

# **Handbuch für Techniker und Ingenieure**

Die Autoren der PRÜFTECHNIK Alignment Systems GmbH haben diese Publikation mit großer Sorgfalt erstellt. Sie ist weder eine vollständige Anleitung zum Ausrichten noch Ersatz für professionellen Rat oder Rückfragen bei den Maschinenherstellern. PRÜFTECHNIK AG und ihre Tochtergesellschaften übernehmen keine Verantwortung für Handlungen, die auf Informationen aus diesem Handbuch basieren. PRÜFTECHNIK AG und/oder ihre Tochtergesellschaften übernehmen keinerlei direkte oder indirekte Haftung für Schadensansprüche Dritter, die als Folge des Gebrauchs oder der Anwendung von Informationen aus diesem Handbuch entstehen könnten.

Ausgabe 1 ; 10/2005

©Copyright 2005    PRÜFTECHNIK  
Alignment Systems GmbH

Alle Rechte vorbehalten

Laseroptisches Ausrichten ist ein wesentlicher Bestandteil einer praxisgerechten Instandhaltungs-Strategie für rotierende Maschinen. Ein guter Ausrichtzustand trägt ganz erheblich zur Reduzierung von unerwarteten Maschinenausfällen bei. Eine proaktive Instandhaltungs-Strategie hilft nicht nur bei der Früherkennung aufkommender Probleme, sondern verlängert auch beträchtlich die Nutzungsdauer der Maschinen.

In diesem Handbuch beschreiben wir einige Methoden, die derzeit zur Messung der erforderlichen Parameter Verwendung finden. Wir erheben allerdings nicht Anspruch auf Vollständigkeit. Für alle, die weiterführende Informationen über die hier behandelten Themen wünschen, haben wir am Ende dieses Handbuches ein Quellenverzeichnis mit einer Auswahl verfügbarer Literatur zusammengestellt.

PRÜFTECHNIK ist Experte im Ausrichten von rotierenden Maschinen. In den 30 Jahren unseres Firmenbestehens haben wir auch profunde praktische Kenntnisse auf diesem Gebiet erworben und bereits viele Handbücher über spezielle Themen und Systeme herausgegeben. Das vorliegende Handbuch bündelt dieses umfangreiche Wissen und bietet zudem einen kurzen Überblick über die neuesten Systeme von PRÜFTECHNIK, die speziell für die jeweils beschriebenen Anwendungen konzipiert wurden.

Wir hoffen, diese Informationen sind verständlich und leicht lesbar und bieten dem Anwender eine Grundlage, sein Wissen erfolgreich im Sinne einer nutzbringenden Instandhaltung seiner Anlage in die Praxis umzusetzen.

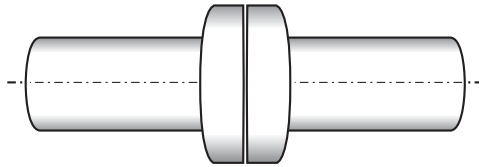
## **Inhaltsverzeichnis**

Einleitung .....	2
Inhalt .....	3
Was ist Wellenausrichten? .....	4
Angabe des Ausrichtzustandes .....	7
Wie exakt soll die Ausrichtung sein? .....	14
Fehlersuche .....	16
Gründe für Maschinenausfall .....	19
Ausrichtmethoden und Durchführung .....	23
Ausrichtmethoden – Mit dem Auge .....	29
Ausrichtmethoden – Messuhren .....	31
Wellenausrichtung mit dem Laser .....	43
Wellenausrichtung mit Lasertechnik – Fallbeispiel .....	51
Thermische Ausdehnung .....	58
Laserausrichtsystem smartALIGN® .....	61
Über PRÜFTECHNIK .....	65
Glossar der PRÜFTECHNIK Produkte .....	66
PRÜFTECHNIK Produkte und Dienstleistungen .....	68
Index .....	84
Notizen .....	86

## Was ist Wellenausrichten?

### Eine Definition

Beim Wellenausrichten werden zwei oder mehrere Maschinen (in der Regel ein Motor und eine Pumpe) so positioniert, dass am Punkt der Kraftübertragung von einer Welle zur anderen die Drehachsen beider Wellen unter normalen Betriebsbedingungen fluchten.



Allerdings - keine Regel ohne Ausnahme. Einige Kupplungstypen, z. B. Getriebekupplungen oder Kardanwellen erfordern eine definierte Fehlausrichtung, um die einwandfreie Schmierung während des Betriebes zu gewährleisten. Wichtige Punkte der vorhergehenden Definition sind:

### Am Punkt der Kraftübertragung...

Alle Wellen haben aufgrund ihres Eigengewichts eines gemeinsam: sie sind nicht absolut gerade. Folglich kann die Ausrichtung der beiden Wellen nur an dem Punkt verglichen werden, an dem die Kraft von einer Welle zur anderen übertragen wird.

### Die Drehachsen...

Man darf „Wellenausrichtung“ nicht mit „Kupplungsausrichtung“ verwechseln. Das Kupplungsgehäuse sollte nicht benutzt werden, um den Ausrichtzustand zu messen, da es nicht gleichzusetzen ist mit der Drehachse der Welle. Um Herstellkosten zu senken, sind Kupplungsgehäuse oft nur grob und in manchen Fällen überhaupt nicht bearbeitet.

### Die Passgenauigkeit der Kupplung auf der Welle ist unbekannt

Durch Drehen von nur einer Welle und den Einsatz von Messuhren zur Messung des gegenüberliegenden Kupplungsgehäuses kann die Drehachse beider Wellen nicht bestimmt werden.

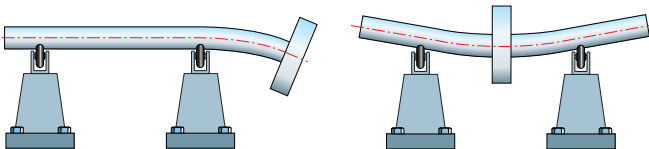
### Unter normalen Betriebsbedingungen

Die Ausrichtbedingungen können sich verändern, wenn die Maschine in Betrieb geht. Das kann eine Reihe von Gründen haben, einschließlich thermischen Wachstums, Verformung durch angeschlossene Rohre und Leitungen, Fundamentbewegung und Lagerspiel. Da die Wellenausrichtung üblicherweise an kalten Maschinen gemessen wird, ist der festgestellte Ausrichtzustand nicht unbedingt das Ausrichtziel, da eventuell thermisches Wachstum zu berücksichtigen ist. (siehe 58 - 60).

Der Ausrichtzustand sollte gemessen werden, während man die Welle in Betriebsrichtung dreht. Die meisten Pumpen, Ventilatoren, Motoren, usw., haben einen Pfeil am Gehäuseende, der die Drehrichtung anzeigt.

### Maschinendurchhang

Der Grad des Durchhangs einer Maschinenwelle hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie beispielsweise der Steifigkeit der Welle, dem Gewicht der Welle zwischen den Lagerböcken, der Bauart der Lager und dem Abstand zwischen den Lagerböcken.



Der natürliche Durchhang von Wellen aufgrund ihres eigenen Gewichts.

Für die Mehrzahl kurzgekoppelter rotierender Maschinen ist der Durchhang unbedeutend und kann daher in der Praxis vernachlässigt werden. Bei langen Maschinenzügen, wie z. B. Turbine-Generator-Einheiten in Kraftwerken oder bei Maschinen mit langen Zwischenwellen wie bei Kühlturmgebläsen und Gasturbinen, muss die Biegelinie mit berücksichtigt werden.

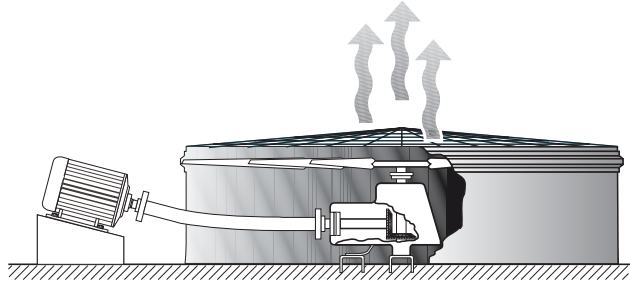


Maschinendurchhang

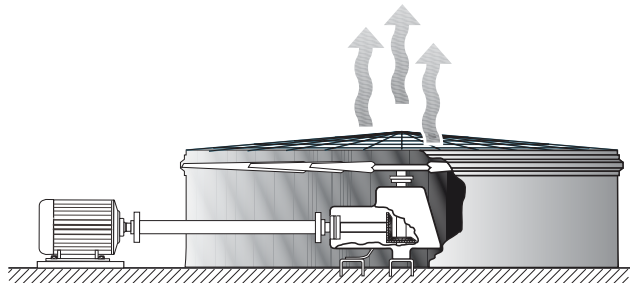
In einer Dampfturbine, zum Beispiel, sind die einzelnen Wellen meist besser als 1/100 mm zueinander ausgerichtet, der Mittelpunkt der mittleren Welle jedoch kann um bis zu 30 mm tiefer liegen als die beiden Endwellen.

### Betrieb oberhalb der kritischen Drehzahl

Wenn eine sehr lange biegsame Welle beginnt sich zu drehen, begradigt sich die Welle, allerdings wird sie nie zu einer perfekten geraden Linie. Wichtig zu wissen ist, dass die Drehachse einer Welle sogar im Betriebszustand gebogen sein kann. Sind zwei oder mehrere Aggregate gekoppelt und bilden eine gebogene Drehachse, ist es wichtig, dass beim Ausrichten der Wellen die gebogene Drehachse erhalten bleibt.



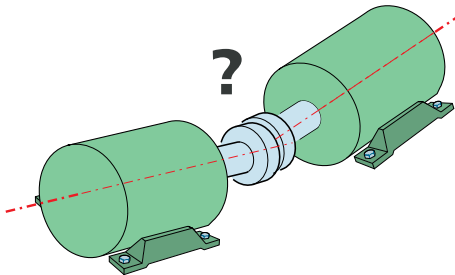
Betrieb von Antriebswellen unterhalb der kritischen Drehzahl:  
Maschinenkupplungen werden zu Zwischenkupplungen ausgerichtet



Betrieb von Antriebswellen oberhalb der kritischen Drehzahl:  
Maschinenkupplungen werden untereinander ausgerichtet ohne Bezug auf die Zwischenkupplung

### Ausrichtgrößen

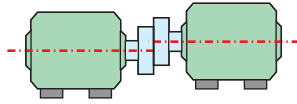
Da Wellenausrichtung gemessen und meist nachträglich korrigiert werden muss, ist eine Methode erforderlich, mit der der Ausrichtzustand quantifiziert und beschrieben werden kann.



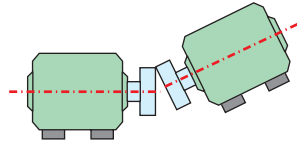
Traditionell wird die Ausrichtung durch Messwerte, die am Kupplungsgehäuse mithilfe von Messuhren aufgenommen werden, oder durch die Positionswerte der Maschinenfüße beschrieben. Die gemessenen Werte beider Methoden sind abhängig von der jeweiligen Maschinengröße. Bedingt durch verschiedene Befestigungsmethoden der Messuhr (zum Beispiel Doppelradial-Messuhrverfahren und Radial-Axial-Verfahren) kann ein Vergleich der Messwerte und die Anwendung von Toleranzen problematisch sein. Außerdem ist es wichtig zu beachten, dass Radial-Messwerte den doppelten Wert des tatsächlichen Versatzes und das entgegengesetzte Vorzeichen haben können, je nachdem welcher Messuhrentyp verwendet wird.

Eine modernere und verständlichere Methode zur Beschreibung des Ausrichtzustandes ist die Angabe von **Winkelversatz** und **Parallelversatz** in der Horizontalen (Draufsicht) und Vertikalen (Seitenansicht). Mit diesem Verfahren kann der Ausrichtzustand durch vier Werte angegeben werden, wie das folgende Diagramm zeigt.

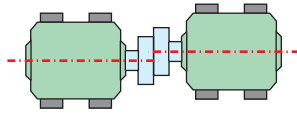
Versatz vertikal



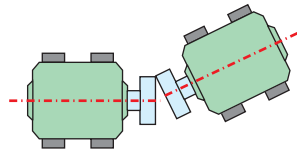
Klaffung vertikal



Versatz horizontal

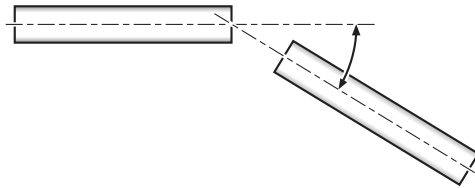


Klaffung horizontal



### Winkelversatz oder Klaffung und Parallelversatz

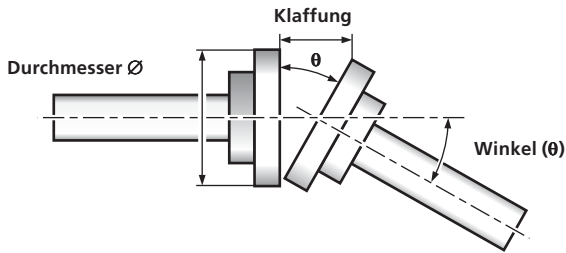
**Winkelversatz** gibt den Winkel zwischen zwei Drehachsen an.



Winkelversatz kann direkt als ein Winkel in Grad oder mrad angegeben werden, oder als Relativwert in mm/m. Letztere Methode ist besonders hilfreich, da Winkelversatz mal Kupplungsdurchmesser die entsprechende Klaffungsdifferenz am Kupplungsrand ergibt.

Somit wird der Winkel üblicherweise als Klaffung pro Durchmesser ausgedrückt. Die Klaffung an sich ist bedeutungslos. Sie muss erst durch den Durchmesser geteilt werden, um Bedeutung zu erhalten. Der Durchmesser wird korrekterweise als „Arbeitsdurchmesser“ bezeichnet, aber oft auch als Kupplungsdurchmesser. Der Arbeitsdurchmesser kann einen beliebig geeigneten Wert haben. Wesentlich ist das Verhältnis zwischen Klaffung und Durchmesser.

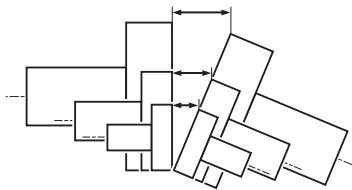




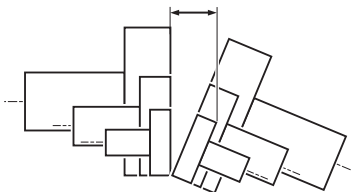
Verhältnis zwischen Winkel, Klaffung und Arbeitsdurchmesser

Eine Kupplung von 100 mm, die am oberen Rand 1 mm klafft, führt zu einem Winkel zwischen den Wellenachsen von 0,1 mrad.

Hinweis: 1 mrad = 1 mm pro Meter



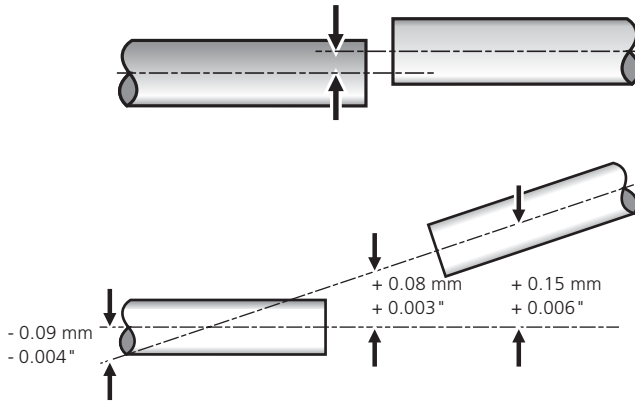
Bei gleichem Winkel – unterschiedliche Klaffungen



Bei gleicher Klaffung – unterschiedliche Winkel

**Parallelversatz** bezeichnet den Abstand der Schnittpunkte der Drehachsen mit einer bestimmten Ebene, senkrecht zu beiden Drehachsen. Die Drehachsen der Wellen sind aber selten parallel zu einander, und die Kupplungsoberflächen oder der Wellenrand haben eine unbekannte Beziehung zu den Wellenachsen. Genau genommen hat der Versatz mit ‚parallel‘ nichts zu tun.

Hier verwenden wir jedoch den Ausdruck Parallelversatz, um ihn vom Winkelversatz zu unterscheiden.



Wie in der Zeichnung oben verdeutlicht, hängt unter gleichen Ausrichtbedingungen der erhaltene Versatzwert davon ab, wo der Abstand zwischen zwei Wellenmittellinien gemessen wird. Sofern keine anderslautende Anweisung erfolgt, wird der Parallelversatz in mm oder tausendstel Zoll an der Kupplungsmitte gemessen. (Diese Definition bezieht sich auf kurze flexible Kupplungen, bei Zwischenkupplungen soll der Parallelversatz auf der Kraftübertragungsebene gemessen werden).

### Kurze flexible Kupplungen

Zum besseren Verständnis sprechen wir von kurzen flexiblen Kupplungen, wenn **die axiale Länge des flexiblen Elementes oder die axiale Länge zwischen den flexiblen Elementen gleichgroß oder kleiner als der Kupplungsdurchmesser ist.**

Maschinen mit kurzen flexiblen Kupplungen, die mit mittlerer bis hoher Drehzahl laufen, benötigen eine sehr genaue Ausrichtung, um übermäßig hohe Belastungen der Wellen, Lager und Dichtungen zu vermeiden. Da der Ausrichtzustand praktisch immer eine Kombination aus Winkelversatz und Parallelversatz ist und die Maschine in beiden Ebenen – vertikal und horizontal – ausgerichtet werden muss, sind vier Werte nötig, um den Ausrichtzustand vollständig zu beschreiben.

Vertikaler Winkelversatz (oder Klaffung/Durchmesser)

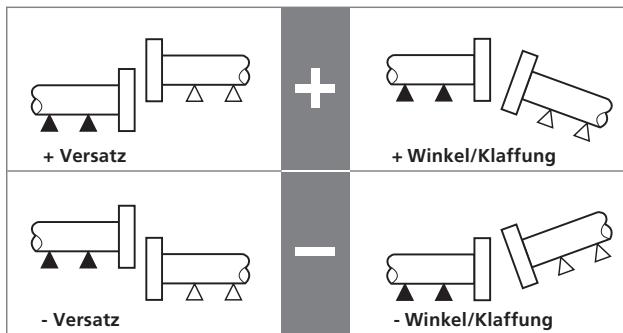
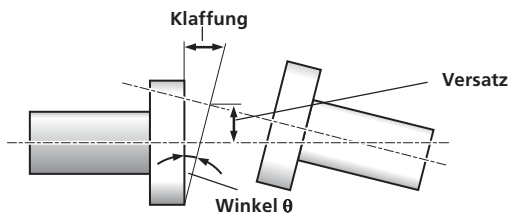
Vertikaler Parallelversatz

Horizontaler Winkelversatz (oder Klaffung/Durchmesser)

Horizontaler Parallelversatz

Sofern nicht anderweitig festgelegt, bezieht sich der Parallelversatz auf den Abstand zwischen den Wellendrehachsen in der Kupplungsmitte.

