolgen erstmalig nach der Inbetriebsetzung der Reaktoranlage (Null-Referenzmessung) und danach nur in begründeten Fällen.

Im nachfolgenden Betrieb werden weitere Messungen (Betriebsmessungen) durchgeführt. Zur Feststellung von Änderungen im Schwingungsverhalten werden die Kennfunktionen und die Kenngrößen dieser Betriebsmessungen grundsätzlich mit den gültigen Referenzfunktionen und Referenzkenngrößen verglichen. Die Kenngrößen werden aus den mit Hilfe der Fourier-Transformation im Frequenzbereich dargestellten Messsignalen ermittelt.

Für die Überwachung der Komponenten des Primärkreises und der Reaktordruckbehälter-Einbauten werden als Kennfunktionen vorzugsweise Autoleistungsdichtespektren herangezogen.

In ihnen bilden sich die den Schwingungszustand charakterisierenden Eigenschaften der zu überwachenden Komponenten als Peaks ab. Änderungen der Peaks sind somit unmittelbar Änderungen im Schwingungsverhalten zuzuordnen. Bild 2 zeigt Signalverläufe und Autoleistungsdichtespektren für die gemessenen Systemantworten nach Bild 1, beispielhaft im Frequenzbereich von 0 Hz bis 110 Hz.

Zur Erkennung von Wellenanrissen werden neben dem maximalen Wellenausschlag der Pumpenwelle als Ergänzung die drehzahlharmonischen Wellenschwungsanteile ermittelt. Bei dieser frequenzselektiven Überwachung werden die Magnituden oder die Effektivwerte der drehzahlharmonischen Wellenschwungsanteile überwacht.

Die Bewertung der drehzahlharmonischen Wellenschwungsanteile dient zum einen der möglichst frühzeitigen Erkennung von Wellenanrissen und zum anderen zur Gewinnung von Diagnoseinformationen bei Änderungen des maximalen Wellenausschlags.

Signifikante Änderungen können entweder bekanntem Langzeitverhalten zugeordnet werden (z. B. durch Brennelementwachstum) oder auf einen sich anbahnenden Fehler oder Schaden hinweisen (z. B. Nachlassen von Federkräften, Lockerung von Verbindungen, Wellenanriss).

In den informativen Anhängen A und B sind zwei Systeme beispielhaft beschrieben, die diese Überwachungstechnik rechnergestützt anwenden.

## 5 Anforderungen an das Schwingungsüberwachungssystem

### 5.1 Prinzipieller Aufbau und Auslegungskriterien

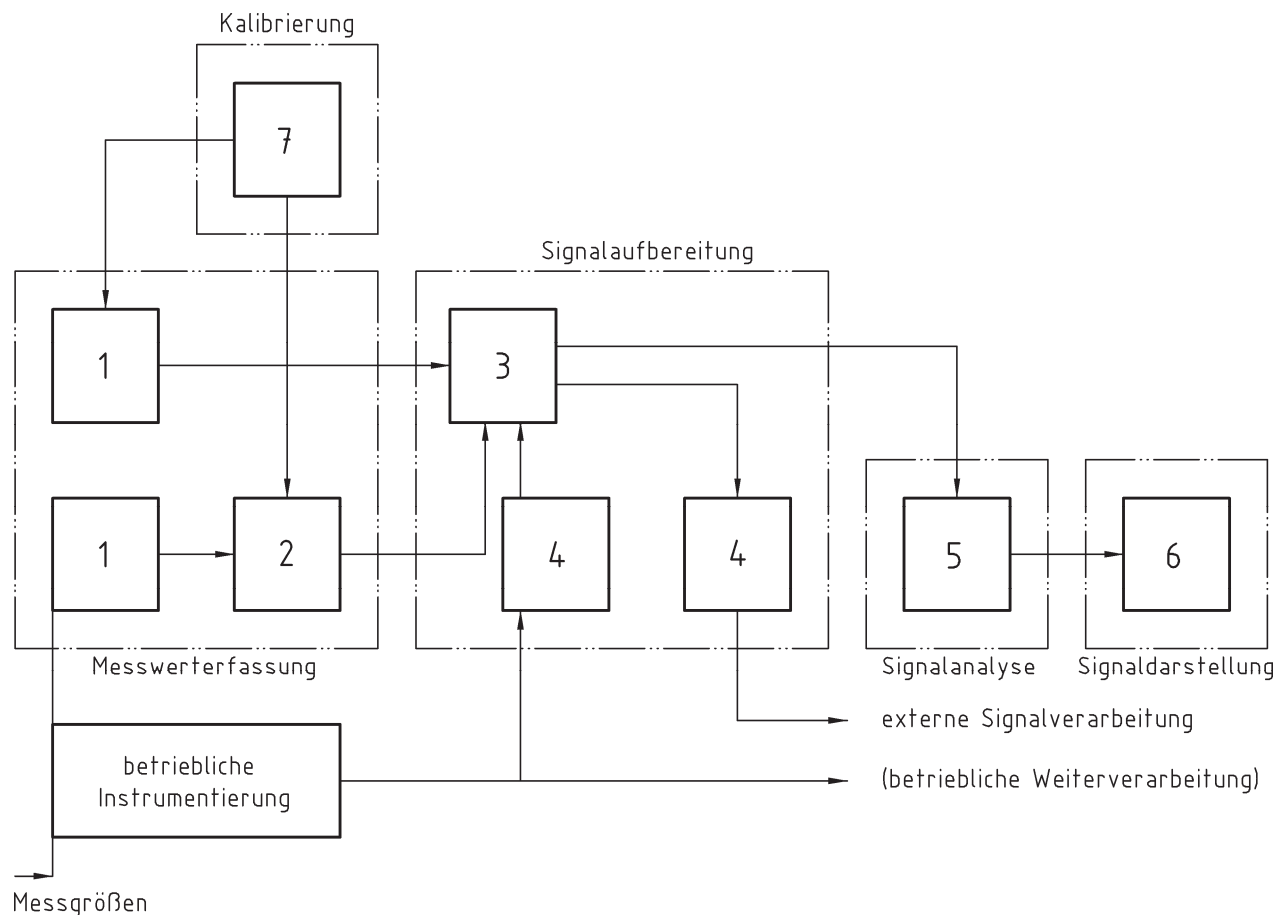
Für die im System verwendeten Messgrößen müssen folgende Funktionen realisiert werden:

- Messwerterfassung;
- Signalaufbereitung;
- Signalanalyse;

- Signaldarstellung;
- Kalibrierung.

Für Messgrößen aus der betrieblichen Instrumentierung (z. B. Neutronenflussmesssystem, Wellenschwingung) brauchen diese Funktionen nicht alle innerhalb des Schwingungsüberwachungssystems erfüllt zu werden, wenn diese bereits andernorts realisiert sind.

Der prinzipielle Aufbau eines Schwingungsüberwachungssystems ist in Bild 3 dargestellt.



### Legende

- 1 Aufnahme
- 2 Impedanzwandler
- 3 Verstärker, Filter
- 4 rückwirkungsfreie Auskopplung (z. B. Trennverstärker)
- 5 Analyseeinheit
- 6 Anzeige-, Registrier-, Speichereinheit
- 7 Kalibriereinrichtung

**Bild 3 — Schema eines Schwingungsüberwachungssystems**

Für die Messwerterfassung können spezielle Aufnehmer (1) (Absolutwegaufnehmer, Relativwegaufnehmer, dynamische Druckaufnehmer) verwendet werden.

Zur Aufbereitung der Signale sind je nach verwendetem Aufnehmer unterschiedliche Baugruppen (2) und (3) (z. B. Ladungsverstärker, Trägerfrequenzverstärker) erforderlich.

Die Signale der betrieblichen Instrumentierung (z. B. Neutronenflussmesssystem, Wellenschwingung) sind für das Schwingungsüberwachungssystem breitbandig und rückwirkungsfrei (z. B. über Trennverstärker (4)) auszukoppeln.

Zur Weiterverarbeitung der Signale ist eine Analyseeinheit erforderlich (5). Sie muss neben der Beurteilung im Zeitbereich (Maximalamplituden) eine Analyse im Frequenzbereich ermöglichen. Sie ist mindestens zweikanalig auszuführen, um Korrelationsanalysen durchführen zu können.

Zur externen Signalverarbeitung müssen die Signale breitbandig über rückwirkungsfreie Auskopplungen (4) zur Verfügung gestellt werden.

**ANMERKUNG** Falls die Funktionsfähigkeit der Signalaufbereitung von der Funktionsfähigkeit der Analyseeinheit abhängt, ist es sinnvoll, dass die Ausgangssignale zur externen Signalverarbeitung auch bei Ausfall der Analyseeinheit zur Verfügung gestellt werden können.

Die von der Analyseeinheit bereitgestellten Signale und Kennfunktionen müssen dokumentationsfähig aufgezeichnet werden können (6). Eine Überprüfung der Messketten muss möglich sein. Dazu ist eine Kalibriereinrichtung (7) vorzusehen.

Die Auslegung des Systems hat in Übereinstimmung mit den für die jeweilige Reaktoranlage gültigen allgemeinen und anlagenbezogenen Vorschriften für die betriebliche Leittechnik zu erfolgen. So weit technisch möglich und vertretbar, sind die Komponenten des Schwingungsüberwachungssystems in begehbaren Räumen anzuordnen.

Das System ist so auszulegen, dass

- mindestens ein Frequenzbereich von 0,1 Hz bis 200 Hz ausgewertet werden kann,
- bei Messketten gleicher Art, die einschließlich Aufnehmer kalibriert werden können, die Amplitudengänge um nicht mehr als 1,5 dB voneinander abweichen,
- bei Messketten gleicher Art, die nicht mit Aufnehmern kalibriert werden können, die Amplitudengänge um nicht mehr als 1,0 dB voneinander abweichen.

## 5.2 Messwerterfassung

### 5.2.1 Allgemeines

Zur Messwerterfassung können sowohl spezielle Aufnehmer als auch Aufnehmer der Betriebsinstrumentierung verwendet werden. Sie müssen bezüglich Art, Empfindlichkeit im interessierenden Frequenzbereich und Messort geeignet sein, die für die Überwachungsaufgabe ausreichenden Messinformationen zu liefern.

Zur Gewinnung der gewünschten Messinformationen sind sowohl direkte als auch indirekte Messverfahren zugelassen. Bei den indirekten Messverfahren muss der Bezug zu den zu überwachenden Größen bekannt sein.

