



Dieter Franke

# Ausricht- und Kupplungsfehler an Maschinensätzen

Erfassung, Diagnose und Auswirkungen  
von Fehlausrichtungen in Wellensträngen

---

# Ausricht- und Kupplungsfehler an Maschinensätzen

---

Dieter Franke

# Ausricht- und Kupplungsfehler an Maschinensätzen

Erfassung, Diagnose und Auswirkungen  
von Fehlausrichtungen in Wellensträngen

Dipl.-Ing. Dieter Franke  
Vibration Plus UG (haftungsbeschränkt)  
Dresden, Deutschland

ISBN 978-3-662-61026-8      ISBN 978-3-662-61027-5 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61027-5>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

# Vorwort

Beim Ausrichten von Maschinen an einfachen Maschinensätzen gibt es einen breiten Anwenderkreis, der mit Messmitteln oder Messsystemen diese geometrisch nur scheinbar einfache mechanische Aufgabe im Arbeitsalltag löst. Nicht ausreichend entwickelt ist häufig der fachliche Hintergrund der Techniker, Meister und Ingenieure, vor allem zu den Auswirkungen und zur Schwingungsdiagnose von Fehlauseinandersetzungen im Betrieb. Auch die Wirkungsmechanismen von Ausrichtfehlern im Maschinensatz sollten hier vertieft vermittelt werden.

Vom physikalischen Hintergrund bis zur praktischen Anwendung werden hier Grundlagen und Erfahrungen vor allem grafisch verständlich dargestellt und mit praktischen Beispielen illustriert. Um eine Ausrichtmessung zuverlässig ausführen, begleiten oder vermitteln zu können, wird hier ein Überblick über die praktischen Methoden vermittelt. In der neu überarbeiteten VDI 2627 wurden diese Inhalte an Getrieben bereits ansatzweise beschrieben.

Besonderen Wert legt der Band auf die Überprüfbarkeit und Nachvollziehbarkeit der hier beschriebenen Zusammenhänge rund um die Ausrichtung im Wellenstrang. Mit den hier genannten Modellmaschinen und den Fallbeispielen sind diese Wirkungsmechanismen relativ einfach in der Praxis nachvollziehbar.

Hier setzt auch die Buchreihe „Maschinendiagnose“ an. Vom physikalischen Hintergrund bis zur praktischen Anwendung werden Grundlagen und Erfahrungen leicht verständlich dargestellt und mit praktischen Beispielen illustriert.

Die vertiefte, umfassende Diagnose von Bauteilschäden von der „Initial- bis zur Wurzelursache“ über die Behandlung praktischer Fehlerquellen an Maschinen sowie bis zu deren Abhilfe und echten Vorbeugung werden in dieser Buchreihe behandelt.

Dresden, Deutschland

Dieter Franke

---

## Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei allen Fachkollegen und Kunden bedanken, die mich beim Schreiben dieses Buches vielfältig und langjährig unterstützt haben.

Besonderen Dank möchte ich den Fachkollegen der Prüftechnik Dieter Busch GmbH aussprechen, die mit Ihrem Bildmaterial und vielfältigen Anregungen und Hinweisen das Buch erst in dieser Form ermöglicht haben. Namentlich möchte ich meinem langjährigen Kollegen Ole Holstein danken, mit dessen Hinweisen u. a. die Anwendersicht in diesem Spezialgebiet der Messtechnik im Maschinenbau hier besser zu Geltung kommen konnte. Wie auch in den gemeinsam intensiv diskutierten Hinweisen zur Endfassung der VDI 2726 entstand in unserem Dialog final immer eine bessere Vermittlung der Inhalte.

Meinem Fachkollegen Dr. Burkhard Hensel danke ich für seine sorgfältigen und fachkundigen Anmerkungen und weiteren Unterstützungen.

Für Ihre fachkundigen Anmerkungen und das bereitgestellte Fakten-Material möchte ich auch meinen Fachkollegen Christian Schlumpf, Mathias Luft und Patrick Stang danken.