Im nachfolgenden Diagramm sind die Vorzeichen-Benennungen und Konvention abgebildet.



### Zwischenwellen

Zwischenwellen werden normalerweise eingesetzt, wenn erhebliche Ausrichtveränderungen während des Betriebs zu erwarten sind, z. B. bedingt durch thermisches Wachstum. Durch die Länge der Zwischenwelle fällt die Winkelveränderung am Ende der Zwischenwelle klein aus, selbst wenn größere Positionsveränderungen der Maschine auftreten. Die Ausrichtpräzision ist für Maschinen mit Zwischenwellen, die an beiden Enden flexible Elemente haben, weniger kritisch als für Maschinen mit kurzen flexiblen Kupplungen.

## Angabe des Ausrichtzustandes

Vier Werte werden zur vollständigen Beschreibung des Ausrichtzustandes benötigt.

Vertikaler Winkel  $\alpha$

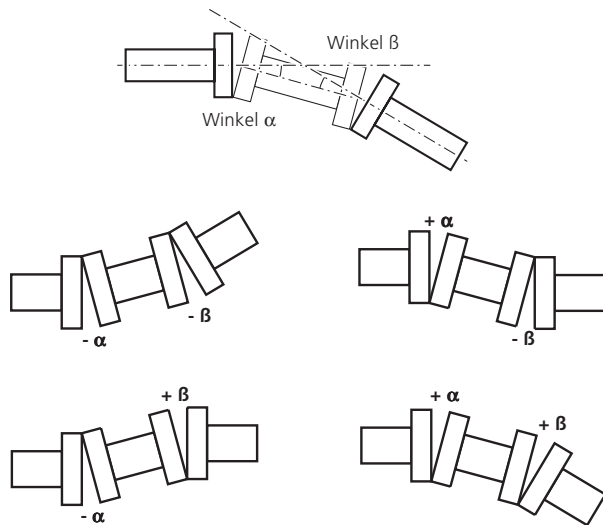
Vertikaler Winkel  $\beta$

Horizontaler Winkel  $\alpha$

Horizontaler Winkel  $\beta$

Winkel werden zwischen der Zwischenwellen-Drehachse und der jeweiligen Maschinen-Drehachse gemessen.

Im nachfolgenden Diagramm sind die Vorzeichen-Benennungen und Konvention abgebildet.



### Parallelversatz B – Parallelversatz A

Als Alternative zu den zwei Winkeln  $\alpha$  und  $\beta$  kann die Ausrichtung in Form von Parallelversätzen definiert werden.

Vertikaler Parallelversatz B

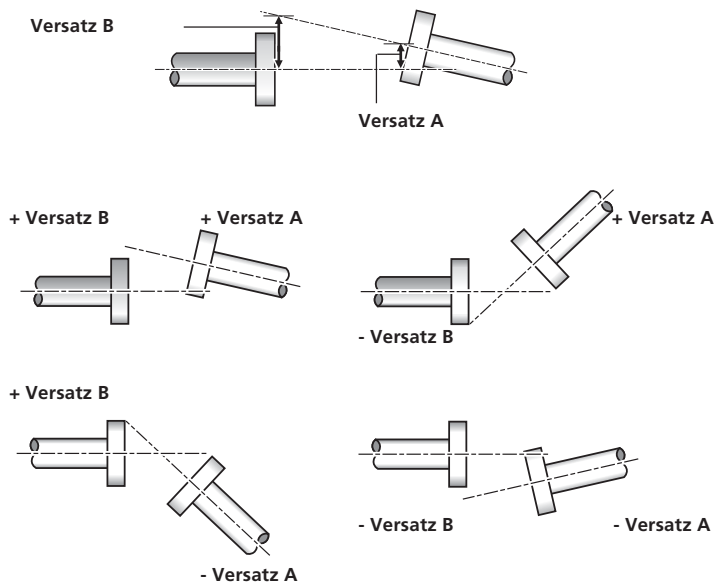
Vertikaler Parallelversatz A

Horizontaler Parallelversatz B

Horizontaler Parallelversatz A

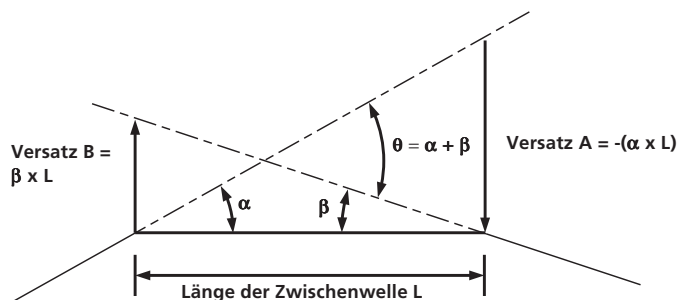
Die Parallelversätze werden zwischen den Maschinenwellen-Drehachsen an den Enden der Zwischenwellen gemessen. Dies ist vergleichbar mit dem Doppelradial-Messuhrverfahren.

Im nachfolgenden Diagramm sind die Vorzeichen-Benennungen und Konvention abgebildet.



### Beziehung zwischen Parallelversatz und Winkel

Das folgenden Diagramm zeigt deutlich die Beziehung zwischen verschiedenen Parallelversätzen und Winkeln.



### Ausrichttoleranzen bei flexiblen Kupplungen

Die hier aufgeführten Toleranzen stellen allgemeine Werte dar, die auf der über 20-jährigen Erfahrung im Wellenausrichten von PRÜFTECHNIK basieren. Sie sollten nicht überschritten werden und nur Anwendung finden, wenn durch betriebseigene Vorgaben oder durch den Maschinenhersteller keine anderen Toleranzen vorgeschrieben sind.

Betrachten Sie die Werte als die jeweils maximal zulässige Abweichung vom Ausrichtziel, sei es „Null“ oder ein gewünschter Versatz, der thermisches Wachstum ausgleicht. In den meisten Fällen zeigt ein kurzer Blick in die Tabelle, ob ein Ausrichtwert an der Kupplung noch zulässig ist oder nicht.

Als Beispiel: Eine Maschine mit einer kurzen flexiblen Kupplung läuft mit 1500 U/min und hat einen Kupplungs-Parallelversatz von  $-0,04$  mm vertikal und  $+0,02$  mm horizontal. Beide dieser Werte fallen in den „exzellenten“ Bereich von  $0,06$  mm.

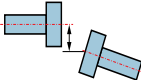
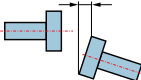
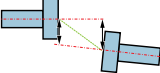
Winkelversatz wird üblicherweise in Form von Klaffungsdifferenz gemessen. Bei gleich bleibendem Winkelversatz gilt: je größer der Durchmesser, desto größer die Klaffung am Kupplungsrand (siehe Seite 9).

Die Werte in folgender Tabelle sind auf einen Kupplungsdurchmesser von  $100$  mm bezogen. Für einen anderen Kupplungsdurchmesser ist der Wert aus der Liste mit dem entsprechenden Faktor zu multiplizieren. Eine Maschine läuft z.B. mit  $1500$  U/min und hat einen Kupplungsdurchmesser von  $75$  mm. Für diesen Durchmesser beträgt die maximal zulässige Klaffung:  $0,07 \text{ mm} \times 75/100 = 0,0525$  mm.

Für Zwischenwellen zeigt die Tabelle einen maximal zulässigen Parallelversatz pro  $100$  mm Zwischenwellenlänge. Zum Beispiel: Eine Maschine läuft mit  $6000$  U/min bei einer Zwischenwellenlänge von  $300$  mm. Der maximal zulässige Parallelversatz beträgt:  $0,03 \text{ mm} \times 300/100 = 0,09$  mm an den Kupplungen an den Enden der Zwischenwelle.

Starre Kupplungen erlauben keine Toleranz bei der Ausrichtung. Sie sollten deshalb möglichst genau ausgerichtet werden, weil Restabweichungen unmittelbar zu Verspannungen führen.

## Empfohlene Toleranzen zur Wellenausrichtung

	[U/min]	metrisch [mm]		inch [mil]	
<b>Kippfuß</b>	alle	0.06 mm		2.0 mils	
<b>Kurze 'flexible' Kupplungen</b>		akzeptabel OK	gut 😊	akzeptabel OK	gut 😊
<b>Versatz</b>	600			9.0	5.0
	750	0.19	0.09		
	1 500	0.09	0.06		
	1 800			3.0	2.0
	3 000	0.06	0.03		
	3 600			1.5	1.0
	6 000	0.03	0.02		
	7 200			1.0	0.5
<b>Klaffung (Spaltbreite bezogen auf 100 mm Kupplungsdurchmesser)</b>	600			15.0	10.0
	750	0.13	0.09		
	1500	0.07	0.05		
	1 800			5.0	3.0
	3 000	0.04	0.03		
	3 600			3.0	2.0
	6 000	0.03	0.02		
	7 200			2.0	1.0
<b>Zwischenwellen und Membrankupplungen (Scheibekupplungen)</b>					
<b>Versatz (pro 100 mm Zwischenwelle)</b>	600			3.0	1.8
	750	0.25	0.15		
	1 500	0.12	0.07		
	1 800			1.0	0.6
	3 000	0.07	0.04		
	3 600			0.5	0.3
	6 000	0.03	0.02		
	7 200			0.3	0.2

### Hinweis:

Für industrielle Geräte ist die tolerierbare Fehlausrichtung eine Funktion von vielen Größen, darunter Drehzahl, Nennleistung, Kupplungstyp, Zwischenwellenlänge, Konstruktion der gekoppelten Geräte und nicht zuletzt die Erwartungshaltung der Betreiber in Bezug auf die Lebensdauer. Da es in der Praxis unmöglich ist, alle diese Größen in einer vernünftigen Ausrichtspezifikation zu berücksichtigen, sind einige Toleranzvereinfachungen notwendig.

In den siebziger Jahren wurden erstmals Toleranzen veröffentlicht, die gemäß Drehzahl und Kupplungs-Zwischenlänge spezifiziert wurden. Viele der Toleranzen basierten hauptsächlich auf der Erfahrung mit geschmierten Getriebekupplungen. Heute weiß man, dass diese Toleranzen für eine Mehrzahl von Trockenkupplungen mit flexiblen Elementen gleichermaßen angewendet werden können.

In der vorangehenden Tabelle sind „akzeptable“ Grenzwerte aus der Gleitgeschwindigkeit geschmierten Stahls auf Stahl berechnet, wobei ein Wert von 12 mm/s für die zulässige Gleitgeschwindigkeit eingesetzt wird. Da diese Werte auch mit denen übereinstimmen, die aus Scherwerten von Elastomeren abgeleitet sind, gelten sie ebenfalls für Standardkupplungen mit flexiblen Elementen.

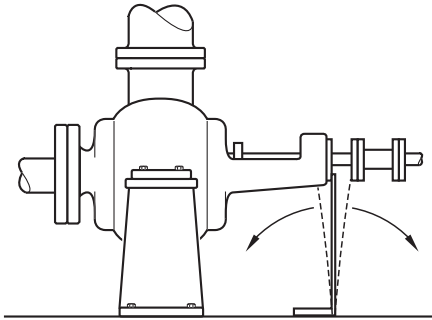
„Exzellente“ Werte basieren auf Beobachtungen einer breiten Vielfalt industrieller Maschinen zur Feststellung der für Schwingungen verantwortlichen kritischen FehlAusrichtung. Allerdings garantiert die Einhaltung dieser Toleranzen nicht den schwingungsfreien Betrieb einer Maschine.

## **Kupplungsrückstellkräfte und Wellendurchhang**

### **Neu aufgenommene Messwerte entsprechen nicht den gerade ausgeführten Ausrichtschritten ?**

Wird eine Maschine ausgerichtet, egal ob mit Messuhr oder mit laseroptischen Systemen, so stimmen manchmal die nach der Korrektur aufgenommenen Messwerte mit den durchgeführten Ausrichtkorrekturen nicht überein. Eine Erklärung besteht darin, dass Rückstellkräfte an der Kupplung die Welle, die Maschinenbefestigung oder das Fundament verformen. Dies wurde vielfach besonders bei Pumpe-Motor-Kombinationen beobachtet, bei denen die Pumpe eine „stabile“ motorseitige Befestigung hat, wie die folgende Abbildung zeigt.

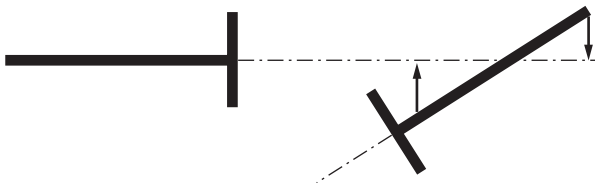




Bei dieser Anwendung ist das flexible Kupplungselement radial ziemlich starr und kann die Ausrichtmessung beeinflussen. In diesem Fall raten wir zur Entkoppelung der Kupplungselemente, um die Ausrichtung unabhängig von äußeren Kräften messen zu können.

Bleiben die oben genannten Einflüsse unberücksichtigt, führt dies dazu, dass die neue Ausrichtung falsch ist und die Korrektur häufig sogar in die entgegengesetzte Richtung durchgeführt wird.

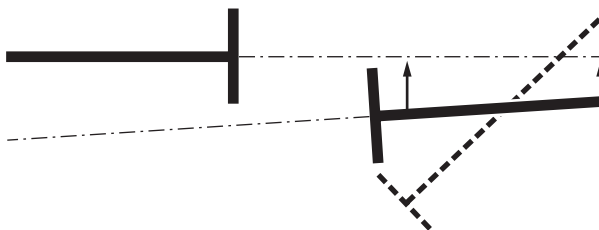
In extremen Fällen können Kupplungsbelastungen, die an auszurichtenden Maschinen auftreten, die Wellen während des Betriebs biegen. In den meisten Fällen ist diese Biegung minimal, aber es reicht aus, um die Achsposition bei Drehung der Wellen zu beeinflussen. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen die möglichen Probleme.



Der Ausrichtzustand bei ungekuppelten Wellen



Die gemessene Ausrichtung bei ungekuppelten Wellen. Die projizierten Mittellinien der Drehung wurden eingezeichnet.

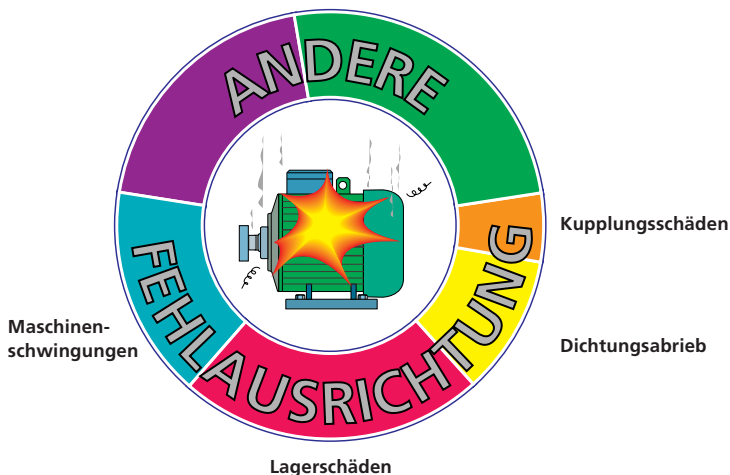


Die Korrekturen wurden auf Basis der Messungen vorgenommen. Auf die Kupplung wirken nun weniger Kräfte und die Welle wird im nächsten Schritt genau ausgerichtet.

### Können Kupplungen Fehlausrichtung ausgleichen?

Eine oft angeführte Begründung ist „...warum soll man sich überhaupt mit der Maschinenausrichtung abgeben, wenn die Maschine ohnehin mit einer flexiblen Kupplung ausgestattet ist?“

Die eigene Erfahrung und auch die Empfehlungen von Kupplungsherstellern zur maximal zulässigen Fehlausrichtung besagen das Gegenteil. Fallstudien deuten darauf hin, dass 50% der Maschinenausfälle direkt auf eine schlechte Wellenausrichtung zurückzuführen sind.



Es ist richtig, dass flexible Kupplungen zu dem Zweck entwickelt wurden, Fehlausrichtung aufzunehmen. Üblicherweise bis zu einem Radialversatz der Wellen von 10 mm oder mehr. Aber die Reaktionskräfte, die in fehlausgerichteten Kupplungen entstehen, führen zu einer drastischen Erhöhung der Last, die auf die Wellen und somit auch auf die Lager und Dichtungen wirkt. Zum Beispiel erzeugt eine 445 mm Kupplung, ausgelegt für einen maximalen Radialversatz von 6 mm bei 600 U/min, eine Reaktionskraft von 1,2 kN pro mm Radialversatz. (Siehe „Laser alignment helps cut shipboard vibration“, *Diesel and Gas Turbine Worldwide*, Nov. 1997.)

**Wälzlager**

Lager sind sehr präzise gefertigte Maschinenelemente, die dafür vorgesehen sind, mit einwandfreier Schmierung und bei gleichbleibender, aber begrenzter Temperatur zu arbeiten. Maschinenelemente, die mit einer Genauigkeit von 0,005 mm hergestellt wurden, sind:

- nicht in der Lage, über einen längeren Zeitraum bei überhöhter Temperatur, die durch Fehlausrichtung verursacht wird, betrieben zu werden.
- nicht widerstandsfähig gegen Verunreinigungen wie Schmutz, Sand und Metallteile, die durch schadhafte mechanische Dichtungen eindringen können.
- nicht ausgelegt, um die sorgfältig gearbeiteten und feingeschliffenen Flächen über einen längeren Zeitraum mit Stößen, die durch Fehlausrichtung verursacht werden, zu belasten.

Wenn Lager aufgrund von Fehlausrichtungen beschädigt werden, oder wenn die mechanischen Dichtungen ausfallen, müssen die Lager von den Wellen abmontiert und entweder überholt oder, wie es öfter der Fall ist, erneuert werden. Auch das Abmontieren und Überholen an sich kann zu Lagerschäden führen. Die meisten Pumpenhersteller und Instandhalter empfehlen, dass Lager bei der Instandsetzung von Pumpen immer erneuert werden – unabhängig vom augenscheinlichen Zustand des Bauteils – da kleine Schäden, die sich nach der Überholung progressiv verschlimmern können, leicht zu übersehen sind.