Für die Aufnehmer und die Verkabelung sind die am Ort ihres Einsatzes herrschenden Umgebungsbedingungen zu berücksichtigen, d. h., sie müssen dementsprechend temperatur- und strahlenresistent sein. Zusätzlich sind sie spritzwassergeschützt ausulegen.

### 5.2.2 Auswahl der Messorte und Montage der Aufnehmer und Kabel

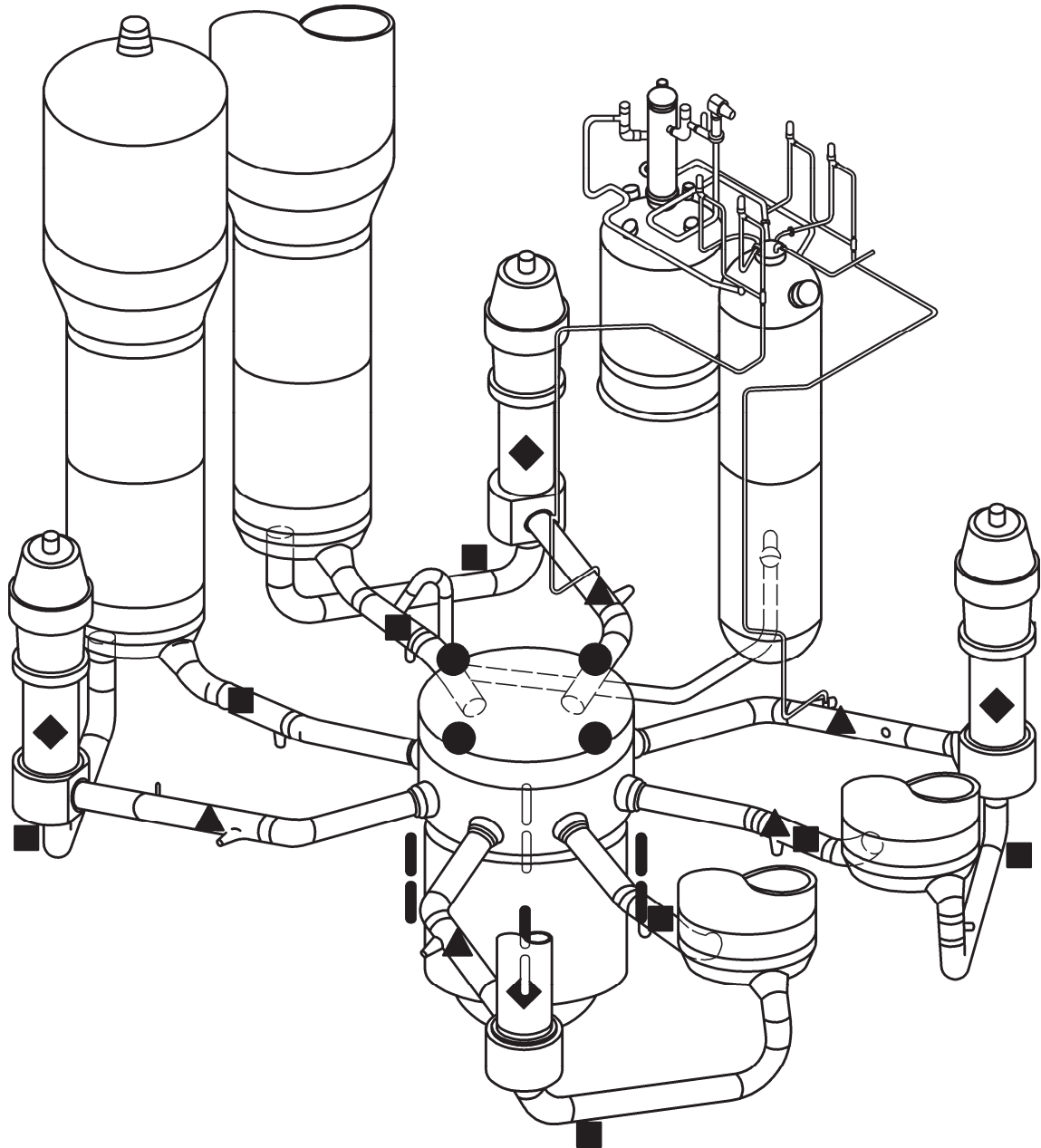
Die Festlegung der Messorte und die Anzahl der Aufnehmer hat so zu erfolgen, dass zur Erfüllung der Überwachungsaufgabe aussagefähige Informationen erwartet werden können. Der hierzu notwendige Kenntnisstand ergibt sich aus analytischen oder experimentellen Erfahrungen, oder auch aus Erfahrungen mit vergleichbaren Anlagen.

Bei der Festlegung der Messorte ist darauf zu achten, dass

- durch die Anordnung der Aufnehmer die Zugänglichkeit für wiederkehrende Prüfungen des Primärkreises möglichst nicht beeinträchtigt wird,
- die Ortsdosisleistung möglichst gering ist,
- die Aufnehmer zur Minimierung der Strahlenbelastung des Personals (z. B. bei Reparatur) schnell montierbar und demontierbar sind,
- die sicherheitstechnischen Belange bezüglich der druckführenden Umschließung beachtet werden.

