

# Inhalt

<b>Abschnitt A: Einführung</b> .....	1
<b>A.I. Begriffe entsprechend der VDI-Richtlinie 2726</b> .....	1
<b>A.II. Grund und Ziel des Ausrichtens</b> .....	2
<b>A.III. Arten von Achsversatz</b> .....	6
<b>Abschnitt B: Messung des Ausrichtzustandes (Drehachsenversatz)</b> .....	11
<b>B.I. Einführung</b> .....	11
1. Einstellung und Messung des Axialversatzes .....	20
2. Messung des Radial- und Winkelversatzes .....	46
<b>B.II. Verfälschung von Meßergebnissen</b> .....	53
1. Durchbiegung der Meßvorrichtung .....	53
1.1 Einfluß der Durchbiegung der Meßvorrichtung auf die Messung des vertikalen Radialversatzes (Seitenansicht) .....	65
1.2 Einfluß der Durchbiegung der Meßvorrichtung auf die Messung des vertikalen Winkelversatzes .....	66
1.3 Einfluß der Durchbiegung der Meßvorrichtung auf die Messung des horizontalen (seitlichen) Radialversatzes (Draufsicht) .....	69
2. Verschiebung der Meßbezugsebene während der Radial- versatzmessung .....	70
3. Beeinflussung der Radialversatzmessung bei vorhandenem Winkelversatz .....	74
3.1 Radialversatzmessung auf zylindrischen Wellenzapfen .....	75
3.2 Radialversatzmessung auf kegelförmigen Wellenzapfen .....	81
4. Einfluß von Plan- und Radialschlag der Meßbezugs- fläche .....	93
4.1 Radialschlagermittlung .....	94
4.2 Planschlagermittlung .....	99

5. Äußere Einflüsse . . . . .	101
5.1 Beeinflussung durch an die Maschine angeschlossene Rohrleitungen . . . . .	101
5.1.1 Zulässige äußere Belastung von Maschinenstutzen . . . . .	103
5.1.2 Ausführungsplanung und Anschluß von Rohrleitungen an Turbomaschinen . . . . .	130
5.2 Allgemeines . . . . .	144
<b>B.III. Besonders erforderliche Meßmethoden . . . . .</b>	<b>145</b>
1. Spezielle Kupplungen . . . . .	145
2. Planetengetriebe . . . . .	148
3. Ausrichten von Drei-Lager-Maschinen . . . . .	151
4. Ausrichten von Kurbeltriebmaschinen, gekuppelt mit Turbomaschinen . . . . .	156
<b>Abschnitt C: Meßverfahren zur Ermittlung des Radial- und Winkerversatzes von Drehachsen mittels Meßuhren . . . . .</b>	<b>157</b>
<b>C.I. Axial-Radial-Verfahren bzw. AR-Methode (Messung des Versatzes mittels dreier Meßuhren) . . . . .</b>	<b>157</b>
1. Einführung . . . . .	157
2. Meßwertermittlung und -auswertung . . . . .	161
2.1 Drehung der Wellen um jeweilige Bereiche von 180° . . . . .	161
2.2 Drehung der Wellen um jeweilige Bereiche von 90° . . . . .	168
2.3 Begrenzte Drehmöglichkeit der Wellen um nur 1 x 180° . . . . .	171
3. Korrektur des Ausrichtzustandes (Ausrichttoleranzen) . . . . .	174
3.1 Allgemeines . . . . .	174
3.2 Ermittlung der erforderlichen Dickenänderung von Unterlegblechen . . . . .	179
3.2.1 Rechnerisches Verfahren . . . . .	179
3.2.1.1 Soll-Ausrichtzustand <i>ohne</i> gegebenen Soll-Winkerversatz . . . . .	179
3.2.1.2 Soll-Ausrichtzustand <i>mit</i> gegebenem Soll-Winkerversatz . . . . .	187
3.3 Korrektur in der horizontalen Bezugsebene . . . . .	192
3.4 Graphische Korrekturwertermittlung . . . . .	204
<b>C.II. Doppel-Radial-Verfahren bzw. DR-Methode (Messung des Versatzes mittels zweier Meßuhren) . . . . .</b>	<b>212</b>
1. Einführung . . . . .	212
2. Meßwertermittlung und -auswertung . . . . .	213