**Mechanische Dichtungen**

Dichtungs-Abnutzung steigt durch Wellenbewegungen als Folge der Lastwechsel, die durch Fehlausrichtung verursacht werden. Pumpendichtungen sind sehr teuer und machen oft bis zu einem Drittel der Gesamtkosten einer Pumpe aus. Schlechte Montage und übermäßige Fehlausrichtung von Wellen verkürzen die Lebensdauer einer Dichtung erheblich. Hersteller haben auf das Problem der schlechten Montage reagiert, und bieten nun Dichtungen in Patronenbauweise an, die ohne oder fast ohne Zusammenbau vor Ort installiert werden können. Dichtungen enthalten jedoch Präzisionsbauteile, die mit einer Genauigkeit von 2 Mikrometer (0,002 mm) feingeschliffen sind.

Betrieb unter schlechten Bedingungen schadet ihnen sehr. Oberflächenreibung, erhöhte Temperatur und Verschmutzung führen schnell zu Schäden an teuren Komponenten. Dichtungsausfall kündigt sich kaum an, kann aber katastrophale Folgen haben. Anlagenstillstand, Kosten für Dichtungserneuerung, Reparaturkosten der Pumpen und das Ersetzen der Lager machen einen Dichtungsausfall durch Fehlausrichtung zu einem kostspieligen und unnötigen Problem.

### **Maschinenschwingungen**

Mit steigender Fehlausrichtung nehmen die Maschinenschwingungen zu. Starke Schwingungen wiederum führen zur Ermüdung von Maschinenteilen und folglich zu frühzeitigem Maschinenausfall.

### **Die Vorteile des Wellenausrichtens**

Die Vorteile, die durch die konsequente Aufrechterhaltung guter Wellenausrichtung entstehen, beginnen mit der Verlängerung der Lebensdauer von Maschinen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anlagen bei Bedarf länger zur Verfügung stehen. Durch exakt ausgerichtete Maschinen wird folgendes erreicht:

- Verlängerte Nutzungsdauer und erhöhte Zuverlässigkeit der Anlagen
- Reduzierung der Ausgaben für Ersatzteile wie Dichtungen und Lager
- Arbeitseinsparung in der Instandhaltung
- Reduzierte Produktionsausfälle aufgrund von Anlagenstillständen
- Geringere Notwendigkeit von Ersatzanlagen
- Erhöhte Betriebssicherheit der Anlage
- Reduzierte Energiekosten der Anlage
- Höhere maximale Maschinengeschwindigkeit
- Günstigere Anlagen-Versicherungsrate durch bessere Betriebspraxis und -ergebnisse

### **Anzeichen von Fehlausrichtung**

Es ist nicht immer einfach, eine Fehlausrichtung an einer Maschine zu erkennen, die gerade in Betrieb ist. Die radiale Kraft, die von Welle zu Welle übertragen wird, kann nur schwer von außen exakt gemessen werden. Mit einer Schwingungsanalyse oder einer Infrarotthermographie ist es möglich, primäre Symptome einer Fehlausrichtung, wie

hohe Schwingungsmesswerte in radialer und axialer Richtung oder unnormale Temperaturgradienten am Maschinengehäuse, zu erkennen. Aber auch ohne diese Instrumente ist es möglich, sekundäre Maschinenprobleme aufzuspüren, welche auf eine fehlerhafte Wellenausrichtung hinweisen können.

- Lose oder abgerissene Schrauben am Fundament
- Lose Passplatten oder Stehbolzen
- Erhöhter Ölverlust an Lagerdichtungen
- Lose oder abgerissene Kupplungsschrauben
- Manche flexible Kupplungsarten laufen bei Fehlausrichtung heiß. Falls die Kupplung elastomere Teile besitzt, sollte im Inneren der Kupplungsabdeckung nach Gummipulver gesucht werden.
- Andere, vergleichbare Geräte vibrieren weniger und haben eine längere Nutzungsdauer
- Ungewöhnlich viele Kupplungsausfälle oder starker Kupplungsverschleiß
- Starke Ansammlung von Fett oder Öl innerhalb des Kupplungsschutzes
- Wellenbrüche oder Wellenrisse an oder in der Nähe des Lagers oder am Kupplungsflansch

Das genaue Ausrichten von Wellen sollte eine Schlüsselstellung bei der Instandhaltung von rotierenden Maschinen einnehmen. Eine exakt ausgerichtete Maschine ist ein Gewinn für jede Anlage. Sie steht bei Bedarf zur Verfügung und benötigt weniger planmäßige (und außerplanmäßige) Instandhaltung. In einem späteren Abschnitt werden wir einige spezielle Fallbeispiele besprechen, die demonstrieren, auf welche Weise eine gute Wellenausrichtung erhebliche Kostenvorteile beim Betrieb der Anlage bewirken kann. Das nächste Kapitel in diesem Handbuch behandelt die verschiedenen Methoden der Wellenausrichtung, mit denen eine gute Maschinenausrichtung erzielt werden kann.

**Ausrichtmethoden und Durchführung**

Es gibt eine ganze Reihe von verschiedenen Methoden, mit denen eine akzeptable Ausrichtung von Maschinen erreicht werden kann. Diese reichen vom kostengünstigen Haarlineal bis hin zu hoch entwickelten und dadurch folgerichtig teureren Lasersystemen. Wir können diese Methoden in drei grundlegende Kategorien zusammenfassen.

- Mit dem Auge – Haarlineal und Fühlerlehre
- Messuhren – mechanische Versatzmessgeräte
- Laseroptische Ausrichtsysteme

In jeder dieser drei Kategorien gibt es eine Reihe von verschiedenen Abwandlungen und Möglichkeiten. Wir beabsichtigen hier aber nicht, alle diese Möglichkeiten auszuwerten. Stattdessen konzentrieren wir uns auf die meistverbreiteten Methoden in jeder Kategorie.

**Vorbereitung ist wichtig**

Der erste vorbereitende Schritt für eine erfolgreiche Ausrichtung ist, sicherzustellen, dass die auszurichtende Maschine in den erforderlichen Richtungen beweglich ist. Hierbei handelt es sich u.a. um das Anheben der Maschine (natürlich unter Benutzung richtiger Hebewerkzeuge) als auch das Absenken der Maschine, wie es ebenfalls oft erforderlich ist. Dies kann durch das Unterlegen von Passplatten unter die Füße beider Maschinen erreicht werden. Wir empfehlen, dass bei der Erstinstallation beide Maschinen mit Passplatten versehen werden, so dass später, falls erforderlich, Veränderungen im Fundamentzustand ausgeglichen werden können.

Das horizontale Korrigieren der Maschinen erfolgt am besten mit Verstellerschrauben oder hydraulischen Geräten. Alle diese Werkzeuge ermöglichen es, die Maschine vorsichtig, langsam und gleichmäßig zu bewegen. Methoden, wie z. B. der Gebrauch eines Hammers, erschweren die genaue Positionierung und können zu einer Beschädigung der Maschinen führen (Einprägung von Rattermarken in den Lagern).

**Leitfaden zur Installation von Maschinen**

Bei der Installation von Maschinen wie Pumpen, Getrieben oder Kompressoren, müssen einige allgemeine Regeln beachtet werden:

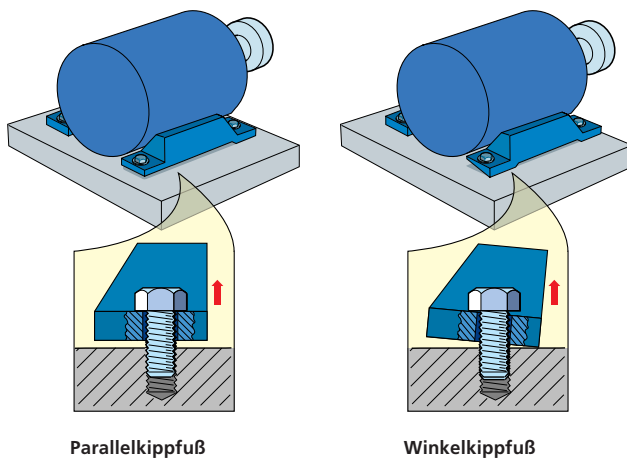
- Die Arbeitsmaschine wird in der Regel zuerst installiert. Die Antriebsmaschine oder der Motor wird dann zu der Welle der anzutreibenden Einheit ausgerichtet.
- Falls ein Getriebe vorhanden ist, sollte das Getriebe zu der Arbeitsmaschine ausgerichtet werden und die Antriebsmaschine zu dem Getriebe.
- Mit einfachen Kontrollen können Sie die Genauigkeit der Maschinenkupplungen bestimmen. Kontrollieren Sie, wenn möglich, den Rundlauf (sind die Kupplungshälften und Wellen konzentrisch?) und den Planlauf der Kupplungshälften bezüglich der Wellenmittellinien mit einer Messuhr (Exzentrische Kupplungshälften können Unwuchtprobleme bereiten.).
- Die Vorbereitung des Maschinenfundaments und der Maschinenauflagefläche, -füße, -sockel, usw. ist von größter Bedeutung. Eine gute Ausrichtung ist sonst nur schwer zu erreichen.
- Die Flächen säubern, richten und Grate von den Montageflächen, Bolzenlöchern, usw. abfeilen.
- Um präzise und wirksam ausrichten zu können, sollten Passplatten hoher Qualität zur Verfügung stehen.
- Bevor Sie das Wellenausrichtsystem/die Instrumente auf den Maschinen montieren, nehmen Sie sich ein paar Minuten Zeit, um die Ausrichtung der Kupplungen/Wellen genau zu begutachten. Ihre Augen sind Ihr erstes Prüfgerät.
- Prüfen Sie, ob die Pumpe bzw. der Motor gerade auf der Grundplatte aufliegt und ob ein Kippfuß vorhanden ist, der ggf. korrigiert werden muß (siehe nächster Abschnitt).
- Halten Sie die Anzahl der Passplatten möglichst gering, d. h. möglichst nicht mehr als 3 Passplatten pro Maschinenfuß/Unterlage.
- Korrigieren Sie die Ausrichtung soweit wie nötig, um sicherzustellen, dass die Maschinenwellen beim Betrieb in ihren Lagern konzentrisch laufen und innerhalb der Herstellertoleranzen ausgerichtet sind.



- Bei der Ausrichtung immer die Herstellerausrichtvorgaben beachten! Temperaturwachstum kann u. U. einen ‚kalten‘ Ausrichtversatz erforderlich machen.
- Sorgen Sie dafür, dass die an die Maschinen angeschlossenen Leitungen und Rohre sachgemäß gestützt sind, sich bei thermischer Ausdehnung jedoch frei mitbewegen können.

### **Messung und Korrektur vom Kippfuß**

Ein wichtiger Bestandteil eines jeden erfolgreichen Ausrichtvorgangs ist die Erkennung und das Korrigieren vom Kippfuß. Genauso wie ein kippelnder Stuhl oder Tisch das Nervenkostüm strapazieren kann, tut es auch eine „wackelige Maschine“. Die Position der Maschine verändert sich bei jedem Ausrichtvorgang, und bei jeder Überprüfung der Ausrichtung wird festgestellt, dass die Maschine noch immer fehlausgerichtet ist. Dazu kommt, dass beim Festschrauben der Maschinenfüße zusätzliche Verspannungen an Maschinen- und Lagergehäusen entstehen können. Im Wesentlichen gibt es zwei unterschiedliche Typen von Kippfuß, die in nachfolgender Abbildung dargestellt sind.



Beim Parallelkipfuß verläuft das Fundament parallel zur Unterseite des Maschinenfußes. Er wird korrigiert, indem die richtige Stärke an Passplatten einfach hinzugefügt wird. Winkelkipfuß liegt vor, wenn der Maschinenfuß und das Fundament einen Winkel zueinander bilden. Die zweite

Situation ist schwieriger zu diagnostizieren und zu korrigieren. Eine mögliche Lösung ist die Verwendung abgestufter Passplatten, um die Lücke zwischen Fuß und Fundament zu füllen. Eine aufwendigere aber dafür dauerhaftere Lösung ist die Demontage der Maschine und das Abschleifen der Füße.

### Die Messung des Kippfußes

Eine Vielzahl an Techniken erlaubt die Bestimmung eines Kippfußes vor dem Beginn des Ausrichtvorgangs.

Positionieren Sie eine Messuhr mit Magnetfuß über einem der Maschinenfüße. Stellen Sie die Messuhr auf Null und lösen Sie einen der Maschinenfüße. Notieren Sie etwaige Veränderungen im Messuhrwert. Ziehen Sie den Maschinenfuß wieder fest. Wiederholen Sie dieses Verfahren für alle Maschinenfüße.

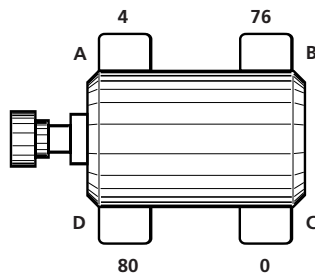
oder

Lösen Sie einen Maschinenfuß. Mit einem Satz Fühlerlehren messen Sie die Klaffung, die unterhalb des gelösten Maschinenfußes entsteht und notieren Sie den Wert. Schrauben Sie den Maschinenfuß wieder fest und wiederholen Sie das Verfahren für die übrigen Füße.

oder

Verwenden Sie ein Laserausrichtsystem. Lösen Sie einen Maschinenfuß. Das Ausrichtsystem notiert die Anhebung des Fußes. Schrauben Sie den Fuß wieder fest, bevor Sie mit dem nächsten Fuß fortfahren.

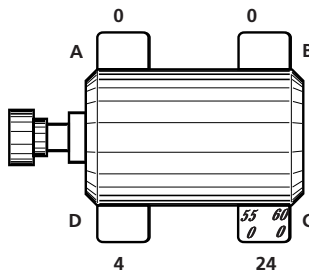
Sobald Sie den Grad des Kippfußes, wie in folgender Abbildung dargestellt, bestimmt haben, können Sie die nötigen Korrekturen gemäß des diagnostizierten Kippfußzustandes vornehmen.



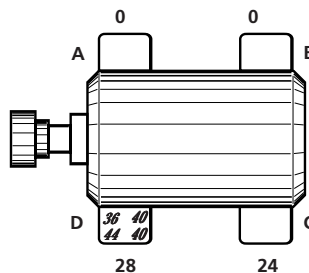
Folgendes Beispiel illustriert ein klassisches Kippfußproblem, bei dem die Maschine zwischen den Füßen B und D

kippelt. Es ist verlockend, diese beiden Füße mit Passplatten zu unterlegen, um dadurch das Kippen zu verhindern. Dies wäre aber ein Fehler. Die beste Lösung ist, nur unter einen der Füße Passplatten mit einer Stärke von 80/100 mm zu legen und dann alle Füße erneut zu messen.

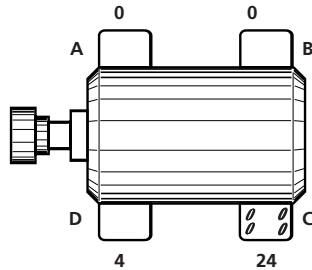
Es gibt eine Vielzahl weiterer Kippfußprobleme, darunter die Anhebung von Maschinenfüßen aufgrund von Verspannungen von Rohren und Leitungen. Auch Federeffekte, verursacht durch zu viele Passplatten unter den Maschinenfüßen, stellen ein Kippfußproblem dar. Folgende Diagramme zeigen einige Beispiele.



Kippfußbeispiel: Gebogener Fuß – Gestufte Passplatten unter Fuß C legen und alle Füße erneut messen.



Kippfußbeispiel: Verspannungen durch Rohre – externe Kräfte beseitigen.



Kippfußbeispiel: Federeffekt – alle Füße mit nicht mehr als 3 Passplatten versehen und erneut messen

Führen Sie bei der Beseitigung von Kippfuß folgende Schritte durch:

1 Alle vier Maschinenfüße überprüfen. Jeden Fuß, der mehr als **0,08** mm Kippfuß aufweist, entsprechend korrigieren.

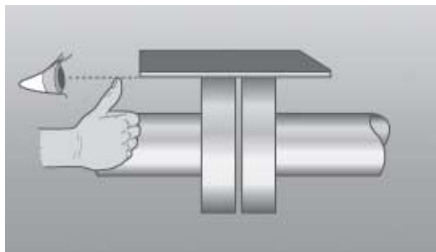
2 Untersuchen Sie den größten Kippfuß (oder die zwei größten Kippfüße bei gleichen Werten) mit Fühlerlehren, um die Art des Kippfußes zu bestimmen. Es kann nie schaden, auch die anderen Füße zu untersuchen, aber konzentrieren Sie sich zunächst auf die Erkennung und Beseitigung des größten Problems.

3 Korrigieren Sie den diagnostizierten Zustand, indem Sie unter maximal einen Fuß Passplatten legen.

4 Wenn alle Füße im Toleranzbereich liegen, können Sie mit der Ausrichtung beginnen.

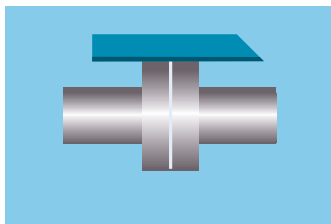
## Ausrichtmethoden – Mit dem Auge

### Das Haarlineal



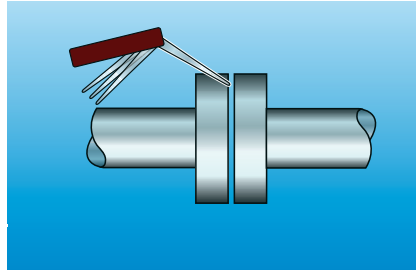
Diese Methode der Kupplungsausrichtung war lange in vielen Betrieben gängige Praxis. Wenn eine flexible Kuppelung verwendet wurde, galt es als ausreichend, die Ausrichtung per Auge durchzuführen und die Maschine dann festzuschrauben. Diese Methode ist sicherlich kostengünstig und die Gerätschaft liegt zur Hand. Die Korrekturwerte für die Maschinenfüße wurden normalerweise auf Basis der Erfahrung des Ausrichters abgeschätzt. Meistens erforderten die Korrekturen an den Maschinenfüßen mehrfache Wiederholung, bis die über Abschätzung durchgeführte Ausrichtung abgeschlossen war. Aber auch dann gab es keine Sicherheit, dass die fertiggestellte Ausrichtung auch korrekt war.

Da die Auflösung des menschlichen Auges auf 1/10 mm beschränkt ist, ist die Genauigkeit der Ausrichtung entsprechend begrenzt. Hinzu kommt, dass ohne eine umfassende Überprüfung der Genauigkeit der Kupplungsoberfläche auf der Welle keine direkte Korrelation zwischen der fertiggestellten Ausrichtung und der tatsächlichen Ausrichtung der Drehachsen gemacht werden kann.

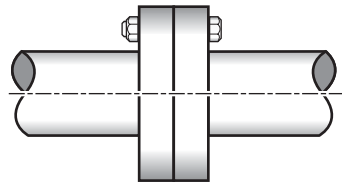


Bestenfalls kann diese Ausrichtmethode als Kupplungsausrichtung, nicht aber als die anfangs beschriebene Wellenausrichtung definiert werden.