Für die Montage der Schwingungsaufnehmer müssen die Orte entsprechend der vorgesehenen Art der Befestigung vorbereitet sein. Bei der Verkabelung ist wegen des niedrigen Signalpegels auf ausreichende elektrische Abschirmung und ausreichenden Abstand zu starkstromführenden Kabeln zu achten. Zugentlastung ist durchzuführen, und kabelbezogene Vorschriften für Biegeradien sind zu beachten. Schraub- und Klemmverbindungen sind gegen Lockern zu sichern.

Eine Aufnehmeranordnung ist beispielhaft für eine 4-Loop-Druckwasserreaktoranlage in Bild 4 dargestellt.



### Legende

- 4 Absolutwegaufnehmer A (Reaktordruckbehälterdeckel)
- 16 Relativwegaufnehmer R an 8 Positionen
- ▲ 5 Druckaufnehmer P
- ▮ 8 Neutronenionisationskammern X (Außeninstrumentierung)
- ◆ 8 Wellenschwingungsaufnehmer S an 4 Positionen

**Bild 4 — Beispiel einer Anordnung der Aufnehmer für eine 4-Loop-Druckwasserreaktoranlage**

### 5.2.3 Beispiel einer Messwerterfassung

#### 5.2.3.1 Allgemeines

In den nachfolgenden Abschnitten sind als Beispiel die derzeit verwendeten Arten von Aufnehmern (siehe Bild 5 bis Bild 9) beschrieben.

#### 5.2.3.2 Messung der mechanischen Schwingungen an der Außenseite der druckführenden Umschließung

Die für die Überwachungsaufgabe wichtigsten Informationen können durch die Messung der Schwingungen von Komponenten des Reaktorkühlsystems gewonnen werden. Hierfür werden bevorzugt Absolutweg- und Relativwegaufnehmer eingesetzt. Relativwegaufnehmer werden verwendet, wenn geeignete Festpunkte (z. B. im Bereich der Hauptkühlmittelleitungen) vorhanden sind. Falls dieses nicht der Fall ist (z. B. aus räumlichen Gründen oder durch das Schwingungsverhalten möglicher Festpunkte), werden Absolutwegaufnehmer eingesetzt.

Von besonderer Bedeutung sind die Messorte am Reaktordruckbehälterdeckel, da sich dort neben den Schwingungen des Reaktordruckbehälters auch die Schwingungen der Reaktordruckbehältereinbauten erkennen lassen. Nach Bild 4 werden diese Schwingungen durch vier um 90° versetzt angeordnete Absolutwegaufnehmer erfasst. In den Bildern 5 a) und 5 b) sind Konstruktionsprinzip und Signalaufbereitung für einen seismischen Absolutwegaufnehmer dargestellt.

Weiterhin werden die Schwingungen jeder Hauptkühlmittelpumpe in einer horizontalen Ebene sowie die Schwingungen der Hauptkühlmittelleitungen zwischen Reaktordruckbehälter und Dampferzeuger in einer vertikalen Ebene, rechtwinklig zur Rohrachse, durch Relativwegaufnehmer erfasst. Die Relativwegaufnehmer sind jeweils paarweise um 90° versetzt angeordnet. Es werden fernkalibrierbare induktive Wegaufnehmer mit Tastspitze verwendet. In den Bildern 6 a) und 6 b) sind Konstruktionsprinzip und Signalaufbereitung für einen fernkalibrierbaren Relativwegaufnehmer dargestellt.

#### 5.2.3.3 Messung der Druckfluktuationen des Hauptkühlmittels

In den Hauptkühlmittelleitungen werden die Druckfluktuationen des Kühlmittels mit piezoelektrischen Druckaufnehmern erfasst. Die Druckaufnehmer sind direkt, d. h. ohne Druckentnahmeleitungen in die Hauptkühlmittelleitungen eingesetzt und als Teil der druckführenden Umschließung entsprechend ausgelegt.

Als Impedanzwandler werden Ladungsverstärker eingesetzt, die sich nah am Druckaufnehmer in einem Bereich befinden, der im Leistungsbetrieb zugänglich ist.

Die Druckaufnehmer liefern primär Informationen zu hydraulischen Phänomenen (z. B. Fluidresonanzen). Darüber hinaus können Aufnehmer im kalten Strang Informationen über die Hauptkühlmittelpumpen und die Anregungen für die Reaktordruckbehältereinbauten, Aufnehmer im heißen Strang Informationen über die Schwingungsantwort der Reaktordruckbehältereinbauten liefern. In den Bildern 7 a) und 7 b) sind Konstruktionsprinzip und Signalaufbereitung für einen piezoelektrischen Druckaufnehmer dargestellt.

#### 5.2.3.4 Messung des Neutronenflussrauschens

In den Fluktuationen  $\varphi$  (Neutronenflussrauschen) der Neutronenflussdichtesignale  $\Phi$  der Kernaußeninstrumentierung sind Informationen über mechanische Schwingungen enthalten. Die Abbildung der Schwingungen beruht dabei z. B. auf Änderungen der Neutronenflussdichte am Ort der Detektoren aufgrund der schwingungsbedingten Wasserspaltänderung zwischen Kernbehälter und Reaktordruckbehälter. Die zur Schwingungsüberwachung verwendeten Signale werden so aus dem Neutronenflussmesssystem ausgekoppelt, dass der für die Überwachung benötigte Frequenzbereich zur Verfügung steht. Der dynamische Signalanteil wird über Hochpassfilter oder Kompensationseinheit als Nutzsignal bereitgestellt.