2.1	Meßmethode 1	213
2.2	Meßmethode 2	227
2.3	Meßmethode 3	227
3.	Korrektur des Ausrichtzustandes	239
3.1	Korrektur in der horizontalen Meßebe (Draufsicht)	239
3.1.1	Allgemeines	239
3.1.2	Methode der progressiven Fehlerreduzierung	241
3.2	Korrektur in der vertikalen Meßebe	245
3.2.1	Rechnerische Ermittlung der Korrektur-Unterlegblechdicke	245
3.2.1.1	Für die Meßmethode 1 nach Abschnitt C.II.-2.1	245
3.2.1.2	Für die Meßmethoden 2 und 3 nach Abschnitt C.II.-2.2 und C.II.-2.3	247
3.2.2	Allgemeines	247
3.3	Graphische Auswertung der Messung und Ermittlung von Korrekturwerten	248
<b>C.III.</b>	<b>Versatzmessung an nur zwei Stirnflächen</b> (Doppel-Axial-Verfahren bzw. DA-Methode)	255
1.	Meßwertermittlung und -auswertung	255
2.	Korrektur des Ausrichtzustandes	261
2.1	Rechnerisches Verfahren	261
2.1.1	Soll-Ausrichtzustand ohne gegebene Soll Versatzwerte	261
2.1.1.1	Methode 1 (für große Versatzwerte $b_1$ und $b_2$ )	262
2.1.1.2	Methode 2 (für kleine Versatzwerte $b_1$ und $b_2$ )	264
2.1.2	Soll-Ausrichtzustand mit gegebenen Soll-Versatzwerten	265
2.2	Graphisches Verfahren	269
2.2.1	Methode 1	270
2.2.2	Methode 2	276
2.2.3	Methode 3	280
<b>C.IV.</b>	<b>Versatzmessung an Kupplungszwischenstücken mit zwei in radialer Richtung messenden Meßuhren</b> (Doppel-Radial-Verfahren bzw. DR-Methode)	284
1.	Einführung	284
2.	Meßwertermittlung	285
3.	Auswertung der Meßwerte und Korrektur des Ausrichtzustandes (Ausrichttoleranzen)	288
3.1	Rechnerisches Verfahren	288
3.1.1	Soll-Ausrichtzustand ohne gegebene Soll-Versatzwerte	288
3.1.2	Soll-Ausrichtzustand mit gegebenen Soll-Versatzwerten	289

3.2	Graphisches Verfahren	293
3.2.1	Methode 1	294
3.2.2	Methode 2	297
<b>C.V.</b>	<b>Messung des Versatzes mittels Meßuhr (radial) und Längenmeßwerkzeug (Winkelversatz)</b>	<b>302</b>
1.	Meßwertermittlung und Auswertung	302
2.	Korrektur des Ausrichtzustandes	306
<b>Abschnitt D: Besondere Meß- und Korrekturverfahren</b>		<b>309</b>
<b>D.I.</b>	<b>Versatzkorrektur in der horizontalen Ebene bei nicht in Höhe der Drehachse aufliegenden Gehäusen</b>	<b>309</b>
<b>D.II.</b>	<b>Ausrichten von Maschinen mit V-förmiger Unterstützung (Auflage)</b>	<b>310</b>
<b>D.III.</b>	<b>Ausrichten von Maschinen mit sehr langen, nicht starren (biegsamen) Zwischenwellen</b>	<b>323</b>
<b>D.IV.</b>	<b>Maschinen mit mehr als vier Auflageflächen (Befestigungspunkten)</b>	<b>328</b>
<b>Abschnitt E: Ausrichtzustandskorrekturen von mehrgewölbigen Maschinensträngen (graphisch gelöst)</b>		<b>331</b>
<b>E.I.</b>	<b>Einführung</b>	<b>331</b>
<b>E.II.</b>	<b>Beispiele</b>	<b>336</b>
1.	Beispiel 1: Maschinensatz mit Bezugsmaschine innerhalb des Stranges. Korrekturwertermittlung zwischen Ist- und gegebener Soll-Drehachsenlage	336
2.	Beispiel 2: Maschinensatz mit gegebener Bezugsmaschine. Korrekturwertermittlung zwischen Ist- und Sollzustand aufgrund von vorgegebenen Verlagerungswerten	338
2.1	Arbeitsgänge für die Lösungsmöglichkeit A	339
2.2	Arbeitsgänge für die Lösungsmöglichkeit B	341