Dem plötzlich im Februar 2018 verstorbenen herausragenden Fachkollegen Dr. Manfred Weigel, der mich zu diesem Buch und der Buchreihe ermuntert hat, danke ich ausdrücklich. Auch seine unmittelbare Unterstützung bei einigen der Grafiken sei hier erwähnt.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung, Überblick und Literaturhinweise</b>	<b>1</b>
1.1	Ausrichtfehler in Maschinensätzen	1
1.1.1	Einführung und Historie	1
1.1.2	Ausrichtaufgaben	2
1.1.3	Historie und Literatur	4
1.2	Kupplungen in Maschinensätzen und potenzielle Kupplungsfehler	7
	Literatur	10
<b>2</b>	<b>Kupplungsbauformen, typische Eigenschaften und Torsion im Wellenstrang</b>	<b>11</b>
2.1	Kupplungsbauformen, typische Eigenschaften im Wellenstrang	11
2.2	Kupplungseinfluss auf die Torsionsschwingung im Wellenstrang	13
	Literatur	15
<b>3</b>	<b>Übersicht der Auswirkungen von Ausrichtfehlern und Kupplungsfehlern</b>	<b>17</b>
3.1	Auswirkungen in Maschinensätzen	17
3.2	Auswirkungen in der Kupplung	19
3.3	Zusammenfassung der Auswirkungen	22
<b>4</b>	<b>Ausrichtfehler im Wellenstrang – Geometrie und Definitionen</b>	<b>25</b>
4.1	Überlagerungen zur Geometrie der Fehlansrichtung	25
4.2	Definitionen und Geometrie in der Fluchtung im Wellenstrang	27
4.3	Mechanische Erfassung der Fehlansrichtung	31
4.4	Ausrichten der Antriebsmaschine	32
	Literatur	35
<b>5</b>	<b>Erfassung der Ausrichtfehler – Messverfahren</b>	<b>37</b>
5.1	Statischer Ausrichtzustand und dynamische Änderungen	37
5.2	Erfassung mittels Laserausrichtsystem	39
5.3	Praktische Durchführung und Messfehler	41
	Literatur	45

<b>6</b>	<b>Bewertung von Fehlansrichtungen und Ausrichten der Antriebsmaschine</b> .....	47
6.1	Toleranzwerte der Fehlansrichtung .....	47
6.2	Verhalten von Kardanwellen im Ausrichtzustand .....	52
	Literatur .....	52
<b>7</b>	<b>Maschinenfehler aus Fehlansrichtungen</b> .....	53
7.1	Änderung statischer Kräfte durch Fehlansrichtungen .....	53
7.2	Dynamische Kräfte und Anregungen aus Fehlansrichtungen .....	56
7.3	Einfaches Modell der Schwingungsanregungen aus Parallel- und Winkelversatz .....	58
7.4	Zusammenfassung der Schwingungsanregung aus Ausrichtfehlern .....	60
7.5	Auswirkungen der Ausrichtfehler in Maschinenfehlern .....	61
	Literatur .....	62
<b>8</b>	<b>Weitere Ausrichtaufgaben an Maschinensätzen</b> .....	63
8.1	Übersicht weiterer Ausrichtaufgaben .....	63
8.2	Ausrichtung der Lagergasse an Turbinen .....	64
8.3	Fluchtung von Riemenscheiben in Riemenantrieben .....	66
<b>9</b>	<b>Einflüsse, Vorgaben und Betriebsverhalten der Ausrichtung im Wellenstrang</b> .....	69
9.1	Übersicht der Einflüsse zur Wellenausrichtung im Betrieb .....	69
9.2	„Thermisches Wachstum“ an Turbinensätzen .....	71
9.3	Verlagerungen unter Last an Windenergieanlagen .....	72
	Literatur .....	75
<b>10</b>	<b>Schwingungsdiagnose von Ausrichtfehlern und Kupplungsfehlern</b> .....	77
10.1	Schwingstärke Kennwerte zur Zuordnung von Fehlansrichtungen .....	77
10.2	Schwingungsdiagnose von verschlechterten Ausrichtzuständen .....	80
10.3	Praktische Schwingungsdiagnose von Ausrichtzuständen und Ausrichttraining .....	86
	Literatur .....	89
<b>11</b>	<b>Fallbeispiele der Fehlansrichtung</b> .....	91
11.1	Diesel-Generator-Aggregat mit drehelastischer biegestarrer Kupplung .....	91
11.2	Prüfung Wellenausrichtungen auf Windenergieanlage (WEA) .....	94
11.3	Fehlansrichtung und Wälzlagerschäden an Umluftgebläse .....	98
11.4	Axiale falsche Ausrichtung im Motor an Absaugventilator .....	104
11.5	Radiale Wellenausrichtung an vertikaler Pumpe .....	111
	Literatur .....	114



---

<b>12 Zusammenfassung</b> .....	115
12.1 Ausrichtmethodik an Maschinensätzen .....	115
12.2 Anwendung der Wellen-Ausrichtung .....	116
12.2.1 Sichere Handhabung von Ausrichtzuständen .....	116
12.2.2 Erfassung und Auswertung von Fehlausrichtungen und Kupplungsfehlern .....	116
12.2.3 Auswirkungen von Fehlausrichtungen .....	117
12.3 Zusammenfassung des Ausrichtvorgangs .....	119
<b>Glossar</b> .....	123
<b>Bildnachweis</b> .....	127