**ANMERKUNG** In dieser Norm werden die Begriffe Neutronenfluss und Neutronenflussdichte nebeneinander und die Formelzeichen  $\Phi$  und  $\varphi$  abweichend von DIN 25404:1991-01 benutzt, um den üblichen Benennungen für die Messsignale Rechnung zu tragen.

Um die unterschiedlichen Leistungen der gemessenen Neutronenflussdichtespektren vergleichen zu können, wird der dynamische Signalanteil im Allgemeinen auf den Gleichanteil  $\Phi$  normiert. Das Konstruktionsprinzip einer Neutronenionisationskammer und das Prinzip der Auskoppelung des Messsignals für die Schwingungsüberwachung sind in den Bildern 8 a) und 8 b) dargestellt.

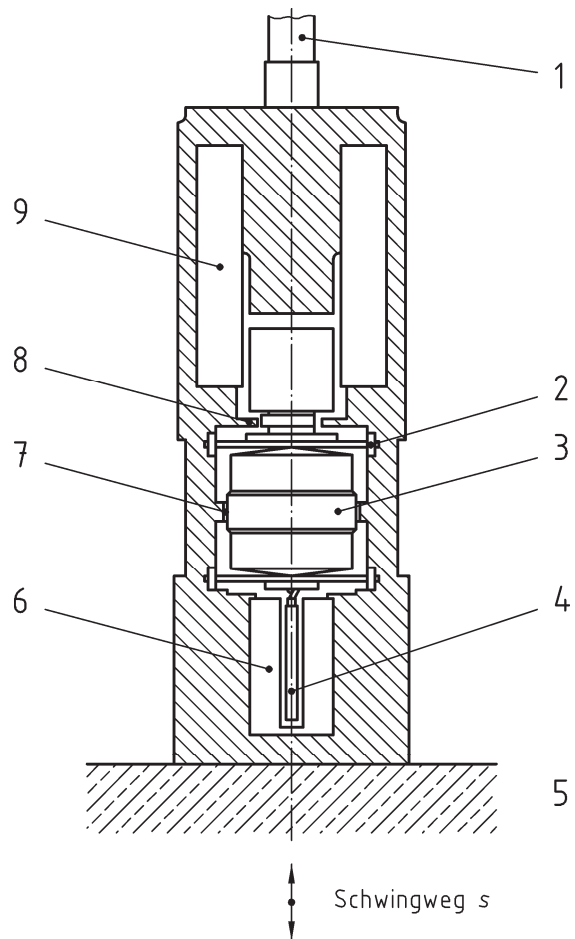
### 5.2.3.5 Messung der Wellenschwingungen

An den Hauptkühlmittelpumpen werden die Wellenschwingungen mit berührungslos messenden Wellenschwingungsaufnehmern erfasst, die nach dem Wirbelstromverfahren arbeiten. Der messtechnisch aktive Teil der Messkette besteht aus zwei Einheiten, dem Aufnehmer und dem Umsetzer. Der Aufnehmer enthält eine Messspule. Diese bildet mit dem Umsetzer und dem Verbindungskabel einen Schwingkreis, der elektronisch zu einer kontinuierlichen Oszillation angeregt wird. Die Oszillation erzeugt in der Messspule ein elektromagnetisches Wechselfeld. Dadurch entstehen in elektrisch leitenden Körpern Wirbelströme. Diese Wirbelströme wirken über das Magnetfeld auf die Messspule zurück und entziehen ihr elektrische Leistung. Der Leistungsumsatz ist umso größer, je dichter sich der Metallkörper vor der Spule befindet und je stärker er damit von ihrem Magnetfeld durchsetzt wird. Der Leistungsentzug äußert sich im Umsetzer durch ein Absinken der Oszillationsspannungsamplitude. Dieser Effekt wird im Umsetzer in ein Spannungssignal umgeformt, das proportional zum Abstand zwischen dem leitenden Körper und der Messspule ist.