### Die Fühlerlehre



Obwohl diese Methode hier als eine „mit dem Auge“ verrichtete Methode klassifiziert wird, ist die Fühlerlehrenmethode unter bestimmten Bedingungen und bei manchen Maschinen völlig akzeptabel. Bei der Installation und Ausrichtung von Turbinensätzen, bei denen die Kupplungshälfte ein integraler Bestandteil der Rotorwelle ist und keine flexiblen Elemente enthalten sind, kann ein geschickter Turbineningenieur die beiden Kupplungshälften sehr genau ausrichten. (Wie bereits im Abschnitt über Ausrichttoleranzen erwähnt, erlauben solche „starren“ Kupplungen keinen Versatz und keine Klaffung.)



Mit einer Fühlerlehre oder einer Schieblehre misst der Ingenieur mit hoher Genauigkeit die etwaige Klaffung zwischen den Kupplungshälften. Dann werden die Wellen simultan um 180 Grad gedreht und die Klaffung wird erneut überprüft. Das gleiche Verfahren wird dann für die waagerechten Ausrichtmessungen angewandt.

Messwerte werden üblicherweise grafisch dargestellt, um den Ausrichtzustand und ggf. notwendige Korrekturmaßnahmen zu verdeutlichen. In manchen Fällen dreht der Ingenieur eine der Wellen um 180 Grad und macht zusätzliche Messungen.

Um mögliche Bearbeitungsfehler an der Welle auszugleichen wird dann der Mittelwert dieser Messungen bestimmt. Die gemittelten Messwerte bilden die Basis für die grafische Darstellung.

An Maschinen mit flexiblen Kupplungselementen ist die Anwendung von Fühlerlehren mit den gleichen Einschränkungen behaftet wie die Haarlinealmethode und kann in diesem Fall lediglich als Kupplungsausrichtung bezeichnet werden.

### Ausrichtmethoden – Messuhren

Die Verwendung von Messuhren bei der überwiegenden Mehrheit von Wellenausrichtverfahren, bei denen flexible Kupplungselemente im Einsatz sind, ist ein entscheidender Schritt in Richtung des akkuraten Ausrichtens von Wellen. Für Messuhren gibt es eine Reihe von Montagemethoden, mit denen Maschinen ausgerichtet werden können. In diesem Abschnitt werden einige dieser Methoden beschrieben. Außerdem gibt es einige Faktoren, die ein Ingenieur berücksichtigen muss, bevor mit der Ausrichtung per Messuhr begonnen werden kann.

**Durchhang der Messuhrenhalterungen:** Der Messstangendurchhang sollte immer vor der eigentlichen Ausrichtmessung bestimmt werden – egal wie stabil die Halterungen erscheinen mögen! Siehe dazu den Abschnitt über die Messung von Durchhang.



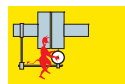
**Interne Reibung/Hysterese:** Gelegentlich muss leicht gegen die Messuhr geklopft werden, damit der Zeiger den exakten Wert anzeigt.



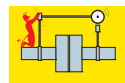
**Auflösung von 1/100 mm:** Bei jedem Messwert kann beim Auf- bzw. Abrunden ein Fehler von bis zu 0,005 mm entstehen. Dies kann sich innerhalb eines gesamten Messwertsatzes zu einem erheblichen Fehler aufsummieren.

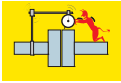


**Ablesefehler:** Einfache Fehler können leicht eintreten, wenn die Anzeigen unter schlechten Bedingungen und Zeitdruck abgelesen werden müssen.

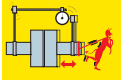


**Spiel in den mechanischen Verbindungen:** Geringes Spiel, das möglicherweise gar nicht wahrnehmbar ist, kann bereits zu erheblichen Messfehlern führen.





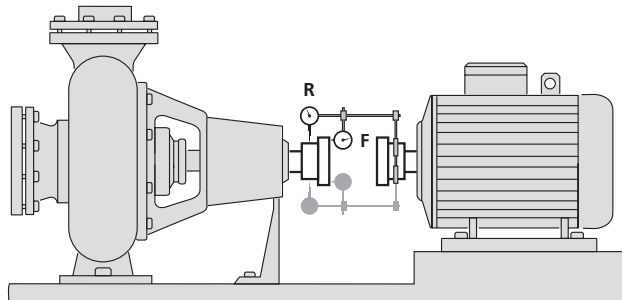
**Schief angebrachte Messuhr:** Ist die Messuhr nicht senkrecht zur Messfläche angebracht, wird tendenziell ein zu großer Messwert erfasst.



**Axiales Wellenspiel:** Die axialen Messwerte am Flansch, die zur Messung des Winkelveersatzes aufgenommen werden, können durch axiales Wellenspiel verfälscht werden, es sei denn es werden zwei axialmontierte Messuhren verwendet.

### Radial-Axial-Verfahren – die iterative Methode

Bei der Wellenausrichtung mittels Messuhren ist ein elementares Verständnis von Mathematik und Geometrie gefragt, um die Messwerte interpretieren zu können. Mitunter müssen auch Faktoren wie Durchhang der Messuhrenhalterung berücksichtigt werden. In manchen Fällen sind diese Kompetenzen begrenzt und die Maschinen werden über ein iteratives Verfahren, der wiederholten Messung und Korrektur ausgerichtet, wobei Durchhang und Bewegungen der Welle in axialer Richtung unberücksichtigt bleiben. Außerdem wird bei der Messung nur eine Welle gedreht, welches aufgrund von Kupplungsrund- und Kupplungsplanlauffehler sowie Wellenbiegung eine fehlerhafte Ausrichtung zur Folge haben kann.



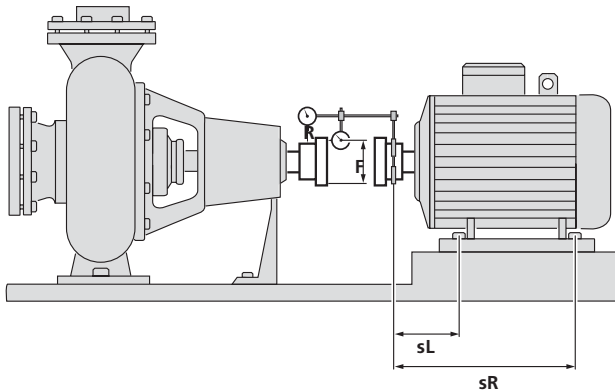
Das oben abgebildete Diagramm veranschaulicht die Situation. Messuhren vermessen die der feststehenden Maschine zugewandte Kupplungshälfte nach dem Radial-Axial-Verfahren. Die Messuhren werden an Position 12:00 Uhr auf Null eingestellt und die Welle der Maschine, die bewegt werden soll, wird um eine halbe Umdrehung auf Position 6:00 Uhr gedreht.



Der Fuß, der sich am nächsten an der Kupplung befindet, wird um die Hälfte des Wertes angehoben (gesenkt), der von der Messuhr angezeigt wird. Wenn möglich wird von dieser Methode abgeraten zugunsten anderer Ausrichtmethoden mittels Messuhr oder Lasersystem.

### Radial-Axial-Verfahren – Über Berechnungen

Auch bei dieser Ausrichtmethode wird die Messuhr verwendet. Wenn der Taster in die Messuhr verschoben wird, dreht sich der Zeiger im Uhrzeigersinn. Die Anzahl der Markierungen, an denen sich der Zeiger vorbei bewegt, entspricht der Entfernung, über die der Taster in die Messuhr verschoben wurde. Wenn der Taster aus der Messuhr geschoben wird, gibt der Zeiger die Entfernung ebenfalls an. Üblicherweise ist der Messwert positiv, wenn der Taster nach innen bewegt wird, und negativ, wenn der Taster nach außen bewegt wird.



Das Radial-Axial-Verfahren hat seinen Namen von der Position der Messuhrentaster während der Messung. Die Abbildung oben zeigt den traditionellen Messuhrenaufbau. Ist die Messuhr montiert, werden die Wellen synchron gedreht und die Messwerte an den Positionen 12:00, 3:00, 6:00 und 9:00 Uhr abgelesen.

**Formeln zur Berechnung der Ausrichtkorrekturen**

Für diesen Messuhrenaufbau berechnet sich die Ausrichtung der zu bewegendenden Maschine in der Meßebeine wie folgt:

$$VP = (R6 - R0 - RS)/2$$

$$VW = (A6 - A0 - AS)/\varnothing$$

$$HP = (R9 - R3)/2$$

$$HW = (A9 - A3)/\varnothing$$

$$VP = \text{Vertikaler Versatz}$$

$$VW = \text{Vertikale Klaffung}$$

$$HP = \text{Horizontaler Versatz}$$

$$HW = \text{Horizontale Klaffung}$$

$$R0 = \text{Radial-Messwert an Position 12:00 Uhr}$$

$$R3 = \text{Radial-Messwert an Position 3:00 Uhr}$$

$$R6 = \text{Radial-Messwert an Position 6:00 Uhr}$$

$$R9 = \text{Radial-Messwert an Position 9:00 Uhr}$$

$$F0 = \text{Axial-Messwert an Position 12:00 Uhr}$$

$$F3 = \text{Axial-Messwert an Position 3:00 Uhr}$$

$$F6 = \text{Axial-Messwert an Position 6:00 Uhr}$$

$$F9 = \text{Axial-Messwert an Position 9:00 Uhr}$$

$$\varnothing = \text{Durchmesser des Kreises, den der Axial-Messtaster beschreibt (= Messkreisdurchmesser)}$$

$$RS = \text{Durchhang der Radial-Messuhr}$$

$$AS = \text{Durchhang der Axial-Messuhr}$$

$$sL/R = \text{Entfernung zwischen Messebene (Radial-Messtaster) und Maschinenfuß (linker/rechter). Dieser Wert kann ein positives oder negatives Vorzeichen erhalten.}$$

Der Uhrzeigersinn ist in Blickrichtung entlang der Welle von der zu bewegendenden Maschine zur stationären Maschine definiert.

$$\text{Unterlegwert} = (VW)(s) - VP$$

$$\text{Unterlegwert} = (A6 - A0 + AS)(s)/\varnothing - (R0 - R6 + RS)/2$$

$$\text{Verschiebewert} = (HW)(s) - HP$$

$$\text{Verschiebewert} = (A9 - A3)(s)/\varnothing - (R3 - R9)/2$$

Falls die Messuhren an Position 12:00 Uhr auf Null eingestellt und dann an Position 6:00 Uhr abgelesen werden, werden die Unterlegwerte folgendermaßen berechnet:

$$\text{Unterlegwert} = (A6 - AS)(s)/\varnothing - (R6 - RS)/2$$

Falls die Messuhren an Position 3:00 Uhr auf Null eingestellt und dann an Position 9:00 Uhr abgelesen werden,

werden die Verschiebewerte folgendermaßen berechnet:

$$\text{Verschiebewert} = (A9)(s)/\emptyset\text{-R9}/2$$

Positiv bedeutet, in Richtung 3:00 Uhr bewegen.

Negativ bedeutet, in Richtung 9:00 Uhr bewegen.

Die Berechnungen der Unterleg- und Verschiebewerte müssen jeweils zweimal durchgeführt werden, einmal an den vorderen und einmal an den hinteren Füßen.

### **Regel für die Gültigkeit der Messuhrenmesswerte**

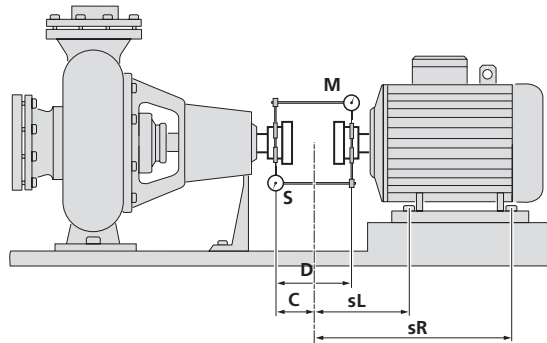
Die Summe der 3:00 und 9:00 Uhr Messwerte sollte der Summe der 12:00 und 6:00 Uhr Messwerte entsprechen. Dieses trifft sowohl auf radiale Messwerte als auch auf axiale Messwerte zu.

### **Durchhang**

Eine Hauptfehlerquelle in diesem Verfahren ist der Durchhang des Messgestänges. Dieser Fehler kann die Unterlegwerte dermaßen beeinflussen, dass die Maschine anschließend in hohem Grade fehlausgerichtet ist. Um diesen Durchhang auszugleichen, messen Sie ihn und addieren Sie die Messwerte (der Wert kann positiv oder negativ ausfallen) zu den 6:00 Uhr-Messwerten. Siehe dazu die obigen Formeln.

### Das Doppelradial-Messuhrenverfahren – Über Berechnungen

Das Doppelradial-Messuhrenverfahren ist die modernste Methode der Messuhrenausrückung und wird durch das American Petroleum Institute (API 686) als die zu bevorzugende Messmethode empfohlen.



Das Doppelradial-Messuhrenverfahren hat seinen Namen von der Position der Messuhren, die auf entgegengesetzten Seiten der Kupplungshälften liegen. Die Abbildung oben zeigt den traditionellen Messuhrenaufbau. Sind die Messuhren montiert, werden die beiden Wellen synchron gedreht und die Messwerte an den Positionen 12:00, 3:00, 6:00 und 9:00 Uhr abgelesen.

#### Formeln zur Berechnung der Doppelradialausrichtung

Für diesen Messuhrenaufbau erhalten Sie mit folgenden Formeln die Versatzwerte an der Kupplungsmitte:

$$VP = (S6-S0-SS)/2 - (S6-S0-SS+M6-M0-MS)C/2D$$

$$VW = (S6-S0-SS+M6-M0-MS)/2D$$

$$HP = (S9-S3)/2 - (S9-S3+M9-M3)C/2D$$

$$HW = (S9-S3+M9-M3)/2D$$

VP = Vertikaler Versatz

VW = Vertikale Klaffung

HP = Horizontaler Versatz

HW = Horizontale Klaffung

S0 = Linker Radial-Messwert an Position 12:00 Uhr

S3 = Linker Radial-Messwert an Position 3:00 Uhr

S6 = Linker Radial-Messwert an Position 6:00 Uhr

S9	=	Linker Radial-Messwert an Position 9:00 Uhr
M0	=	Rechter Radial-Messwert an Position 12:00 Uhr
M3	=	Rechter Radial-Messwert an Position 3:00 Uhr
M6	=	Rechter Radial-Messwert an Position 6:00 Uhr
M9	=	Rechter Radial-Messwert an Position 9:00 Uhr
D	=	Abstand zwischen linker und rechter Messuhr
C	=	Abstand zwischen linker Messuhr und Kupplungsmitte
SS	=	Durchhang der linken Radialmessuhr*
MS	=	Durchhang der rechten Radialmessuhr*

\*Diese Werte können positiv oder negativ sein.

Die Korrektur an den Füßen der rechten Maschine kann folgendermaßen berechnet werden:

Unterlegwert, vordere Füße =  $(VW \times sL) - VP$

Unterlegwert, hintere Füße =  $(VW \times sR) - VP$

Positive Ergebnisse bedeuten, dass Passplatten untergelegt werden müssen. Negative Ergebnisse bedeuten, dass Passplatten entfernt werden müssen.

Verschiebewert, vordere Füße =  $(HW \times sL) - HP$

Verschiebewert, hintere Füße =  $(HW \times sR) - HP$

Positiv bedeutet, in Richtung 3:00 Uhr bewegen. Negativ bedeutet, in Richtung 9:00 Uhr bewegen.

sL = Entfernung von Kupplungsmitte zu den linken Füßen der rechten Maschine

sR = Entfernung von Kupplungsmitte zu den rechten Füßen der rechten Maschine

Falls die Messuhren an Position 12:00 Uhr auf Null eingestellt und dann an Position 6:00 Uhr abgelesen werden, werden die Unterlegwerte folgendermaßen berechnet:

Unterlegwert, vordere Füße =  $(S6 - SS + M6 - MS)(C + sL) / 2D - (S6 - SS) / 2$

Unterlegwert, hintere Füße =  $(S6 - SS + M6 - MS)(C + sR) / 2D - (S6 - SS) / 2$

Positive Ergebnisse bedeuten, dass Passplatten untergelegt werden müssen. Negative Ergebnisse bedeuten, dass Passplatten entfernt werden müssen.

Falls die Messuhren an Position 3:00 Uhr auf Null eingestellt und dann an Position 9:00 Uhr abgelesen werden, werden die Verschiebewerte folgendermaßen berechnet:

$$\text{Verschiebewert, vordere FüÙe} = (S9 + M9)(c + sL)/2D - S9/2$$

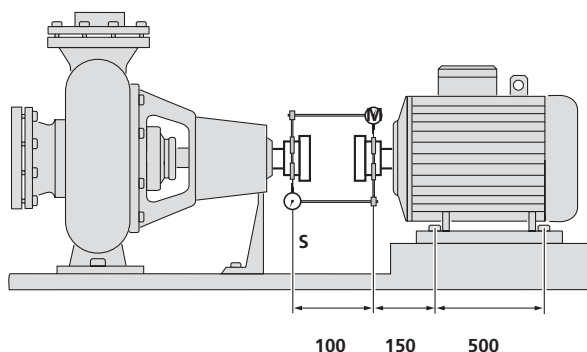
$$\text{Verschiebewert, hintere FüÙe} = (S9 + M9)(c + sR)/2D - S9/2$$

Positiv bedeutet, in Richtung 3:00 Uhr bewegen. Negativ bedeutet, in Richtung 9:00 Uhr bewegen.

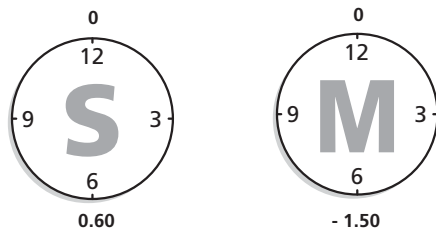
Durchhang – siehe Hinweise in folgendem Abschnitt.

### Das Doppelradial-Messuhrenverfahren – Grafische Darstellung

Die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Berechnungen wirken auf viele Ingenieure abschreckend. Im Gegensatz zum Radial-Axial-Verfahren ist bei dieser Messart die Methode der wiederholten Messung und Ausrichtkorrektur nicht anwendbar. Die mathematischen Berechnungen können jedoch umgangen werden, indem man eine grafische Lösung anwendet, um den Ausrichtzustand und ggf. notwendige Korrekturmaßnahmen zu ermitteln.