# Einführung, Überblick und Literaturhinweise

1

## 1.1 Ausrichtfehler in Maschinensätzen

### 1.1.1 Einführung und Historie

In dem Band 2 [1] der vorliegenden Schwingungs- und Auswuchtseminare für die Kraftwerksindustrie wurden im Kap. 10 die Grundlagen der Geometrieeigenschaften und der Schwingungsanregung dieser beiden Maschinenfehler mit den grundlegenden technischen Zusammenhängen behandelt. Auch in der Reihe der VDI 3839 [2] werden im Blatt 2 die Auswirkungen der maschinendynamischen Anregungen bei diesen Maschinenfehlern erläutert und an einfachen Beispielen veranschaulicht. In den folgenden Abschnitten werden daraus einzelne Elemente wiederholt, wenn diese für das Verständnis der Zusammenhänge unerlässlich sind.

In diesem Band der Buchreihe zur Maschinendiagnose sollen **praktische Anwendungen** rund um die Maschinenfehler Fehltausrichtung in Wellensträngen und Kupplungsfehler im Mittelpunkt stehen. Es sollen in erster Linie **deren Erfassung, Erkennung, Auswirkungen und deren Beurteilung** an Maschinensätzen möglichst umfassend und detailliert dargestellt werden.

Die hier verwendeten **Begriffe** sind weitestgehend technischer Standard und werden in Kap. 4 erläutert bzw. werden in VDI 2627 nach [2] genauer definiert. Einige wenige davon werden im Glossar in Anhang 1 erläutert, wenn das zum gesamten Verständnis unerlässlich ist.

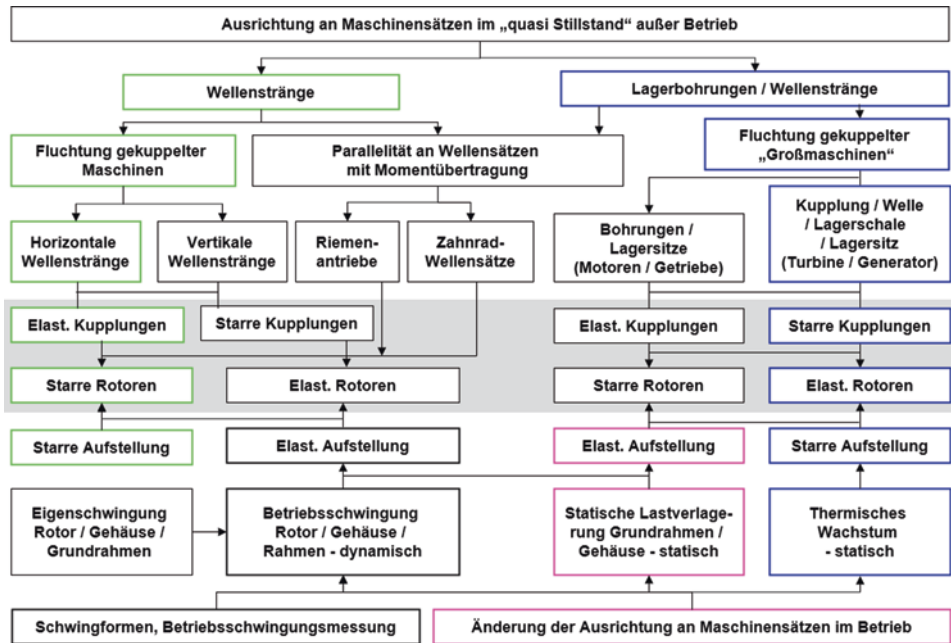
Die Fehltausrichtung von Wellensträngen in Maschinensätzen wird in vielen Statistiken als der **zweithäufigste Maschinenfehler** nach der Rotorunwucht genannt. Sie sollte für den Maschinenbetrieb analog einer bekannten Restunwucht bis zu einer für die konkrete Anwendung zulässigen Rest-Fehltausrichtung im Maschinensatz reduziert werden. Sie ist i. d. R. als ein Rest-Maschinenfehler an gekuppelten Maschinen immer vorhanden. Die Maschinenausrichtung sollte in der Regel **vor und nach jeder Instandhaltungsmaßnahme** an