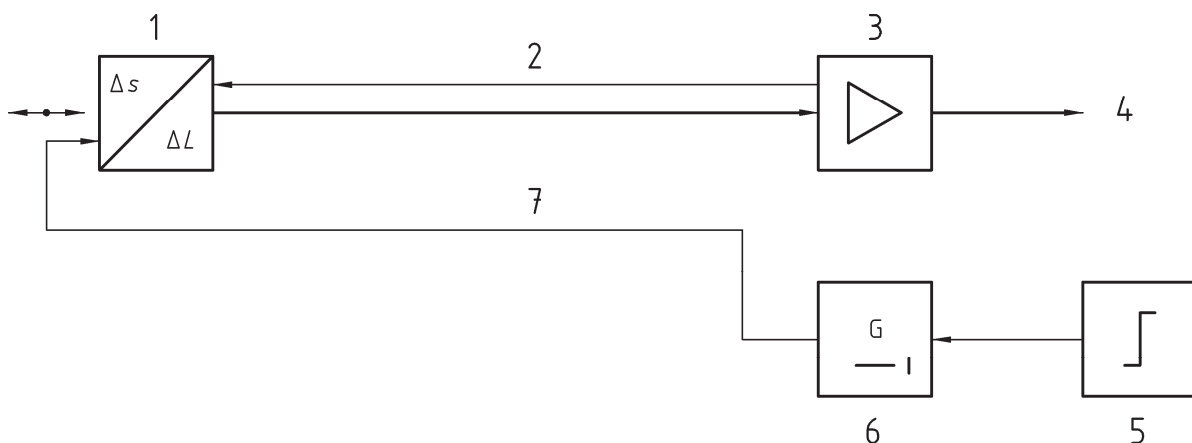
An jeder Hauptkühlmittelpumpe sind zwei Wellenschwingungsaufnehmer um 90° versetzt zueinander so montiert, dass sie die horizontalen Relativwegschwingungen zwischen Pumpenwelle und Pumpengehäuse in der Nähe der Kupplung Pumpenwelle/Motorwelle oder Pumpenwelle/Wellenausbaustück messen. Die Überlagerung der beiden um 90° versetzt gemessenen Signale in einem X-/Y-Diagramm liefert die Bahnkurve des Wellenmittelpunktes in der Messebene (kinetische Wellenbahn, siehe VDI 2059 Blatt 5). In den Bildern 9 a) und 9 b) sind Konstruktionsprinzip und Signalaufbereitung für einen Wellenschwingungsaufnehmer dargestellt.

### Legende

- 1 Kabelanschluss
- 2 Membranfeder
- 3 seismische Masse
- 4 Wandlerkern
- 5 Reaktordruckbehälter
- 6 Induktivwandler
- 7 Dämpfungsspalt
- 8 mechanischer Anschlag
- 9 Magnetspule



### a) Konstruktionsprinzip

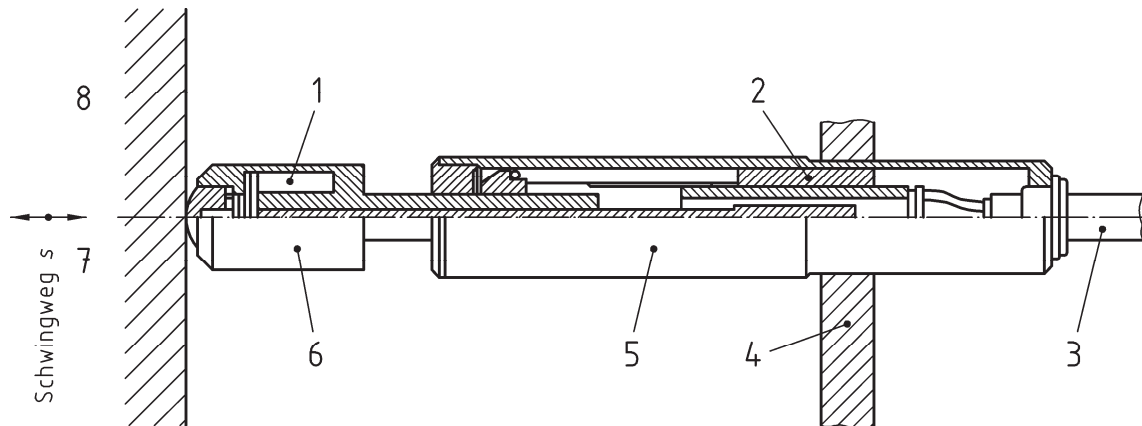


### Legende

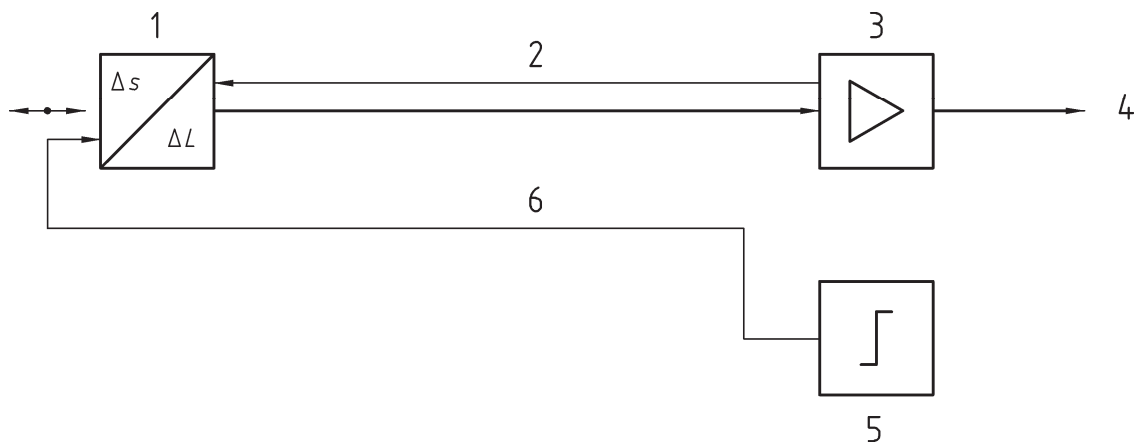
- 1 Aufnehmer
- 2 Brückenspeisung
- 3 Trägerfrequenzverstärker
- 4 Messsignal
- 5 Kalibriereinrichtung
- 6 Konstantstromquelle
- 7 Spulenstrom
- $\Delta s$  Wegdifferenz
- $\Delta L$  Induktivitätsdifferenz