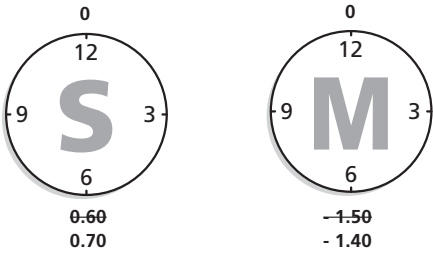


Die Abbildung oben zeigt einen typischen Messuhrenaufbau für die Doppelradial-Messung. Die rechte Maschine ist die zu bewegend Maschine. Beide Messuhren werden an der 12:00 Uhr Position auf Null eingestellt. Die Blickrichtung ist von der zu bewegend Maschine zur stationären Maschine. Die Welle wird um 180 Grad in Betriebsrichtung gedreht. Die Meßuhren werden abgelesen und die Messwerte notiert. Als Beispiel gehen wir von folgenden Messwerten aus.



*Alle Werte in mm*

Der Durchhang des Messuhrengestänges beträgt 0,1 mm.  
Die korrigierten Messwerte der Messuhren sehen wie folgt aus.

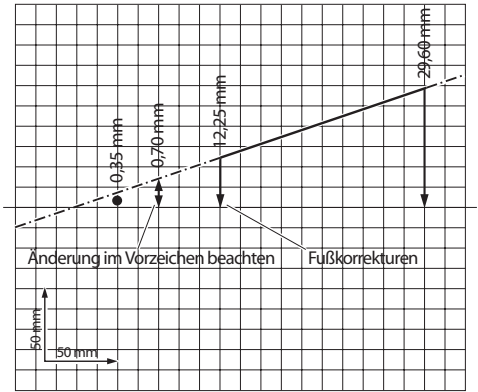


Die korrigierten Messwerte werden durch zwei geteilt, um den tatsächlichen Versatz der Welle zu erhalten.

Parallelversatz S =  $+0,70/2 = +0,35$  mm

Parallelversatz M =  $-1,40/2 = -0,70$  mm.

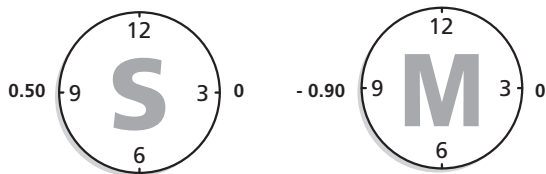
Diese Versatzwerte werden dann wie folgt im Diagramm eingetragen.



Beide Messuhren werden an der Position 3:00 Uhr auf Null eingestellt. Die Wellen werden um 180 Grad in Betriebsrichtung gedreht. Die Messwerte werden notiert. Wenn die Wellen wieder auf 3:00 Uhr zurück gedreht werden, sollten die Messuhren wieder auf Null stehen (Kontrolle).



Gehen wir von folgenden Messwerten aus:



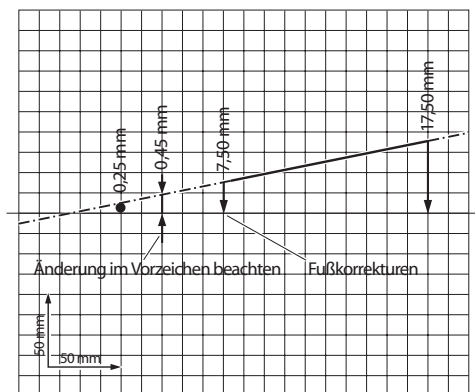
Korrekturwerte für den Durchhang des Meßuhrengestänges entfallen bei der waagerechten Messung.

Die Meßwerte müssen durch zwei geteilt werden, um den tatsächlichen Wellenversatz in den Ebenen der Messuhren zu erhalten.

$$\text{Parallelversatz S} = +0,50/2 = +0,25 \text{ mm}$$

$$\text{Parallelversatz M} = -0,90/2 = -0,45 \text{ mm}$$

Diese Versatzwerte werden dann wie folgt im Diagramm eingetragen.



Die vertikalen und horizontalen Korrekturen an den Füßen werden in den beiden Diagrammen dargestellt. Die Korrekturen sind darauf basiert, dass das Ausrichtungsziel in der vertikalen und horizontalen Ebene 0,0/0,0 ist. Etwaige Herstellerdaten oder Werte, die für die thermische Ausdehnung berechnet wurden, sollten in diesen Korrekturen oder in den ursprünglichen Messungen an den Messuhren berücksichtigt werden.

### **Messung des Durchhangs**

Um den Durchhang zu messen, montieren Sie die gesamte Messapparatur (Halterungen, Stangen und Messuhren) auf einem Stück stabilem Rohr. Befestigen Sie die Halterungen im gleichen Abstand, den sie später auf der eigentlichen Maschine haben werden. Montieren Sie die Messuhren ebenfalls so, dass sie möglichst genau ihrer Position auf der Maschine entsprechen. Positionieren Sie die Messuhren nun auf 12:00 Uhr und stellen Sie sie auf Null. Drehen Sie das Rohr, bis die Messuhren auf 6:00 Uhr stehen. Lesen Sie den Messwert ab und notieren Sie ihn. Die Radial-Messuhr wird einen negativen Wert aufweisen. Die Axial-Messuhr wird einen positiven oder negativen Wert aufweisen, der aber um Null liegen sollte.

**Wellenausrichtung mit dem Laser**

Die laseroptische Wellenausrichtung wurde Mitte der achtziger Jahre populär, als die Firma PRÜFTECHNIK das erste rechnergestützte, im Handel erhältliche Laserausrichtsystem OPTALIGN auf dem Markt einführte. Das System gewann weltweit in einer Vielzahl von Prozessindustrien schnell an Beliebtheit bei den Ingenieuren und Firmen. OPTALIGN stellte viele wesentliche Vorteile zur Verfügung, die eine schnelle und genaue Ausrichtung von gekoppelten rotierenden Maschinen ermöglichte. Seit der Einführung des ersten Systems haben Fortschritte in Laser- und Mikroprozessortechnik eine neue Generation an Lasersystemen entstehen lassen.

Wie wir bereits in den vorangehenden Abschnitten gesehen haben, gibt es eine Anzahl wichtiger Faktoren, die bei der Anwendung von mechanischen Methoden der Wellenausrichtung berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus können Berechnungen der Ausrichtkorrekturen kompliziert und fehleranfällig sein. Keine dieser Faktoren müssen bei der Laserausrichtung berücksichtigt werden. Sobald die Lasermethode in einer Fabrik vorhanden ist, besteht Zugang zu präziser Wellenausrichtung sowie zu den Vorteilen, die diese Methode mit sich bringt (siehe nächsten Abschnitt).

Hier sind einige der Vorteile der laseroptischen Ausrichtung zusammengefasst:

- Präzises Ausrichten ohne Eingabe von Messwerten, grafischen und numerischen Berechnungen.
- Grafische Anzeige der Ausrichtergebnisse in der Kraftübertragungsebene der Kupplungen und Unterleg- und Verschiebekorrekturen an den Maschinenfüßen.
- Keine mechanischen Hebelarme, die Messwerte beeinflussen
- Demontage von Kupplungen bei der Meßwertaufnahme nicht erforderlich
- Keine fest vorgegebenen Messpositionen für die Messwertaufnahme erforderlich, z. B. 12:00, 3:00, 6:00 und 9:00 – Ergebnisse bereits nach einer Wellendrehung von weniger als 90 Grad verfügbar!
- Ergebnisse können gespeichert und ausgedruckt werden

- Kalibrierung der Mess-Systeme nach ISO 9001 inkl. Zertifikat
- Universal einsetzbare Spannvorrichtungen für nahezu alle Ausrichtapplikationen.
- Spezielle Benutzeroberflächen ermöglichen den Einsatz des Gerätes durch ein breites Spektrum an technischer Kompetenz und Fachwissen
- Anzeige der vertikalen und horizontalen Korrekturen in Echtzeit während der Maschinenbewegung
- Integrierte Toleranztabellen, die dem Anwender mitteilen, ob sein Ausrichtzustand schlecht, akzeptabel oder exzellent ist.

Neben dem Nutzen und den Vorteilen des laseroptischen Ausrichtens ist es wichtig, die Funktionalität aufzuführen, die dem Anwender beim Ausrichten entgegenkommt.

Auf dem Markt sind eine Reihe von Systemen verschiedener Hersteller erhältlich.

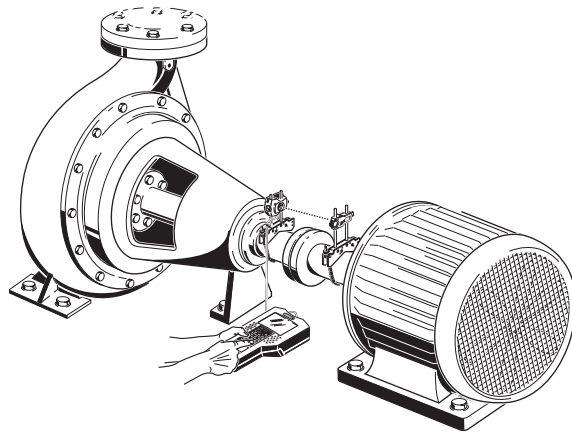
Als Mindestanforderung sollte das System, dass Sie wählen, folgende Leistungsmerkmale anbieten:

- **Kalibrierung des Systems nach ISO 9001 inklusive Zertifikat.** Es hat keinen Sinn, ein System für Wellenausrichtung zu kaufen, dessen Messgenauigkeit nicht zertifiziert werden kann.
- **Hohe Genauigkeit und Wiederholbarkeit.** Schlechte Genauigkeit führt zwangsläufig zu falschen Korrekturwerten. Hohe Wiederholbarkeit bedeutet, dass weniger Messungen für die Berechnung genauer Ergebnisse erforderlich sind.
- **Stabil, staub- und wasserdicht, stoßfest.** Durch eine industrietaugliche Gehäuseausführung, IP 65 bei unseren Bedienteilen und IP 67 (staub- und tauchwasserdicht) bei unseren Sensoren, ist ein sicheres, störungsfreies Arbeiten auch in rauhesten Industrieumgebungen gewährleistet.
- **Feststehende Füße.** Die Möglichkeit, die feststehenden Füße an Aggregaten frei zu wählen, bietet dem Anwender optimale Flexibilität und die Fähigkeit, mit unbeweglichen Füßen an der Maschine umzugehen. Alle Alternativen zur Bewegung der Maschine können aufgezeigt werden.

- **Wiederaufnahme von Messungen.** Die Wiederaufnahme von Messungen ermöglicht es Ihnen ohne weiteres ein bereits begonnenes Ausrichtverfahren nach einer Unterbrechung oder an einem anderen Tage wieder aufzunehmen. Der Benutzer muss die Dimensionen und Ausrichtziele nicht erneut eingeben. Auch die Messergebnisse werden gespeichert. Daten gehen nicht verloren.
- **Erweiterung des Messbereichs.** Die Fähigkeit, den Messbereich zu erweitern stellt sicher, dass das Lasersystem jede Ausrichtaufgabe meistern kann, unabhängig von der Stärke der Fehlausrichtung. Die Messung großer Fehlausrichtungen an langen und mittellangen Zwischenwellen ist durch statische Detektorsysteme nicht möglich.
- **Große Auswahl an Spannvorrichtungen.** Ein breites Spektrum an Spannvorrichtungen ermöglicht die schnelle Montage der Sensorik an nahezu jeder Maschinenausführung.
- **Toleranzen (TolCheck).** Integrierte Ausrichttoleranzen sparen Zeit. Es werden keine unnötigen Maschinenkorrekturen vorgenommen. Die automatische Toleranzüberprüfung zeigt an, wann der Anwender seine Ausrichtarbeit erledigt hat.
- **Berichterstellung direkt aus dem Gerät.** Direkte Berichterstellung bedeutet schnellere Ausgabe von Berichten **an jeden Drucker**. Seriennummer, Datum, Uhrzeit und Benutzername werden im Bericht eingetragen. Somit wird z.B. den ISO 9000 Anforderungen an Rückverfolgbarkeit vollständig entsprochen.

### Lasersysteme – Grundregeln der Bedienung

Es gibt zwei grundlegende Arten von Lasersystemen. Die eine Art verwendet einen einzelnen Laserstrahl, der entweder auf einen Detektor projiziert wird oder auf einen Reflektor einstrahlt, der den Laserstrahl wieder zurück zum Laserdetektor sendet. Die andere Art verwendet zwei Laser mit eingebauten Detektoren. Das Einzellaserprinzip ist ein patentiertes System, das ausschließlich von der Firma PRÜFTECHNIK eingesetzt wird. Das Zweilaserkonzept wird von allen anderen Systemen verwendet.



Das Ein-Lasersystem, welches oben in der Abbildung dargestellt ist, weist eine Vielzahl an Vorteilen auf, durch die die Einsatzflexibilität und Bedienbarkeit des Systems optimiert wurde.

**Erweiterung des Messbereichs** – Der Messbereich des Ein-Lasersystems ist beliebig erweiterbar. Siehe spätere Erklärung.

**Hohe Flexibilität** – Bei dem Einsatz des Ein-Laser-Messsystems können Maschinen ausgerichtet werden, an denen Zwischenwellen oder Kupplungen noch nicht montiert sind. Jede Maschine kann unabhängig von der anderen gedreht werden. Dieses ist besonders nützlich an Maschinen mit großen Zwischen- oder Hydraulikkupplungen, z. B. Turbinen, deren Wellen nur schwer gedreht werden können.

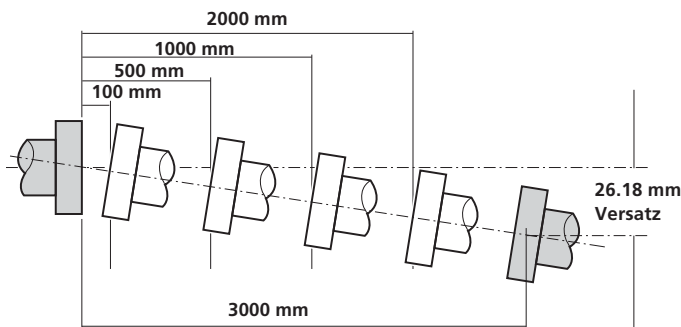
**Ein-Kabel-Technik** – Diese Technik ist besonders vorteilhaft bei langen Zwischenwellen wie bspw. bei Kühlturmantrieben.

**Nur ein Laser muß eingestellt werden** – An langen Zwischenwellen oder großen Maschinen ist das Einrichten der Messung stark vereinfacht, da nur eine feste Messposition einzustellen ist.

### Erklärung der Erweiterung des Messbereichs

Warum ist es nützlich, den Bereich der Detektorebene an einem Laserausrichtsystem erweitern zu können? Sicherlich wäre es doch besser, eine größere Detektorfläche zu haben. Nun ja, in der Theorie wäre es nützlich eine statische Detektorebene von 500 mm zu haben. Das System wäre dann aber aufgrund seiner Größe und seines Gewichts nicht mehr nutzbar. Ein idealer Kompromiss ist, die Detektorebene dynamisch zu erweitern, wenn es erforderlich wird. Dadurch werden Größe und Gewicht des Systems klein gehalten, wodurch es an schwer zugänglichen Stellen um so nützlicher ist.

Wir verwenden als Beispiel den Antrieb eines Kühlturms, der mit einer Zwischenwelle von 3000 mm Länge ausgerüstet ist. Der Parallelversatz zwischen Antrieb und angetriebenen Wellen kann erheblich sein, auch bei nur geringem Winkelversatz zwischen den Wellen.



Obige Abbildung veranschaulicht die Einschränkungen bei langen Zwischenwellen. Nehmen wir als einfaches Beispiel eine Kupplung mit einer Winkelfehlausrichtung von **0,5 Grad**.

Über eine einfache Standardkupplung mit einer Länge von 100 mm führt dies zu einem Parallelversatz von 0,87 mm. Dieser Versatz kann leicht von jedem Lasersystem gemessen werden. Falls aber die Entfernung zwischen den Kupplungsflächen auf 500 mm ansteigt, vergrößert sich der Parallelversatz der Mittellinien auf 4,36 mm, und liegt somit außerhalb des Messbereichs der meisten statischen Laserdetektorsystemen.

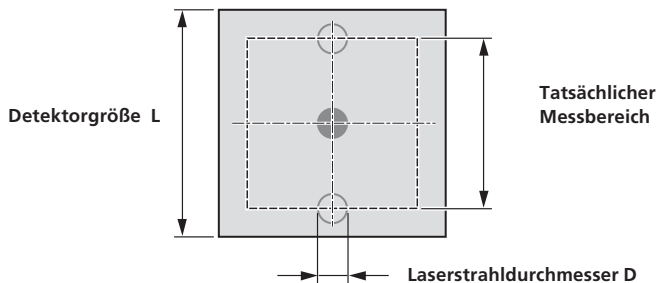
Nun vergrößern wir die Entfernung auf 1000 mm. Es ergibt sich ein Parallelversatz von 8,72 mm.

Je länger die Kupplungszwischenwelle, desto größer der Versatz. Bei 3000 mm stellt sich ein massiver Parallelversatz von 26,18 mm ein - und dies bei nur 0,5 Grad Winkelfehler zwischen den Drehachsen der Wellen.

Dieser große Versatz kann nur durch eine dynamische Messbereichserweiterung gemessen werden, da ein statisches Detektorfeld von rund 60 mm erforderlich wäre, um diesen Versatz auszuwerten.

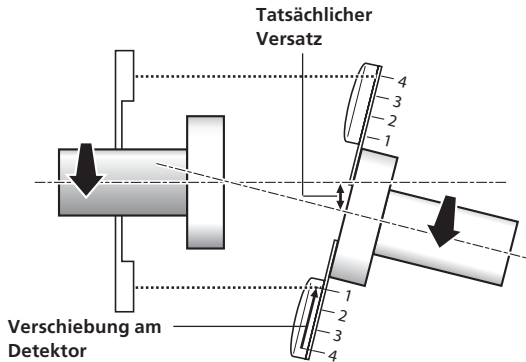
Der Grund für die beträchtliche Größe dieses Detektors wird nachfolgend erklärt:

Der Arbeitsbereich des Detektors ist kleiner als die physikalische Detektorfläche. Zum Beispiel, bei einer Detektorfläche von 20 x 20 mm und einem Laserstrahl mit einem Durchmesser von 4,0 mm, beträgt der maximal brauchbare Messbereich 16 mm, wie in folgendem Diagramm dargestellt.





Um den Versatz messen zu können, muss der Detektorbereich zweimal so groß sein wie der zu messende Versatz an sich. Wie auch bei Messuhren, misst der Laserempfänger doppelt den physikalischen Versatz der beiden Wellen, wie in folgender Abbildung veranschaulicht.

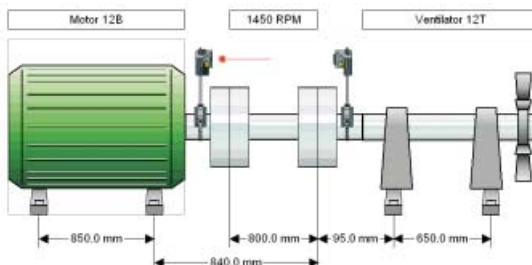


Um also einen physikalischen Versatz von 2,0 mm zu messen, brauchen wir einen Messbereich am Detektor von 4,0 mm.