3. Beispiel 3: Maschinensatz ohne gegebene Bezugsmaschine. Korrekturwertermittlung für geringstmögliche Gehäuseverschiebungen . . . . .	342
4. Beispiel 4: Maschinensatz ohne gegebene Bezugsmaschine. Korrekturwertermittlung für die wegen allgemeiner Bewegungseinschränkungen erforderliche beste Bezugsdrehachse . . . . .	345
5. Beispiel 5: Maschinensatz mit gegebener Bezugsmaschine. Korrekturwertermittlung für relativ zueinander gegebene Sollverlagerungen . . . . .	347
6. Anmerkung zu den Beispielen, Ausrichtzustandsänderung in der horizontalen Ebene . . . . .	350

**Abschnitt F: Drehachsenversatz und -korrektur, genau betrachtet (Grundlagen für Programme elektronischer Rechner) . . . . . 351**

**F.I. Einführung . . . . . 351**

**F.II. Bezug der Meßwerte auf das Rechenverfahren . . . . . 353**

1. Axial-Radial-Verfahren . . . . .	353
1.1 Winkellage der auszurichtenden zur fest stehenbleibenden Drehachse . . . . .	353
1.2 Radialversatz . . . . .	354
2. Doppel-Radial-Verfahren . . . . .	355
2.1 Meßart nach Bild C,36, C,40, C,42, C,43 und C,49 . . . . .	355
2.1.1 Winkellage der auszurichtenden zur fest stehenbleibenden Drehachse . . . . .	355
2.1.2 Radialversatz . . . . .	356
2.2 Meßart nach Bild C.46 und C.50 . . . . .	357
2.2.1 Winkellage der auszurichtenden Drehachse 1 zur fest stehenbleibenden Drehachse 2 . . . . .	357
2.2.2 Radialversatz . . . . .	358

**F.III. Korrektur eines Ist-Drehachsenversatzes, bezogen auf einen Soll-Drehachsenversatz in der vertikalen Bezugsebene . . . . . 358**

**F.IV. Korrektur eines Ist-Drehachsenversatzes, bezogen auf einen Soll-Drehachsenversatz in der horizontalen Bezugsebene . . . . . 365**

<b>Abschnitt G: Elektronische, optische und andere spezielle Meßverfahren</b> . . . . .	<b>373</b>
<b>G.I. Eigenschaften</b> . . . . .	<b>373</b>
<b>G.II. Verfahren zur direkten Bestimmung des Drehachsenversatzes</b> . . . . .	<b>375</b>
1. Elektronisches Ausrichtkontrollsystem CTC . . . . .	375
1.1 System CTC-master . . . . .	378
1.2 System CTC-data . . . . .	382
2. Optalign-System . . . . .	385
2.1 Optalign-Wellen-Ausrichtsystem . . . . .	385
2.2 Optalign-Long-Range-System . . . . .	402
2.3 Turbalign-System . . . . .	403
3. Indikon-System . . . . .	406
3.1 Allgemeines . . . . .	406
3.2 Indikon-Hot-Alignment-System (Indikon-Warm-Ausrichtsystem) . . . . .	413
3.3 Indikon-Top-Hat-System . . . . .	426
3.4 Sich selbständig korrigierendes Warm-Ausrichtsystem . . . . .	429
4. Lineax-Wellen-Ausrichtsystem . . . . .	432
<b>G.II. Verfahren zur indirekten Bestimmung des Drehachsenversatzes</b> . . . . .	<b>442</b>
1. Allgemeines . . . . .	442
2. Acculign-System . . . . .	443
3. Dyn-Align-System bzw. Dodd-Bar-Methode . . . . .	452
4. Permalign-System . . . . .	466
5. Ausrichtzustandsmessung mittels optischer (geodätischer) Meßgeräte . . . . .	480
5.1 Allgemeines . . . . .	480
5.2 Meßprinzip . . . . .	488
5.3 Meßgeräte . . . . .	492
5.3.1 Fluchtfernrohre . . . . .	492
5.3.2 Präzisionsnivellier mit Kippschraube (Paragon Tilting Level) . . . . .	504
5.3.3 Universal-Fluchtungs- und Ausrichtinstrument (Paragon Jig Transit) . . . . .	512