### b) Signalaufbereitung

Bild 5 — Seismischer Absolutwegaufnehmer

**Legende**

- 1 Magnetspule
- 2 Induktivwandler
- 3 Kabelanschluss
- 4 Festpunkt
- 5 Aufnehmergehäuse
- 6 Tastkopf
- 7 Schwingweg
- 8 Primärkreiskomponente

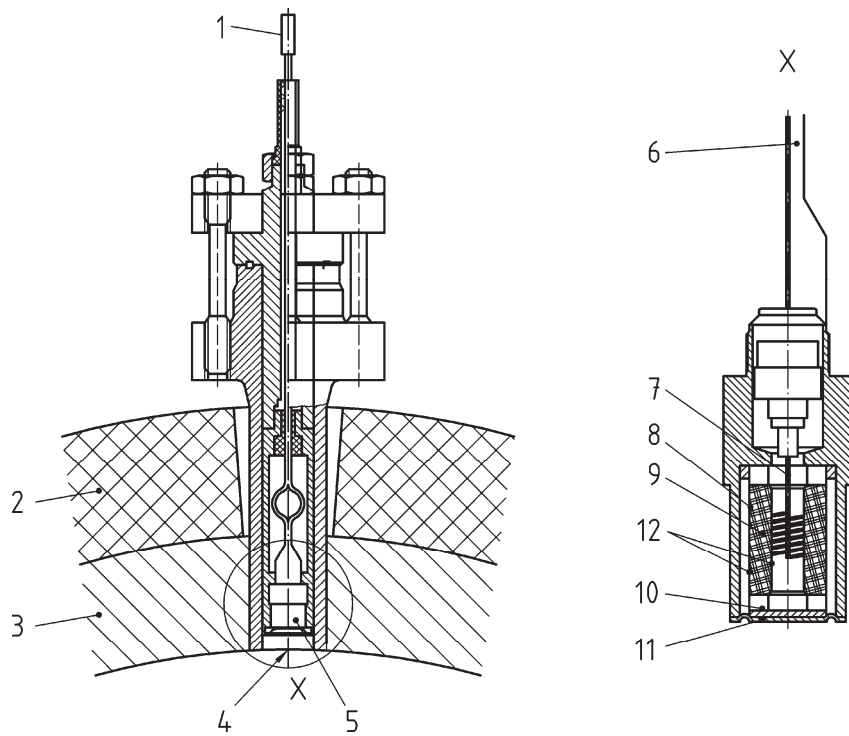
**a) Konstruktionsprinzip****Legende**

- |                            |                                   |
|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 Aufnehmer                | 6 Spulenstrom                     |
| 2 Brückenspeisung          | $\Delta s$ Wegdifferenz           |
| 3 Trägerfrequenzverstärker | $\Delta L$ Induktivitätsdifferenz |
| 4 Messsignal               |                                   |
| 5 Kalibriereinrichtung     |                                   |

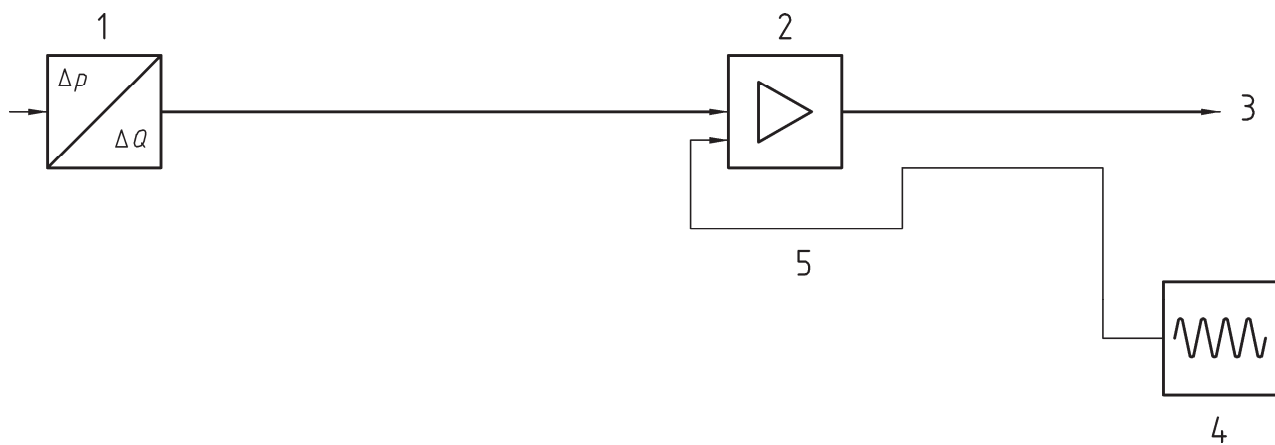
**b) Signalaufbereitung****Bild 6 — Fernkalibrierbarer Relativwegaufnehmer**