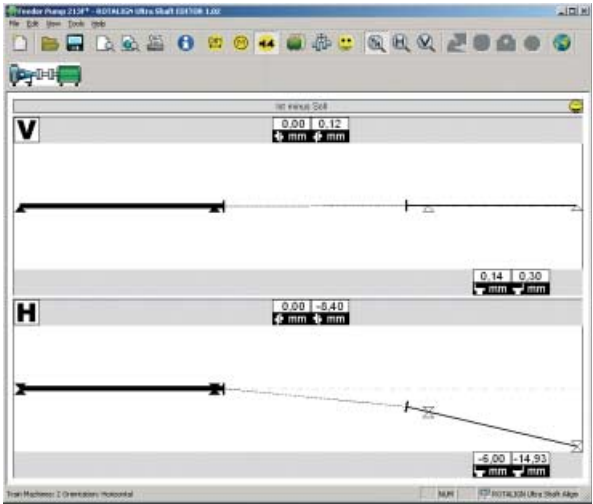
Sie denken sich vielleicht, dass die Fähigkeit, den Messbereich zu erweitern bei der Messung von Kühlturmantrieben und anderen langen Zwischenwellen ganz interessant sein mag, wozu aber braucht man sie wenn die größte Zwischenwelle nicht länger als 1 Meter ist?

Ein Beispiel der Nützlichkeit der Erweiterung des Messbereichs wird nachfolgend anhand einer realen Applikation illustriert.

Eine Motor-Ventilator-Kombination wurde wie unten abgebildet gemessen.



Die Länge der Zwischenwelle betrug 800 mm.  
Gemessener Versatz und Klaffung waren:  
Vertikal: 0,00 Versatz 0,72 mm Klaffung  
Horizontal: 0,00 Versatz 1,05 mm Klaffung



Um diese Messung zu ermöglichen, müssen die Detektoren einen Versatz von 8,40 mm messen können. Dafür muss der Detektorbereich 20,8 mm betragen. Dieses ergibt sich aus folgender Formel:

Gemessener Versatz x 2 + Laserstrahldurchmesser,  
 $(8,4 \text{ mm} \times 2) + 4 \text{ mm} = 20,8 \text{ mm}.$

Abhängig von den speziellen Anforderungen der täglichen Ausrichtaufgaben könnte die Fähigkeit des Systems, den Detektorbereich zu erweitern, der Hauptfaktor sein, der zu einer Entscheidung für ein bestimmtes Messsystem führt. Ganz egal für welches Laserausrichtsystem Sie sich letztendlich entscheiden, Ihr Unternehmen wird dadurch auf jeden Fall erhebliche Vorteile haben, wie die folgenden Fallbeispiele zeigen.

**Laserausrichtung reduziert Energiekosten**

An einer großen Chemiefabrik in Großbritannien wurde eine Studie durchgeführt, in der die Auswirkung von schlecht ausgerichteten Wellen auf den Energieverbrauch der Fabrik untersucht wurde. Die Studie lief über einen Zeitraum von sechs Wochen in einer kontrollierten Umgebung, die akkurat die Betriebsbedingung der Anlage widerspiegelte.

Für die Untersuchung wurde eine 7,5 kW Pumpvorrichtung einer redundanten Anlage verwendet. Vor Beginn des Projekts wurden Pumpe und Motor ausgebaut und in der Werkstatt mit neuen Lagern versehen. Beide Einheiten wurden erneut ausgewuchtet, um externe Faktoren, die die Projektergebnisse verfälschen könnten, zu eliminieren. Scheiben und Verstellerschrauben wurden an der Motoraufgabe angebracht, um eine Feinjustierung der Ausrichtung zu ermöglichen. Die Pumpvorrichtung wurde installiert, um damit Wasser durch einen geschlossenen Kreislauf zu pumpen bei einer Motordrehzahl von 3000 U/min (+/- 1% aufgrund von Variationen im Belastungszustand). Installiert wurden Pumpe und Motor anfangs mit einer gemessenen Ausrichtung von 0,00 Klaffung und Versatz in der Vertikalen und Horizontalen. Das System wurde unter diesen Bedingungen über einige Tage betrieben und die Stromaufnahme wurde alle paar Stunden gemessen. Über den Versuchszeitraum wurde die Ausrichtung der Maschinen mehrmals verändert. Bei jeder Fehlausrichtung wurden die Maschinen über einen festen Zeitraum betrieben und die Stromaufnahme in regelmäßigen Abständen gemessen.

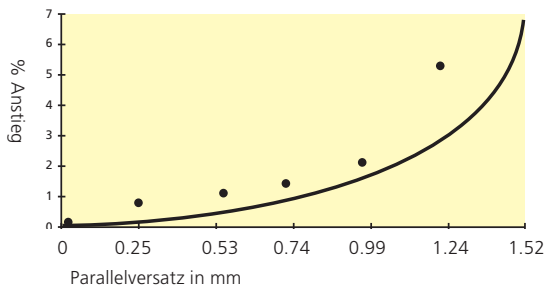
In der gesamten Anlage gab es hauptsächlich zwei verschiedene Kupplungstypen: Bolzenkupplungen und Reifenkupplungen. Um ein verlässliches Bild der potentiellen Einsparungen in der Anlage zu erhalten, wurden beide Kupplungstypen mit der gleichen Fehlausrichtung und Stromaufnahme installiert.

Die Ergebnisse dieser Studie sind in folgenden Diagrammen dargestellt. Parallelversatz hatte einen größeren Einfluss auf die Leistungsaufnahme als der Winkelversatz; winkelige Fehlausrichtung hatte bei Bolzenkupplungen eine größere Auswirkung auf die Leistungsaufnahme als bei Reifenkupplungen.

Die Komponenten der Fehlansrichtung addierten sich auf , unabhängig davon, ob die Fehlansrichtung vertikal oder horizontal war.

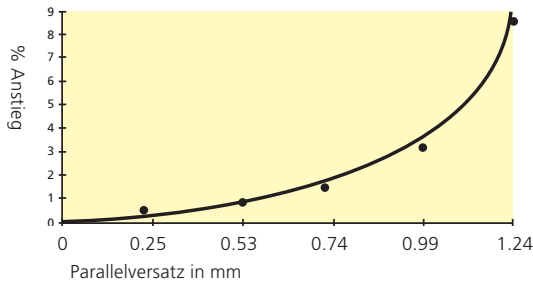
Auswirkungen auf Leistungsaufnahme

Elastische Bolzenkupplung bei 3000 U/min



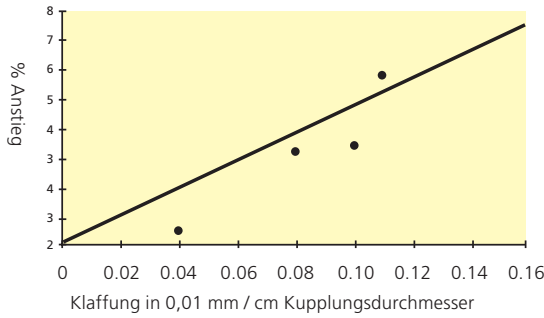
Versatz	%
0,03 mm	0,0
0,25 mm	0,7
0,53 mm	1,0
0,73 mm	1,3
0,99 mm	2,0
1.24 mm	5,2
1.24 mm	6,6

Reifenkupplung bei 3000 U/min

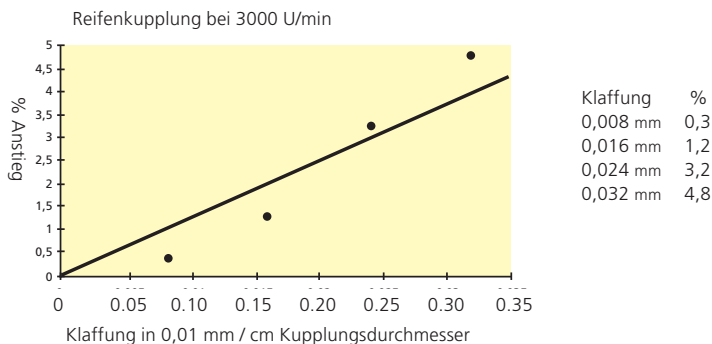


Versatz	%
0,03 mm	0,0
0,25 mm	0,7
0,53 mm	1,0
0,74 mm	1,3
0,99 mm	2,8
1.24 mm	8,5

Elastische Bolzenkupplung bei 3000 U/min



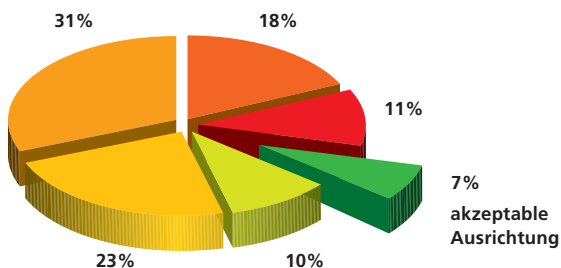
Klaffung	%
0,004 mm	0,3
0,008 mm	3,1
0,010 mm	3,3
0,011 mm	5,7
0.016 mm	7,8



Aus diesem Projekt ging folgende Toleranzen-Empfehlung hervor, die im gesamten Unternehmen berücksichtigt wird: Die Maschinen sollen mit einem Parallelversatz von maximal 0,15 mm und einer Klaffung von maximal 0,05 mm pro 100 mm Kupplungsdurchmesser ausgerichtet werden.

Um die Kosteneinsparungen abzuschätzen, die aus diesem neuen Betriebsstandard hervorgehen, wurde die Ausrichtung von nach dem Zufallsprinzip ausgesuchten Maschinen gemessen, um somit die Verteilung der Fehlausrichtungen im gesamten Unternehmen abschätzen zu können. Die Ergebnisse sind im folgenden Tortendiagramm dargestellt.

Fehlausrichtung von 160 nach dem Zufallsprinzip ausgesuchten Maschinen



Prozentuale Verteilung der ermittelten Versätze (in 1/100 mm) in der Kupplungsmitte. Untersucht wurden 100 Maschinen mit einer Drehzahl von 3000 U/min.

Weniger als 10% der gemessenen Maschinen lagen innerhalb der für die Anlage empfohlenen Ausrichtvorgaben.

Aus diesen Daten heraus wurde ein repräsentativer mittlerer Versatz von 0,35 mm geschätzt und als angemessener Wert für die Berechnung der potentiellen Energieeinsparungen der Anlage verwendet. Angesichts der Tatsache, dass die Leistungsaufnahme aller rotierenden Maschinen des Betriebs im Bereich von 30 Megawatt lag, konnte folgende Energieeinsparung vorausgesagt werden:

Bei Stromkosten von € 0,10 Euro pro kWh und einer konservativ abgeschätzten Energieeinsparung von 0,75%:

$30.000 \text{ kW} \times 0,75\% \times € 0,08 \text{ Euro} / \text{kWh} = € 18 \text{ Euro pro Stunde oder } € 135.147 \text{ Euro pro Jahr!}$

### **Die Laserausrichtung verbessert die Zuverlässigkeit von Pumpen**

Erhebliche Verbesserungen im Anlagenbetrieb wurden erzielt nach der Einführung eines durchgreifenden Pumpenausrichtungs- und Überwachungsprogramms an einer großen Azetatfabrik in Derbyshire, England.

Der Produktionsprozess erfordert, dass Material von einer Prozessstufe zur nächsten in der Fabrik gefördert wird. Es werden in der Anlage etwa 260 Pumpen eingesetzt und es ist deshalb unerlässlich, dass sowohl die Betriebsanlagen als auch die Reserveanlagen zuverlässig arbeiten und jederzeit bereit stehen. Bis 1996 wurden Aggregate bis zum Ausfall betrieben (Feuerwehrmethode). Zu der Zeit überzeugte ein Betriebsingenieur die Betriebsleitung von der Notwendigkeit, eine proaktive Instandhaltung und Überwachung von Pumpen einzuführen. Mit PRÜFTECHNIK Laserausrichtsystemen und Geräten für die Zustandsüberwachung wurde ein koordinierter Plan für die Optimierung der Anlagenleistung umgesetzt.

In den vorangegangenen Jahren wurden jährlich schätzungsweise 120 Pumpen repariert, was Kosten in Höhe von ca. € 147.000 Euro pro Jahr verursachte. Der kalkulierte mittlere Ausfallabstand („MTBF“) dieser Pumpen betrug 10 Monate.

Durch die Laserausrichtung neu instandgesetzter und im Betrieb befindlicher Aggregate sowie regelmäßige Zustandsüberwachung der Anlagen mit einer gründlichen

Untersuchung der installierten Bauteile wie Dichtungen und Lager, ergab sich für den Betrieb eine wesentliche Einsparung in der Instandhaltung der so wichtigen Pumpenanlagen.

Das mittlerweile bestens etablierte Programm hat einen beträchtlichen Nutzen mit sich gebracht. Die Zuverlässigkeit der Anlagen ist auf einen mittleren Ausfallabstand („MTBF“) von über 46 Monate angestiegen und routinemäßige Pumpenreparaturen wurden stark reduziert.

Die kalkulierten Ersparnisse liegen nun bei über € 120.000 Euro pro Jahr, und vier Jahre nach Beginn des Programms in Summe im Bereich von € 650.000 Euro.

Um diese außerordentlichen Ersparnisse zu realisieren, wurde von den Ingenieuren ein umfassender Aktionsplan umgesetzt. Die Haupterfolgsk Faktoren waren:

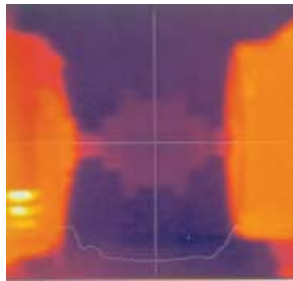
- Das Bekenntnis der Ingenieure und Betriebsleiter zu diesem Programm
- Geduld
- Laseroptisches Ausrichten
- Zustandsüberwachung
- Schulung
- Ursachenanalyse
- Sorgfältiges Auswählen von mechanischen Dichtungen
- Sorgfältiges Auswählen von Lagern
- Partnerschaft mit Lieferanten
- Verbesserte Ausführung und Installation von Rohren
- Bedachtes Auswählen von Pumpen
- Auswahl von fortschrittlichen Schmiersystemen

### Die Laserausrichtung verlängert die Lebensdauer von Lagern und Dichtungen

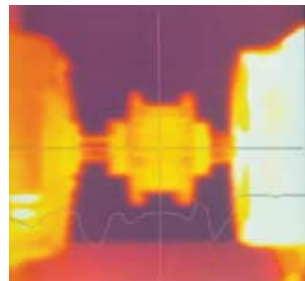
Eine Studie über die Auswirkung von Fehlausrichtungen auf kritische Maschinenbauteile wie Lager, Dichtungen und Kupplungen wurde durch das Infrascpection Institute in den USA durchgeführt.

Im Rahmen einer Prüfserie wurde ein Aggregat aus Pumpe und Motor fehlausgerichtet. Bei jeder neuen Fehlausrichtung wurden thermographische Bilder aufgenommen, um den Temperaturanstieg an den kritischen Bauteilen aufzuzeigen.

Die Prüfungen wurden an einer breiten Vielfalt von flexiblen Kupplungen vorgenommen. Ohne Ausnahme zeigten alle Kupplungen, Lager und Maschinengehäuse (und deshalb auch die Dichtungen) einen erheblichen Temperaturanstieg. Das folgende Bild zeigt die Auswirkung von Fehlausrichtung auf Bauteile, wenn das Aggregat mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm ausgerichtet ist, verglichen mit einer Fehlausrichtung von  $+ 0,5$  mm.



Ausgerichtet mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,05$  mm.



Fehlausrichtung von  $+ 0,5$  mm.

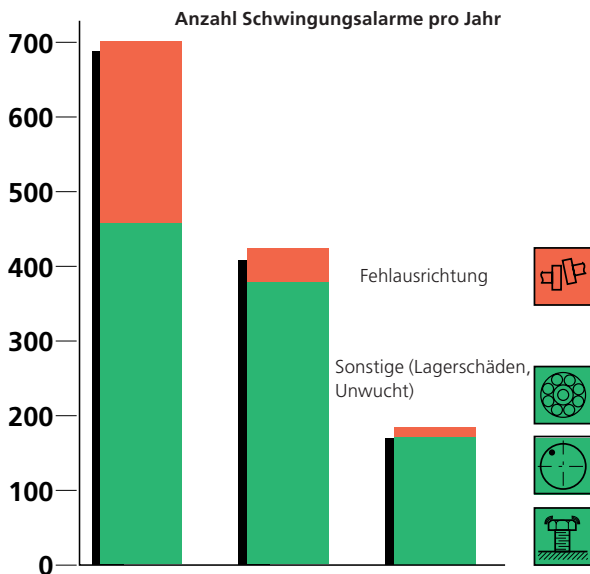
Es wird nicht nur deutlich, dass sich die flexiblen Elemente der Kupplung erwärmen, sondern auch die Maschinen an sich weisen erhöhte Temperaturen im Bereich des Lagergehäuses auf. Weder Lager noch Dichtungen sind für einen Dauerbetrieb bei erhöhter Temperatur aufgrund von Fehlausrichtungen ausgelegt. Die unausweichliche Folge des Betriebs unter diesen Bedingungen ist der vorzeitige Ausfall des Bauteils und eine Verkürzung der Maschinenlebensdauer.

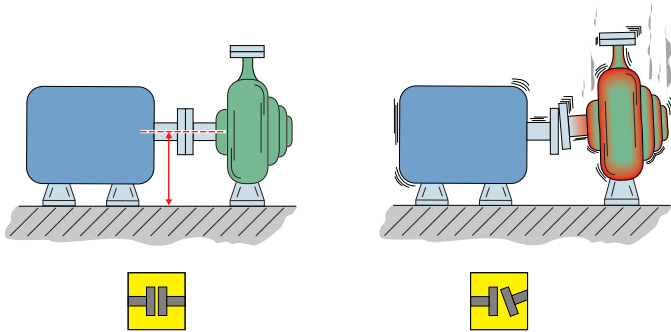


### Laserausrichtung reduziert Schwingungsalarme

Im Zeitraum von 1987 bis 2000 führte eine große Ölraffinerie in Großbritannien als Standardstrategie für alle gekuppelten rotierenden Maschinen das laseroptische Wellenausrichten ein. Dazu wurden das OPTALIGN System von PRÜFTECHNIK und später das ROTALIGN System eingesetzt. Über diesen Zeitraum wurden zudem die Vorfälle überwacht, bei denen es zu Schwingungsalarmen kam und wie laseroptisches Wellenausrichten dazu beitragen konnte, deren Häufigkeit zu reduzieren. Die Alarme wurden kategorisiert in „Probleme aufgrund von Fehlausrichtung“ und „sonstige Probleme wie Lagerschäden, Unwucht und Lockerungen“.