5.3.4	Fluchtungs-Maßstäbe (Wyteface Optische Maßstäbe) . . . . .	520
5.3.5	Instrumentenständer . . . . .	522
5.3.6	Laser-Präzisionsfluchteinrichtung . . . . .	523
6.	Ausrichtzustandsmessung mittels elektronischer Abstandsmeßsonden . .	529

## **Abschnitt H: Ausrichten von Turbomaschine mit vertikaler Welle**

<b>H.I.</b>	<b>Einführung . . . . .</b>	<b>535</b>
<b>H.II.</b>	<b>Messung des Drehachsenversatzes mit Hilfe des AR-Verfahrens . . . . .</b>	<b>537</b>
1.	Messung und Korrektur eines Winkelversatzes . . . . .	537
2.	Messung und Korrektur eines Radialversatzes . . . . .	544
<b>H.III.</b>	<b>Messung des Drehachsenversatzes mit Hilfe des DR-Verfahrens . . . . .</b>	<b>544</b>
<b>H.IV.</b>	<b>Messung des Drehachsenversatzes mittels Fühlerlehren . . . . .</b>	<b>546</b>
1.	Winkelversatzmessung . . . . .	547
2.	Radialversatzmessung . . . . .	547

## **Abschnitt I: Warmausrichtzustand . . . . . 551**

<b>I.I.</b>	<b>Einführung . . . . .</b>	<b>551</b>
<b>I.II.</b>	<b>Korrektur von theoretischen Kalt-Ausrichtzustands- Sollwerten aufgrund von tatsächlichen Warm-Ausrichtzustands- Istwerten . . . . .</b>	<b>562</b>

## **Abschnitt J: Ausrichtanweisung (A) . . . . . 567**

<b>J.I.</b>	<b>Versatzwertangaben (Festlegungen) durch den Maschinenhersteller . . . . .</b>	<b>567</b>
-------------	--	------------

<b>J.II. Ermittlung der erforderlichen Kalt-Soll-Versatzwerte</b> . . . . .	572
1. Soll-Ausrichtzustand in der vertikalen Ebene (Seitenansicht) . . . . .	572
1.1 Höhenversatz . . . . .	572
1.2 Winkelversatz . . . . .	582
2. Verlagerung der Drehachsen in der horizontalen Ebene (Draufsicht) . . . . .	584
3. Berücksichtigung des axialen Versatzes . . . . .	586
4. Durchbiegung von Wellen . . . . .	592
4.1 Wertermittlung durch Messung . . . . .	592
4.2 Berücksichtigung der Wellendurchbiegung . . . . .	597
5. Versatzwertermittlung bei (Stirn-)Zahnradgetrieben . . . . .	601
6. Position des Wellenzapfen-Mittelpunktes in Radiallagern (Querlager, Traglager) . . . . .	630
6.1 Lagerung der Welle in radialen Gleitlagern . . . . .	630
6.1.1 Allemeines . . . . .	630
6.1.2 Kreiszylinderlager . . . . .	635
6.1.3 Mehrgleitflächenlager (MGF-Lager) . . . . .	644
6.2 Lagerung von Wellen in Wälzlagern . . . . .	669
6.2.1 Lagerspiele von Wälzlagerungen . . . . .	669
6.2.2 Auswirkung des Ausrichtzustandes auf die Wälzlagerung . . . . .	677
<b>J.III. Angabemöglichkeiten von Soll-Versatzwerten bzw. Soll- Versatz-Meßwerten</b> . . . . .	678
 <b>Abschnitt K: Ausrichtprotokoll</b> . . . . .	 685
 <b>Abschnitt L: Gehäuseführungen</b> . . . . .	 689
 <b>Abschnitt M: Langfristige Veränderung des Ausrichtzustandes</b> . . . . .	 699
 <b>Abschnitt N: Ausrichten von mit Kurbeltriebmaschinen gekuppelten Turbomaschinen</b> . . . . .	 705