### Legende

- 1 Kabelanschluss
- 2 thermische Isolierung
- 3 Hauptkühlmittelleitung
- 4 dynamischer Druck  $p$
- 5 Aufnehmermembran
- 6 Anschluss: keramiksoliert
- 7 Innenelektrode
- 8 Außenelektrode
- 9 Quarzkristallelement
- 10 Temperaturkompensator
- 11 Membrane verschweißt
- 12 metallisiert



### a) Konstruktionsprinzip

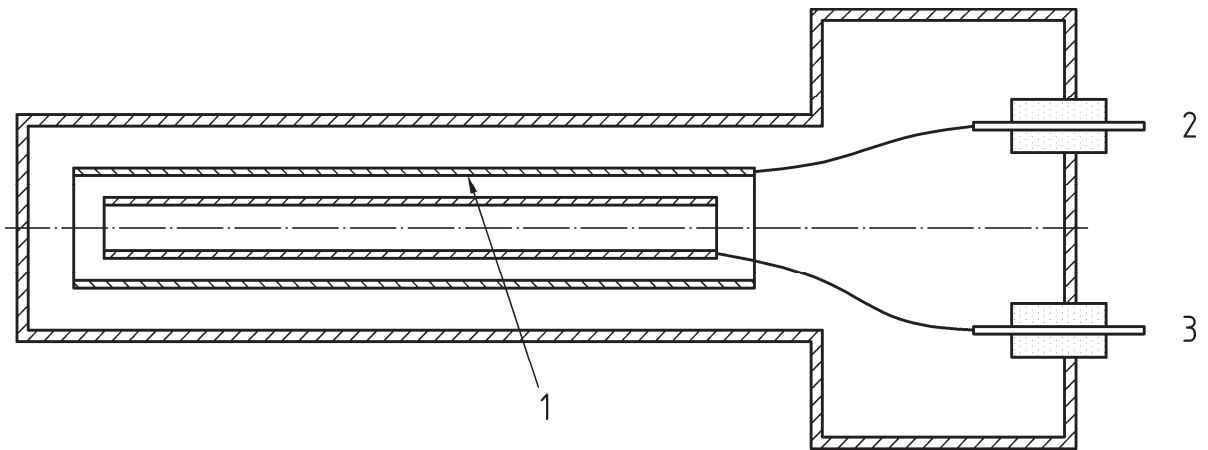


### Legende

- 1 Aufnehmer
- 2 Ladungsverstärker
- 3 Messsignal
- 4 Kalibriereinrichtung
- 5 Kalibriersignal
- $\Delta p$  Druckdifferenz
- $\Delta Q$  elektrische Ladungsdifferenz

### b) Signalaufbereitung

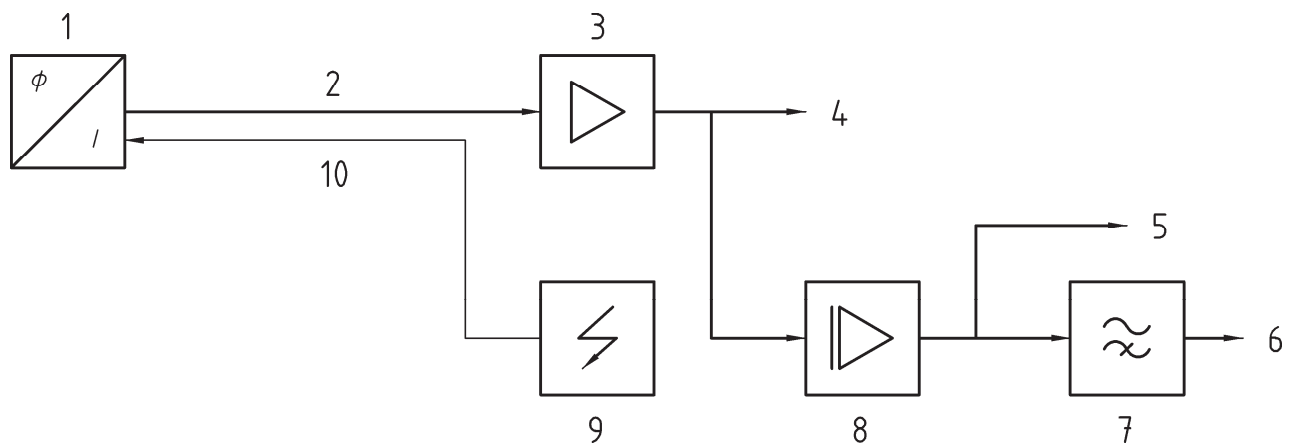
Bild 7 — Piezoelektrischer Druckaufnehmer



### Legende

- 1 Bor ( $^{10}\text{B}$ )-beschichtet
- 2 Hochspannung
- 3 Messsignal

### a) Konstruktionsprinzip



### Legende

- |                                            |                                            |
|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| 1 Messkammer                               | 7 Hochpassfilter oder Kompensationseinheit |
| 2 Messsignal                               | 8 Trennverstärker                          |
| 3 Verstärker                               | 9 Hochspannungsquelle                      |
| 4 Weiterverarbeitung (z. B. Reaktorschutz) | 10 Hochspannung                            |
| 5 Messsignal $\Phi$ (zum Normieren)        | $\varnothing$ Neutronenflussdichte         |
| 6 Messsignal $\phi$                        | Messkammerstrom                            |

### b) Signalaufbereitung

Bild 8 — Neutronenionisationskammer