einem gekuppelten Maschinensatz zumindest überprüft werden, wenn die Ausrichtung zur Arbeitsmaschine geändert wird. Werden die zulässigen Toleranzen der Fehlausrichtung relevant überschritten, sind in der Regel Schäden an den dadurch höher beanspruchten Maschinenkomponenten die häufige mittel- oder langfristige Folge. Die ingenieurtechnische Beherrschung der Wellenausrichtung im Maschinen- und Anlagenbau und Betrieb ist heute zu einem wesentlichen Qualitätsparameter der Anlagenerrichtung und der Instandhaltung geworden. Über eine **flächendeckende Durchführung der Ausrichtung** aller gekuppelten Antriebsmaschinen **über deren Betriebsdauer** in einem Maschinenpark kann dies heute relativ sicher beherrscht werden. Die in den letzten Jahrzehnten deutlich gestiegenen Anforderungen an einen Betrieb mit maximaler Verfügbarkeit und an die Senkung der Betriebs- und Instandhaltungskosten erfordern heute wirtschaftliche und zuverlässige Ausrichtungsmethoden. Das Maschinendesign wird zunehmend bestimmt von erhöhtem Stoff- und Energiedurchsatz verbunden mit höheren und mit geregelten Drehzahlen. Dazu kommen ein optimierter Materialeinsatz und somit reduzierte Belastungsreserven im Design. Damit sind heute insgesamt die Anforderungen an den Ausrichtzustand angestiegen.

### 1.1.2 Ausrichtaufgaben

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen **Ausrichtaufgaben** in und an Maschinensätzen und verschiedene Betrachtungswinkel, um an dieses Maschinenproblem heranzugehen, die in Abb. 1.1 in einer Übersicht dargestellt werden. In den folgenden Abschnitten wird auf die wesentlichsten Aspekte im Detail eingegangen.

- Hauptanwendung ist die „äußere“ *Wellenausrichtung* von zwei und mehr Maschinen in Maschinensätzen mit gekuppelten Wellensträngen. (Kap. 4 u. ff.)
- In separaten oder integrierten Zahnradgetrieben spielt die genaue „innere“ *Wellenausrichtung* eine Schlüsselrolle für deren einwandfreie Funktion, neben der äußeren Wellenausrichtung zum Getriebe von Antriebs- und Arbeitsmaschine.
- Die *Fluchtung von Lagersitzbohrungen* in Getriebegehäusen und generell in allen Maschinengehäusen ist Voraussetzung einer korrekten Lagerfunktion, des optimalen Rotorlaufs und eines sollgemäßen Zahneingriffs.
- Besondere Bedeutung hat die *Fluchtung der Bohrungshälften* der Sitze der Lagerschalen bei langen schweren Rotoren in der Lagergasse an Turbinen, wie auch bei allen anderen Gleitlagerungen für deren störungsfreie Funktion. Besonders ist hier der massebedingte Durchhang der Wellenstrangabschnitte zu beachten. (Abschn. 8.2)
- Im Betrieb von Turbinen und großen Maschinensätzen spielt die Änderung der Ausrichtung durch das sogenannte *thermische Wachstum* der Maschinengehäuse und Rotoren eine größere Rolle und wird mit temporär installierten Ausrichtmesssystemen über viele Stunden erfasst. (Abschn. 9.2)
- Die *Schwingstärke- und Körperschallanregungen* durch Fehlausrichtungen werden in der Schwingungsdiagnose als zweithäufigster Maschinen- und häufiger Wälzlagerfehler behandelt. (Kap. 10)



**Abb. 1.1** Übersicht Ausrichtfehler und Wellenausrichten an Maschinensätzen. *Starre Rotoren*: Drehzahlbereich des Rotors außerhalb von Rotor-Eigenfrequenzen. *Starre Aufstellung*: Maschine auf Rahmen und Betonfundament aufgestellt ohne elastische Schwingungsdämpfer

- An Klima- und Prozessventilatoren oder an Verdichtern sind oft Riemenantriebe im Einsatz, bei denen die *Fluchtung der Riemenscheiben* zueinander für deren verschleißarmen Lauf gesichert sein muss (Abschn. 8.3).
- Die „Fehlausrichtung“ in *vertikalen Wellensträngen* weist spezielle Eigenheiten auf, auf die in Kap. 5 und in Abschn. 11.5 eingegangen wird.
- In der relativ jungen Branche der Windkraftanlagen ist die Ausrichtung der Generatoren, Getriebe und Hauptlager *auf großen relativ elastischen und sich stärker quasi-statisch verformenden Maschinenträgern* auf den drehzahl- und lastvariablen Anlagen eine größere Herausforderung (vgl. Abschn. 9.3 und 11.2).
- Dort spielen u. a. auch die *dynamisch kurzzeitig auftretenden Ausrichtänderungen* durch Anlagenbewegungen unter Windböen und die Verlagerungen unter Last eine größere Rolle, da diese die „statischen“ Ausrichttoleranzen deutlich übersteigen.
- Ebenso spielen dort die *Eigenschwingungen der Maschinenträger* (wie die der elastisch gelagerten Schwingrahmen an anderen Maschinensätzen) in elastischer/gedämpfter Aufstellung und damit die der Maschinen- und Lagergehäuse als Ausrichtobjekte bei den dynamischen Ausrichtungsänderungen eine zu beachtende Rolle.