---

<b>N.I.</b>	<b>Der Ausrichtzustand bzw. (die Lage) einer Kurbelwelle . . . . .</b>	<b>705</b>
<b>N.II.</b>	<b>Ausrichten von elektrischen Einlagermaschinen zu Kurbeltriebmaschinen . . . . .</b>	<b>729</b>
<b>N.III.</b>	<b>Ausrichten von Zweilager-Turbomaschinen zu Kurbeltriebmaschinen . . . . .</b>	<b>733</b>
<b>Abschnitt O: Ausrichten von Riementrieben . . . . .</b>		<b>735</b>
<b>Abschnitt P: Mechanische Schwingungen, verursacht durch unzulässig großen Drehachsenversatz . . . . .</b>		<b>747</b>
<b>Abschnitt Q: Wellenkupplungen . . . . .</b>		<b>771</b>
<b>Q.I.</b>	<b>Einführung . . . . .</b>	<b>771</b>
<b>Q.II.</b>	<b>Zahnkupplungen . . . . .</b>	<b>791</b>
1.	Konstruktive Ausführung . . . . .	791
2.	Schmierung . . . . .	795
3.	Zahngleitgeschwindigkeit . . . . .	798
4.	Zulässige Auslenkung . . . . .	801
<b>Q.III.</b>	<b>Membrankupplungen . . . . .</b>	<b>807</b>
1.	Konstruktive Ausführung . . . . .	807
2.	Zulässige Auslenkung . . . . .	814
<b>Q.IV.</b>	<b>Kupplungsauslenkung bei sich bewegenden Maschinenfunda- menten . . . . .</b>	<b>824</b>
<b>Q.V.</b>	<b>Durch Achsversatz und Kupplungstyp verursachte Kräfte und Momente (Lagerbelastungen) . . . . .</b>	<b>830</b>
1.	Zahnkupplungen . . . . .	830
2.	Membrankupplungen . . . . .	845
3.	Beispiel zu den Abschnitten Q.V.1 und Q.V.2 . . . . .	848

Verzeichnis der Zahlenwert-Beispiele . . . . .	857
<b>Anhang I: Mathematik</b> . . . . .	<b>861</b>
1. Einführung . . . . .	861
2. Griechisches Alphabet . . . . .	861
3. Mathematische Zeichen und Symbole . . . . .	862
4. Vorzeichenregeln für das Rechnen mit ganzen (bzw positiven und negativen) Zahlen . . . . .	863
4.1 Vorzeichenregeln für das Addieren und Subtrahieren . . . . .	863
4.2 Vorzeichenregeln für das Multiplizieren und Dividieren . . . . .	863
5. Winkleinheiten . . . . .	864
5.1 Grad ( $^{\circ}$ ) . . . . .	864
5.2 Bogenmaß . . . . .	864
5.3 Radiant (Abk.: rad) . . . . .	865
6. Winkelfunktionen und trigonometrische Formeln . . . . .	866
6.1 Definition der trigonometrischen Funktionen (auch Winkel- oder Kreisfunktionen genannt) . . . . .	866
6.2 Quadrantenrelation . . . . .	867
6.3 Näherungsformeln für kleine Winkel . . . . .	867
6.4 Zusammenhang zwischen den trigonometrischen Termen desselben Winkels . . . . .	868
6.5 Ersatz eines Terms durch einen anderen desselben Winkels . . . . .	868
6.6 Additionstheoreme . . . . .	868
6.7 Winkelfunktionen für ein beliebig winkliges (schiefwinkliges) Dreieck . . . . .	868
6.8 Berechnung des Winkels einer trigonometrischen Funktion mittels Umkehrfunktion . . . . .	869
7. Die (Kreis-)Evolventenfunktion "inv $\alpha$ " . . . . .	870
8. Komplexe Zahlen . . . . .	874
<b>Anhang II: Ausrichthinweise</b> . . . . .	<b>879</b>

---

<b>Anhang III: Durchbiegung von Wellen – kritische Drehzahl</b> .....	885
<b>Anhang IV: Kraftschlüssige Kupplungs- Schraubenverbindung</b> .....	897
<b>Anhang V: Mechanische Schwingungen</b> .....	915
<b>Anhang VI: Verschiedenes</b> .....	945
1. Axiale (Haupt-)Trägheitsmomente einfacher Querschnitte .....	945
2. Ausrichttoleranz in Abhängigkeit des Toleranzfaktors und des Meßabstandes .....	951
3. Meßfehler durch Bezugsebenenverschiebung .....	952
4. Längenänderung durch Temperaturänderung .....	953
<b>Schlußbemerkung</b> .....	955
<b>Literatur</b> .....	957