Das von der Firma zur Verfügung gestellte Diagramm macht deutlich, dass es gelungen ist, die Anzahl der Alarme erheblich zu verringern, wobei Probleme, die auf Fehlausrichtungen zurückzuführen waren, so gut wie vollständig eliminiert wurden.





### Thermische Ausdehnung

Bis jetzt haben wir in diesem Handbuch in den meisten Fällen nur die Ausrichtung von rotierenden Maschinen im kalten Zustand betrachtet. Bei größeren Maschinenanlagen und bei Maschinen, bei denen eine Komponente der Anlage mit einer höheren Temperatur betrieben wird, müssen die Auswirkungen des thermischen Wachstums (oder Schrumpfens) auf die Ausrichtung der Maschine berücksichtigt werden. Es hat keinen Zweck, einen Maschinenstrang im kalten Zustand genauestens auszurichten, wenn sich dieser Zustand bei Betriebsbedingungen wieder verändert. Es gibt mehrere Methoden, die richtige Ausrichtung unter Betriebsbedingungen herauszufinden.

- Die Hersteller können in der Regel Informationen zum thermischen Maschinenwachstum zur Verfügung stellen.
- Berechnungen können mithilfe des spezifischen Ausdehnungs-Koeffizienten durchgeführt werden, der das thermische Wachstum des Werkstoffs beschreibt – siehe nachfolgende Seiten.
- Online-Messungen des Ausrichtzustandes können unter kalten und heißen Bedingungen mittels kontaktierender oder kontaktfreier Ausrichtmessgeräte vorgenommen werden.

Die Abschätzung oder Berechnung der tatsächlichen Veränderung der Ausrichtung ist keineswegs ein einfaches Unterfangen. Bei komplexen Maschinensystemen wie z.B. Kompressoren, die eine Reihe von Maschinenbauteilen besitzen, jedes davon mit unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten und divergierendem Temperaturverhalten auf Grund der Geometrien, werden einfache Berechnungen des thermischen Wachstums äußerst komplex. In solchen Fällen ist normalerweise die Online-Messung der Maschinenbauteile unumgänglich. Hier bieten sich Lasersysteme wie das PRÜFTECHNIK PERMALIGN System als ideale Werkzeuge an. Systeme wie PERMALIGN müssen für den Langzeitbetrieb unter schwierigen Bedingungen konzipiert sein: oft bedeutet bereits das Montieren des Gerätes auf einer Turbine oder einen Kompressor, die bei über 300 °C betrieben werden, dass die Messsysteme gekühlt werden müssen, um Schäden oder falsche Messwerte zu verhindern.

Thermische Ausdehnung ist jedoch nicht die alleinige Ursache für Veränderungen in der Maschinenposition. Viele Faktoren können die Genauigkeit der Endergebnisse beeinträchtigen:

- Thermisches Wachstum der Lagergehäuse
- Veränderungen in den radialen bzw. axialen Kräften
- Veränderungen in der Ölfilmdicke in den Lagern
- Veränderungen im Fundament oder in der Grundplattenauflage
- Veränderungen in den Kräften angeschlossener Rohre und Leitungen.

### **Berechnung des thermischen Wachstums**

Falls Richtung und Ausmaß des Wachstums bekannt sind, können die Maschinen absichtlich so „falsch“ ausgerichtet werden, dass sie später in die richtige Ausrichtung hineinwachsen und für den normalen Betrieb dann gut ausgerichtet sind. smartALIGN®, OPTALIGN® PLUS Series, NOVALIGN® und ROTALIGN® Ultra verfügen über eine Sonderfunktion, die die Angabe solcher Ausrichtvorgaben ermöglicht.

Vorgabespezifikationen für die kalte Ausrichtung sind in der Regel von Maschinenherstellern erhältlich. Wenn diese Informationen nicht zur Verfügung stehen, werden folgende Kalkulationen bei der Bestimmung des thermischen Wachstums behilflich sein.

$$DL = L (a) (DT)$$

DL = thermisches Wachstum

L = Wellenachsenhöhe zur Maschinengrundplatte

a = Koeffizient für thermisches Wachstum des Werkstoffs

DT = Temperaturunterschied

Beispiel:

Eine Pumpe mit Flüssigkeitstemperatur 150 °C

Abstand der Maschinengrundplatte zur Wellenmitte: 70 cm.

Umgebungstemperatur: 10°C.

$$DL = L (a) (DT)$$

$$DL = 70 \text{ cm} (0,0000059) \times (150-10)$$

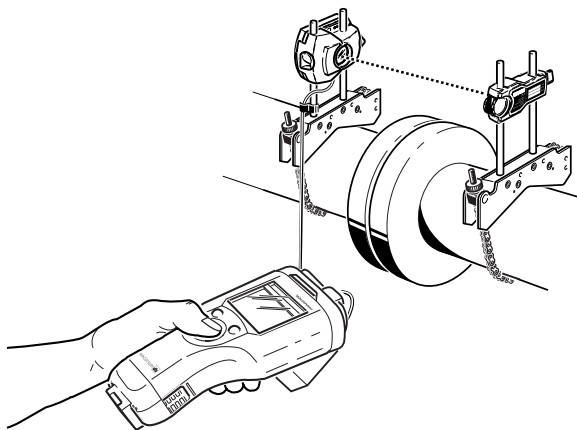
$$= 70 \text{ cm} (0,0000059) \times 140 = 0,0578 \text{ cm}$$

*(Manche leistungsfähige laseroptische Ausrichtsysteme wie ROTALIGN Ultra übernehmen für Sie diese Kalkulationen)*

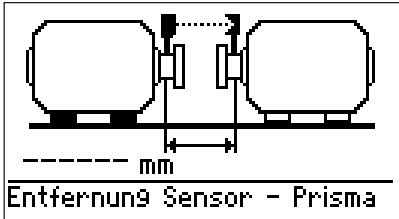
**Laserausrichtsystem smartALIGN®**

smartALIGN® ist ein äußerst flexibles laseroptisches Ausrichtsystem, das in erster Linie mit Blick auf die Bedienfreundlichkeit entwickelt wurde. Das System bietet viele innovative Funktionen, darunter:

- einhändige Bedienung per Joystick
- LED-Anzeige des Ausrichtzustandes zur Bewertung der Abweichung von Toleranzen
- Integrierte Hilfe-Funktion
- Upgrades über Internet garantieren Aktualität
- Hochauflösende hintergrundbeleuchtete Anzeige für alle Lichtbedingungen
- Speicherkapazität für 500 Einzelmessungen

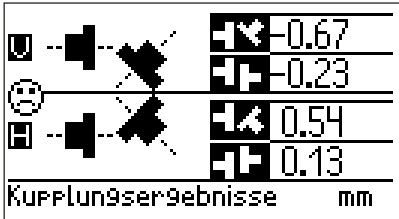


Basierend auf 25-jähriger Erfahrung im Wellenausrichten, verfügt smartALIGN® über die von PRÜFTECHNIK patentierte Einzellasertechnik und liefert somit jedesmal akkurate Ausrichtergebnisse, ganz egal mit welchen Schwierigkeiten und Einschränkungen die Messaufgabe belastet ist. Schritt für Schritt wird der Benutzer durch das Messverfahren geführt. Eingabeaufforderungen und direkte Hilfestellungen garantieren, dass jeder Benutzer innerhalb von Minuten eine genaue Wellenausrichtung durchführen kann.

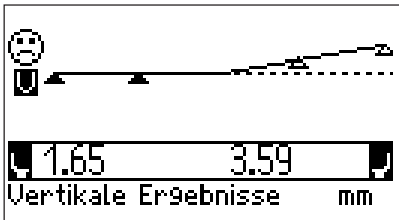
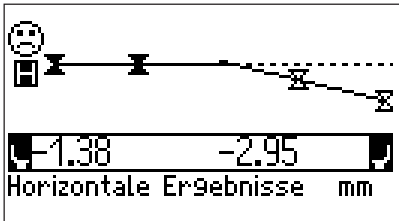


Eingabeaufforderungen am Bildschirm beseitigen jeden Zweifel

Bei einer Drehung von nur 60 Grad, mit beliebiger Startposition, liefert smartALIGN® Informationen zur Ausrichtung an der Kupplung und Korrekturwerte für das Unterlegen von Passplatten unter die Maschinenfüße.



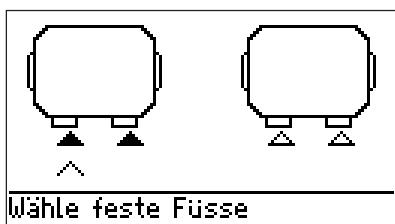
Die Kupplungsergebnisse zeigen den vertikalen und horizontalen Ausrichtungsstand über die Darstellung des Versatzes und der Klaffung an der gemessenen Kupplung.



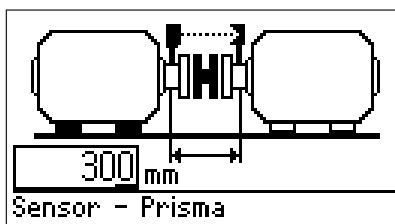
Horizontale und vertikale Fußkorrekturwerte geben eindeutige Hinweise auf die erforderlichen Korrekturen. In der Grafikanzeige wird der aktuelle Ausrichtungsstand mit den vorgegebenen Toleranzen verglichen.

Integrierte Ausrichttoleranzen ermöglichen es dem Benutzer, sofort die Ausrichtgenauigkeit zu bewerten. Die Erzeugung umfangreicher Berichte auf jedem handelsüblichen Drucker direkt vom smartALIGN® Rechner ermöglicht die sofortige Dokumentation des endgültigen Ausrichtzustandes.

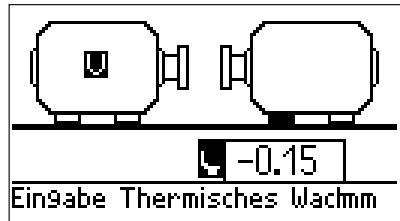
smartALIGN® bietet die Möglichkeit, aus einer Reihe von Ausrichtmессoptionen zu wählen, jede mögliche Kombination feststehender Füße zu definieren, Kupplungstypen zu definieren und Informationen zum thermischen Wachstum an Kupplungen und Füßen einzugeben. Damit liefert smartALIGN® alle Funktionen, die für laseroptische Ausrichtsysteme als unentbehrlich angesehen werden und mehr.



Mit der Möglichkeit, die feststehenden Maschinenfüße frei auszuwählen, kann man Probleme bei auf Anschlag befindlichen Maschinenfüßen leicht umgehen.

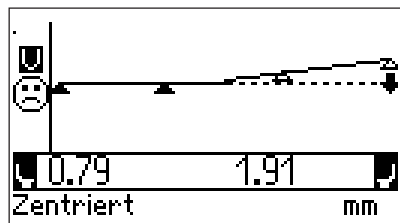


Die im System gespeicherten und auswählbaren Kupplungstypen liefern die tatsächlichen Verhältnisse der Kraftübertragung für eine korrekte Ausrichtvermessung.



Mit der Eingabe eines Versatzes, der thermisches Wachstum kompensiert, entfällt die Notwendigkeit, die Maschinen zuerst auszurichten und dann manuell zu verschieben.

Als weitere Unterstützung für ein schnelles und leichtes Wellenausrichten verfügt smartALIGN® über eine horizontale und vertikale Positionsüberwachung in Echtzeit („Live Move“). Mit ihr kann der Benutzer die Ausrichtkorrekturen auf dem Bildschirm verfolgen. Dabei wird die Idealposition angezeigt und der Benutzer erkennt sofort, wenn er sie erreicht hat. Dies ist besonders nützlich bei der horizontalen Verschiebung der Maschine und bei der Niederschraubung von Maschinen auf unebenen Fundamenten oder problematischen Maschinenbetten.



Wenn der „Smiley“ auf der „Move“-Anzeige erscheint, weiß der Benutzer, dass die Ausrichtung sich innerhalb der gewünschten Vorgaben für die jeweilige Maschinendrehzahl und dem Maschinentyp befindet.



## **Über PRÜFTECHNIK**

PRÜFTECHNIK ist ein international agierendes Unternehmen, das sich mit der Entwicklung, der Herstellung und dem Vertrieb von Mess- und Diagnostiksystemen in der Laserausrichtung, der Zustandsüberwachung und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung beschäftigt. Im Jahre 1972 von Herrn Dieter Busch in München gegründet, begann die PRÜFTECHNIK als Handelsvertretung mit einem Sortiment von Metalldetektorsystemen und Lagerprüfgeräten. Im Zuge des weiteren Aufbaus des Unternehmens entwickelte PRÜFTECHNIK in der Folgezeit selbst ihre eigene Familie an Wirbelstromprüfgeräten. Bald darauf folgte das weltweit erste laseroptische Ausrichtsystem OP-TALIGN. Schwingungsanalysesysteme und dynamische Auswuchtgeräte ließen nicht lange auf sich warten. Alle Geräte wurden unter dem Gesichtspunkt der simplen Handhabung und einfachen Anwendung entwickelt – ein Grundsatz der PRÜFTECHNIK.

Die Hauptgeschäftsstelle der PRÜFTECHNIK befindet sich in Deutschland, mit Tochterfirmen in Großbritannien, Belgien, den Niederlanden, Frankreich, Singapur, China, Italien, Spanien, Polen und den USA.

Hinzu kommt ein globales Netzwerk von über 60 selbstständigen Vertriebspartnern.

Für die PRÜFTECHNIK ist Kundennähe bis jetzt und in Zukunft die allerwichtigste Komponente des Unternehmenserfolges. Viele der jetzigen Produkte sind das Ergebnis langjähriger Kooperationen mit den Kunden. Bei der PRÜFTECHNIK ist die Nähe zum Markt nicht nur ein Sprichwort. Für uns ist es eine Verpflichtung!

Zusätzlich zu unserer konkurrenzlosen Produktpalette verfügt die PRÜFTECHNIK über eine internationale Schulungs-, Service- und Supportorganisation, die Produktschulungen, Beratungsdienste und spezialisierten Service anbietet, z.B. für Turbinenausrichtungen, oder die Installation, Inbetriebnahme und Planung von Zustandsüberwachungssystemen.

PRÜFTECHNIK hält für sein innovatives Produktspektrum über 200 Patente weltweit und 100 rechtlich geschützte Markenzeichen.

**Die Chronologie der Produktentwicklung:**

- 1976 Erstes Wirbelstromprüfgerät in modularer Bauweise für die zerstörungsfreie Untersuchung von Halbzeugen
- 1977 Erstes Wirbelstrom-Prüfgerät mit Mikroprozessor-Signalverarbeitung.
- 1980 EDDYTHERM® – Erstes mikroprozessorgesteuertes Induktions-Erwärmungsgerät für die Montage von Wälzlager.
- 1981 Erster Ausrichtcomputer für das Wellenausrichten mit LCD-Graphik-Display.
- 1982 Erster Hochleistungs-Induktionserwärmer für Großlager.
- 1983 OPTALIGN® – Erstes laseroptisches Wellenausrichtsystem.
- 1985 Erstes Wirbelstrom-Rotiersondensystem in coaxialer Bauweise
- 1987 PERMALIGN® – Erstes laseroptisches Koordinatenmesssystem für vier Freiheitsgrade
- 1988 EDDYCHECK 3 – Erstes rechnergestütztes Wirbelstromprüfgerät in Multifrequenz/Multikanal-Bauweise für die Rissprüfung an Halbzeugen
- 1989 SYSTEM 2® – Erstes Multifunktions-Messgerät mit Softkey-Benutzeroberfläche, steckbaren Programm- und Speicherkarten und steckbaren Hardware-Modulen für konfigurierbare Hardware-Optionen.
- 1990 Erster optischer 5-Achsen-Sensor, der einen auftretenden Laserstrahl simultan nach fünf Freiheitsgraden bewertet und das Ergebnis drahtlos über IR an den Computer übermittelt
- 1991 Erster ‚Tandem-Piezo-Aufnehmer‘ für Schwingungs- und Stoßmessung
- 1992 Erstes Diagnose- und Messsystem für rotierende Maschinen, mit dem Ausrichtzustände, Schwingungsanalyse (FFT), Betriebswuchten und Maschinendiagnose durchgeführt werden können
- 1992 XTECTOR® – Erster ‚intelligenter Sensor‘ für Schwingungs-, Wälzlager- und Kavitationsmessung.
- 1992 CENTRALIGN® – Erstes kommerziell verfügbares Messsystem für die Bestimmung des Ausrichtzustandes von Turbinengehäusen mit laseroptischen Verfahren

- 1993 VIBROTIP® – Erstes Multifunktions-Messgerät mit fünf verschiedenen Messfunktionen (Vibration, Kavitation, Stoßimpuls, Temperatur und Drehzahl), mit Speicher und Software für Trend und Archivierung von Messdaten
- 1993 Erster industrieller Schwingungsaufnehmer mit Line-Drive-Verstärker für den Einsatz unter erschwerten Umgebungsbedingungen; mit steckerlosem Kabelanschluss
- 1994 EDDYCHECK® 4 – Mehrkanal-Echtzeit-Wirbelstromprüfgerät mit Touch-Screen-Bedienerführung
- 1994 ROTALIGN® – Erstes industrietaugliches Wellenausrichtsystem (wasserdicht, stoß- und fallfest), mit patentierter Sweep-Messwertaufnahme
- 1995 VIBCODE® – ‚Verändert die Welt der Datensammler‘ – und korreliert automatisch die Messwerte mit dem Messort.
- 1995 Wirbelstromgerät zur Heissdrahtprüfung
- 1996 VIBRONET® – Erstes Schwingungs- und Stoßimpuls-Dauerüberwachungssystem in installationsfreundlicher Multiplex-Ausführung mit Strom-Line-Drive-Technik
- 1997 OPTALIGN® PLUS – Voll industrietaugliches, laseroptisches Ausrichtsystem mit sehr einfacher Benutzerführung
- 1998 Erstes, internetfähiges Tele-Diagnostiksystem für die Ferndiagnose und -analyse von Wälzlager und Getrieben, basierend auf VIBRONET® und dem Inter-mac-System der Schühle GmbH
- 1999 VIBROCORD® – Neuer FFT-Datensammler, industrietauglich und mit hohem Benutzerkomfort
- 2000 VIBSCANNER® – Erster Datensammler mit Ein-knopf-Bedienung und Multifunktions-Menüführung
- 2000 EDDYCHECK® 5 – Digitales 2-Kanal-Wirbelstromprüfgerät, netzwerkfähig, Touch-Screen-Display
- 2002 smartALIGN® – Das erste Wellenausrichtsystem mit Joystick-Steuerung
- 2003 LEVALIGN® – Ebenenvermessung von Maschinenbetten und Fundamenten auf Basis des ROTALIGN PRO
- 2004 ROTALIGN® Ultra – Erster Laserausrichtgerät mit farbigem Bildschirm und alphanummerischer Tastatur
- 2005 LEVALIGN® Ultra – Ebenheitsmessung auf höchstem Niveau

## **PRÜFTECHNIK Alignment Systems Produkte und Dienstleistungen**

### **Wellenausrichten**

#### **pocketALIGN® Wellenausrichten mit dem PDA**



Die einfache graphische Benutzerführung, kombiniert mit der bewährten Sensorik von PRÜFTECHNIK, macht Ihren Palm™ oder PocketPC zu einem handlichen und vielseitigen Instandhaltungsinstrument.