Für diese unterschiedlichen Anwendungen der Ausrichtung sind in den letzten Jahren eine Vielzahl von maßgeschneiderten **Ausrichtapplikationen** bei den Herstellern von

Laser-Ausrichtgeräten entstanden. Im Abb. 1.1 werden die Haupteinflüsse auf die Ausrichtung in Maschinensätzen in einer Übersicht dargestellt. Als wesentliche Einflussgröße muss dabei die Steifigkeit der Wellen und Kupplungen und der des Rahmens und dessen Aufstellung betrachtet werden, da diese die Auswirkungen und die Größe der Fehlausrichtung beeinflussen und damit die Anforderungen an die zulässige Ausrichttoleranz mitbestimmen. Neben der Standardaufgabe der Fluchtungsmessung in gekoppelten Wellensträngen und der „äußeren“ Ausrichtung der Maschinengehäuse sind die „innere“ Ausrichtung der Fluchtung von Lagerbohrungen und Lagerschalen in Kraftwerken wichtige zu beherrschende Ausrichtanwendungen. Eine Sonderanwendung ist die Fluchtung an parallelen Wellen wie in Riemenantrieben oder an Zahnradstufen. Für alle drei Aufgaben finden jeweils spezielle Ausrichtsysteme und dazugehörige Spannvorrichtungen Anwendung.

Die häufigste Anwendung in Maschinensätzen ist die Fluchtungsmessung an biegeelastisch gekoppelten wälzgelagerten Maschinen mit „starr“ 1) Rotoren in „starrer“ 2) und „elastischer“ Aufstellung, auf die hier im Wesentlichen eingegangen wird (grüne Rahmen). Eine spezielle anspruchsvolle Ausrichtaufgabe stellt die Ausrichtung von Lagerschalen und Leitschaukelapparaten in Turbinen mit elastischen langen Wellen und den meist starr gekoppelten Generatoren auf schweren elastischer aufgestellten Stahl-Beton-Rahmen (blaue Rahmen).

Die Messung der Ausrichtung erfolgt im „**Quasi-Stillstand**“ **der Maschine**, was gleichzeitig den Bezugzustand der Ausrichtung darstellt. Die Änderungen der Ausrichtung im Betrieb sind bei zwei Ausrichtfällen entscheidend für den Erfolg und müssen in die Ausrichtung im Stillstand als so genannte Vorgaben eingerechnet werden, so dass diese Änderungen im Betrieb später kompensiert werden. Bei stärker elastisch aufgestellten großen Maschinensträngen wie auf Windturbinen müssen die „Verlagerungen“ unter dem Lastmoment eingerechnet werden (violette Rahmen). Bei den Dampf- und Gasturbinen ist die Verlagerung durch thermisches Wachstum der Maschinengehäuse vorher zu ermitteln und dann einzurechnen (blaue Rahmen), insbesondere da die Ausrichtanforderungen durch die hohe Drehzahl und die meist „starre“ Kupplung besonders hoch sind. Treten dominierende sehr tieffrequente Eigenschwingungen an elastischen Maschinenrahmen auf, wie am Maschinenträger von Windenergieanlagen (WEA), beeinflussen diese dynamisch einwirkend zusätzlich die Fluchtung des Triebstranges (fette schwarze Rahmen).

### 1.1.3 Historie und Literatur

Bis zu der Mitte der achtziger Jahre des vergangenen Jahrhunderts wurde die Ausrichtung von Maschinen zueinander im Maschinensatz fast ausschließlich mit mechanischen Hilfsmitteln an der Kupplung durchgeführt. Dazu gehören das Haarlineal (Abb. 1.2) und umlaufende Messuhren (Abb. 1.3) oder die Fühllehre an der Kupplungsgeometrie. Diese haben den Vorteil der preiswerten, einfachen und relativ schnellen Anwendung, aber auch einige wesentliche Nachteile.