## **OPTALIGN® PLUS Series**

### **Individualität als Standard**



OPTALIGN® PLUS Series ist die Basis auf der die PRÜFTECHNIK-Familie von laseroptischen Ausrichtsystemen aufgebaut ist. Mit großer grafischer Anzeige, einfacher 3-Tastenbedienung und großer eingebauter Speicherkapazität ist das System das ideale Werkzeug für den täglichen Betrieb in beschwerlichen Industrieumgebungen. Das System ist in einer eigensicheren Ausführung nach *Ex ib IIc T* erhältlich. Das System gibt dem Anwender durch eine Vielzahl an Ausstattungsvarianten die Möglichkeit, die Version zu wählen, die seinen Bedürfnissen und seinem Budget gleichzeitig gerecht werden.

**smartALIGN®  
Smartes Wellenausrichten**

smartALIGN® ist ein neues Wellenausrichtsystem von PRÜFTECHNIK. Das System beinhaltet die gesamte Funktionspalette von OPTALIGN PLUS, und bietet weitere Funktionen für die grafische Anzeige und Messung. Einmalige Funktionen wie „akzeptabel“/„nicht akzeptabel“ Anzeigen (Smiley), einfache Joystick-Bedienung und „live“ Onscreen-Hilfetexte machen aus dem System ein optimales Ausrichtwerkzeug.

## ROTALIGN® Ultra Ultramodern und wegweisend



ROTALIGN® Ultra ist der Maßstab für die laseroptische Wellenausrichtung und bewältigt außerdem eine Vielzahl anderer laseroptischer Ausrichtaufgaben wie die Ebenheitsmessung, die Ausrichtung von Bohrungen und die Geradheitsmessung. Das System ist einer Vielzahl von Ausrichtaufgaben gewachsen, seien sie auch noch so komplex. Die Ausrichtung von Maschinenzügen, Lagerschalen und viele weitere Applikationen an rotierenden Maschinen sind verfügbar. Ausgestattet mit einem farbigen, hintergrundbeleuchteten Bildschirm, der sowohl in heller als auch dunkler Umgebung jederzeit unbeeinträchtigt ablesbar ist. Erstmals für ein Ausrichtgerät mit alpha-nummerischer Tastatur, zur einfachen Eingabe sämtlicher Werte. Für Laufzeiten von 24 Stunden stehen bei Standardbetrieb Batterien zur Verfügung.

**NOVALIGN®**  
**Professionelles Ausrichten**

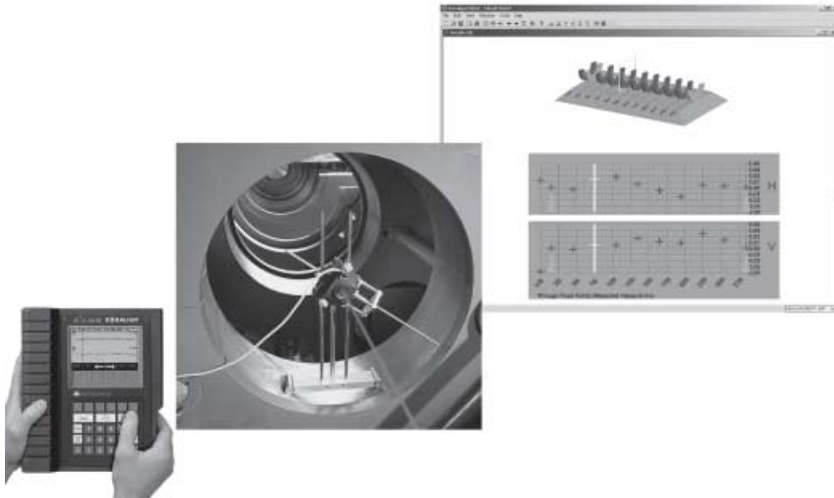
NOVALIGN®, der Alleskönner für den Ausricht-Profi. Die Plattform für alle denkbaren Ausrichtaufgaben. Das erste Ausrichtgerät überhaupt mit einem großen, farbigen Bildschirm (VGA), mit einem Batteriemanagement für Laufzeiten von 24 Stunden im Standardbetrieb, vorbereitet für wireless Bluetooth®-Datenübertragung. Über Standardschnittstellen (z.B. 2x USB) können PCs, Drucker und vielfältige Peripheriegeräte (z.B. Tastatur) angeschlossen werden. Die Oberklasse im Ausrichten für den absoluten Profi.



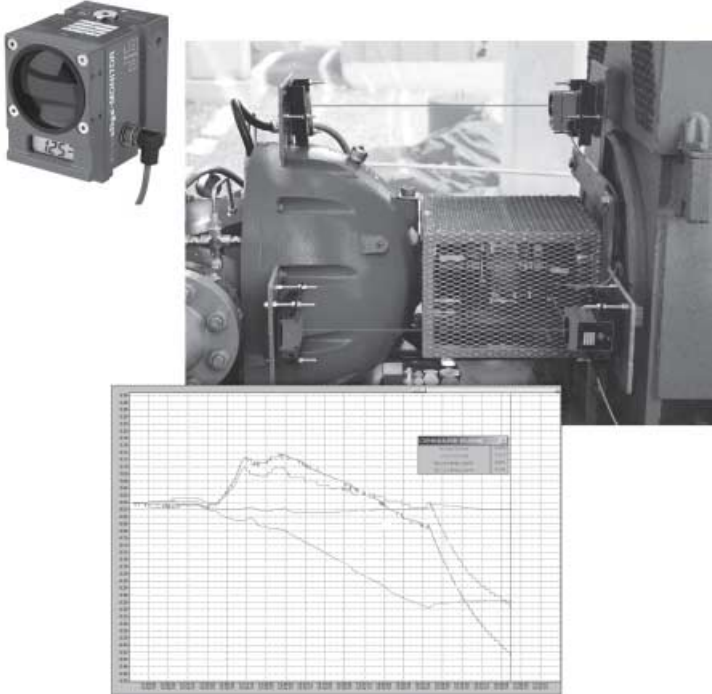
## Industrielles Ausrichten

### BORALIGN®

#### Messung der Ausrichtung von Lagerschalen und Bohrungen



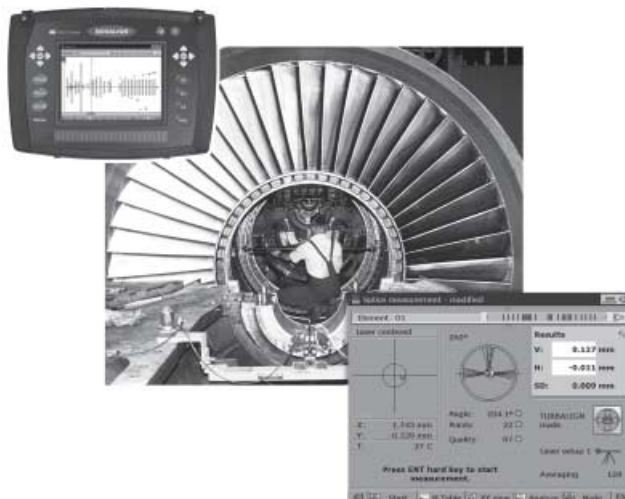
BORALIGN® ist ein laseroptisches Ausrichtsystem für Bohrungen, Bocklager und andere kreisförmige Maschinenelemente. Es erlaubt auch das Ausrichten von Werkstücken gegenüber Bohrköpfen.

**PERMALIGN®****Permanente Laserüberwachung der Maschinen-  
ausrichtung**

PERMALIGN® ist das weltweit einzige Gerät, das speziell dafür entwickelt wurde, die Positionsveränderungen von rotierenden Geräten während des Betriebs durch laseroptische Ausrichtmessungen zu bestimmen. Das System widersteht hohen Temperaturen im Dauerbetrieb. Über einen PC-Link sendet PERMALIGN über längere Zeiträume Daten zu den Positionsänderungen von rotierenden Maschinen, die aufgrund thermischen Wachstums oder ähnlichem auftreten. Das System ist in einer eigensicheren Ausführung nach *Ex ib IIc T4* erhältlich.

**LEVALIGN®****Bestimmung der Oberflächengeometrie**

LEVALIGN® vermisst Maschinenbetten, Fundamente, Lager und Auflagen jeder Art mittels eines drehbaren Laserstrahls, der eine parallele Ebene zur Meßebene aufbaut. LEVALIGN® ist ein auf ROTALIGN Ultra basierendes Messsystem mit einem separaten Laser unter Verwendung der gleichen Sensorik wie bei der Wellenausrichtung. Eine vollkommene Ergänzung zum Wellenausrichten mit herausragender Software zur Weiterverarbeitung der Messergebnisse.

**CENTRALIGN®****Laseroptisches Ausrichten von Lagerschalen /  
Laufbuchsen**

CENTRALIGN® bestimmt schnell und exakt die Ausrichtung koaxialer Teile, wie z.B. Turbinenlagerschalen, insbesondere in der Energieerzeugung, Turbomaschinen generell, sowie Laufbuchsen, Lager von Hubkolbenmotoren und Stevenrohren.

## Lagermontagegeräte

### **EDDYTHERM®** **Induktive Heizsysteme**



EDDYTHERM® Induktive Erwärmungsgeräte sind eine ideale Methode, Lager und andere runde Metallkomponenten wie Zahnräder per Schrumpfsitz auf Wellen zu montieren. Die induktive Erwärmung stellt eine kontrollierte Erwärmung dar, bei der nur das zu erwärmende Bauteil heiß wird. Mikroprozessor-Steuerung bestimmt das Heizprofil und stellt die Temperaturstabilität über das gesamte Bauteil sicher.

## **Ausrichtsystem für Riemenscheiben**

**PULLALIGN®**

**Riemenscheiben perfekt Ausrichten**



PULLALIGN® ist ein laseroptisches Ausrichtsystem für die akkurate Ausrichtung von Riemenscheiben. Mit dem von PRÜFTECHNIK patentierten System, bei dem der Laserstrahl reflektiert wird, werden Korrekturen des vertikalen und horizontalen Winkel- und Parallelversatzes in nur zwei Maschinenschritten ausgeführt. Diese können vom Benutzer während der Korrektur beobachtet werden.

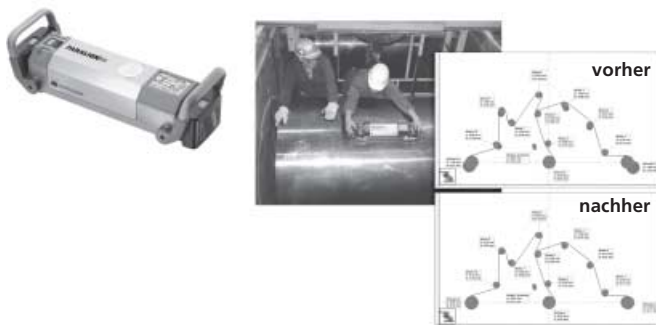
## Vorgefertigte Passplatten für die Ausrichtung



PERMABLOC® Passplatten werden für vier verschiedene Maschinenfußgrößen und in acht Stärken produziert und stellen somit für fast alle Maschinen die ideale Ausrichtkorrektur dar. Sie werden aus hochwertigem Edelstahl hergestellt, um Korrosion bei Kontakt mit Säuren oder Laugen zu verhindern, und sind zwecks einfacher Auswahl mit dauerhaften Angaben in mm und Zoll über Abmessungen und Dicke versehen. Passplatten sind in Paketen von 20 Stück oder als Sortiment in einem robusten Metallkoffer erhältlich.

LAMIBLOC® Schälbleche sind aus Messing oder Edelstahl ausgeführt. Sie sind in 8 Maschinenfußgrößen erhältlich, sind genau 1 mm dick und haben 12 Laminierungen, die sich leicht auf die gewünschte Dicke abschälen lassen. Jede der 1 mm starken Platten besteht aus 8 Lagen der Stärke 0,1 mm und 4 Lagen der Stärke 0.05 mm. So kann jede Ausrichtkorrektur vorgenommen werden. Die Passplatten sind im Zehnerpack oder im kompletten Satz erhältlich, und können für spezielle Fußgrößen auch als 1 Meter x 0,5 Meter Bögen bezogen werden.

Mylar® Passplatten sind kostengünstiger und erheblich leichter als metallische Passplatten – aber genauso stabil. Sie sind genau 1 mm dick und lassen sich in Schichten von 0,1 mm einfach auf die gewünschte Stärke abschälen

**Industrielle Dienstleistungen****Walzen-Ausrichtservice  
PARALIGN® Service**

Mit unserer weltweit einmaligen PARALIGN®-Technologie ist es erstmals möglich, in kurzer Zeit einen extrem genauen Überblick über die Parallelität der Walzen einer gesamten Anlage zu gewinnen.

Fordern Sie über unsere Website ein Angebot zu unserem weltweiten Service an.

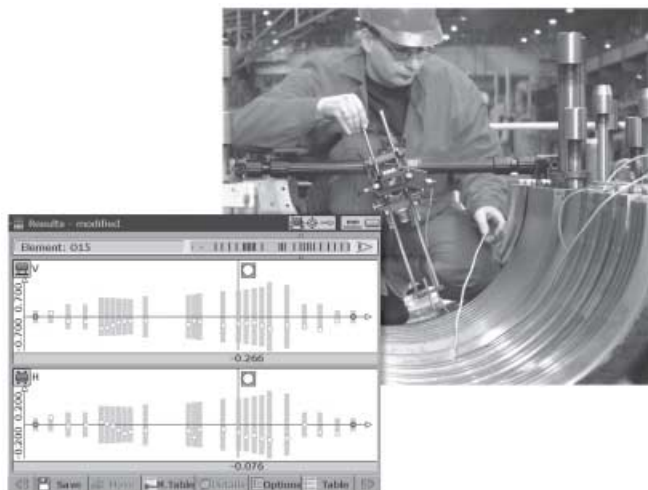


## Wellen-Ausrichtservice Professionelles Ausrichten



Mit unserem Wellen-Ausrichtservice unterstützen wir Ihre vorbeugende Instandhaltung. Unsere Spezialisten verfügen über große Erfahrung, besonders bei anspruchsvollen Anwendungen, wie dem Ausrichten von Maschinenzügen, Vertikalmaschinen, Turbinen und Kompressoren. Wir bieten auch die berührungslose Überwachung von Positionsveränderungen mit unserem Online-System PERMALIGN® an.

### **Turbinen-Ausrichtservice Laseroptisches Ausrichten von Lagerschalen / Laufbuchsen**



Mit CENTRALIGN® vermessen und richten wir Turbinen komplett aus – bei Montagen und Überholungen. Unser spezialisiertes Team hat langjährige Erfahrung mit Dampf- und Gasturbinen.



## Index

### A

Ausrichtgrößen 7  
Ausrichtmethoden 23  
    Fühlerlehre 30  
    Haarlineal 29  
    Messuhren 31  
Ausrichttoleranzen 14  
Ausrichtzustand 17

### B

Bohrungen 73  
BORALIGN 73

### C

CENTRALIGN 76  
    Turbinen-Ausrichtservice 82

### D

Dichtungen 20  
Doppelradial-  
    Messuhrenverfahren 36  
Drehachsen 4  
Drehzahl  
    kritischen 6

### E

EDDYTHERM 77  
Energiekosten 51

### F

Fehlausrichtung 21

### I

Induktive Heizsysteme 77  
Industrielle Dienstleistungen 80  
Industrielles Ausrichten 73

### K

Kippfuß 25  
Klaffung 8  
Konvention 11  
Kupplungen 14, 19  
    kurzen flexiblen 10  
Kupplungsrückstellkräfte 16  
Kupplungsschäden 19

### L

Lagermontagegeräte 77  
Lagerschäden 19  
Lagerschalen 73, 76  
Laserausrichtsystem  
    OPTALIGN 43  
    smartALIGN 61  
Lasersysteme 46  
Lebensdauer 56  
LEVALIGN 75

### M

Maschinenausfälle 19  
Maschinendurchhang 5  
Maschinengeometrie 83  
Maschinenschwingungen 21  
Messbereich  
    Erweiterung 47

### N

NOVALIGN 72

### O

Oberflächengeometrie 75  
OPTALIGN PLUS Series 69

**P**

PARALIGN 80  
Parallelkipppfuß 25  
Parallelversatz 7, 9, 13  
Passplatten 79  
    LAMIBLOC 79  
    PERMABLOC 79  
pocketALIGN 68  
Produktentwicklung  
    Die Chronologie 66  
PRÜFTECHNIK 65  
PULLALIGN 78

**R**

Radial-Axial-Verfahren 32  
Riemenscheiben  
    Ausrichten 78  
ROTALIGN Ultra 71

**S**

Schwingungsalarme 57  
smartALIGN 70

**T**

Thermisches Wachstum 59  
Toleranzen 15

**V**

Vorzeichen-Benennungen 11

**W**

Walzen 80  
Wälzlager 20  
Wellenausrichten 4, 68  
Wellendurchhang 16  
Winkelkipppfuß 25  
Winkelversatz 7, 8

**Z**

Zwischenwellen 11

[illegible]

[illegible]

---

PRÜFTECHNIK Alignment Systems  
Oskar-Messter-Str. 15  
D-85737 Ismaning, Germany  
[www.pruftechnik.com](http://www.pruftechnik.com)  
Phone +49 (0) 89 99 61 6-0  
Fax +49 (0) 89 99 61 6-100  
eMail: [info@pruftechnik.com](mailto:info@pruftechnik.com)



Gedruckt in Deutschland ALI 9.600.11.05.0D  
smartALIGN®, ROTALIGN® und LEVALIGN® sind eingetragene Warenzeichen der PRÜFTECHNIK AG. Irrtümer und Konstruktionsänderungen, insbesondere im Sinne technischer Weiterentwicklungen vorbehalten. Nachdruck, auch auszugsweise, nur mit schriftlicher Genehmigung der PRÜFTECHNIK AG.  
© Copyright 2005 by PRÜFTECHNIK AG



PRÜFTECHNIK

**Für messbare Erfolge in der Instandhaltung**