



Anwendungsbeispiel

Ermittlung fehlerhafter Wälzlager

Fehler in Wälzlagern können vor einem Ausfall ermittelt werden. Eine Möglichkeit zur Ermittlung solcher Fehler ist, die Gesamtschwingung am Lagergehäuse regelmäßig zu messen. Allerdings ist diese Methode manchmal nicht effektiv, da die sehr kleinen Auswirkungen, die anfangs im Lager durch eine Störung entstehen, kaum die Gesamtschwingung beeinflussen.

Eine deutlich effektivere Methode ist eine Lagerzustandsmessung, wie BCU oder eine Bandpass-Messung. Die früheste mögliche Warnung wird gegeben, indem man die Spektren der Konstanten Prozentualen Bandbreite (CPB) der Schwingung regelmäßig vergleicht. Lagerschäden erscheinen in solchen Spektren als Zunahmen in einem Band der hochfrequenten Komponenten.



Je mehr Sie über den Fehler wissen, umso größer ist die Sicherheit, einen Ausfall voraussagen zu können. Sie können mehr über den Fehler herausfinden, indem Sie eine oder mehrere der folgenden Diagnosetechniken verwenden: Kepstrum und Hüllkurvenanalyse

Was ist ein Wälzlager?

Wälzlager unterstützen und fixieren drehende Wellen in Maschinen. Sie können aus Kugeln oder anderen Rollelementen bestehen.

Weshalb fallen sie aus?

Wälzlager fallen aus durch Produktionsfehler; unsachgemäße Montage, Überbelastung, Unterschmierung; oder aufgrund zu rauer Klimabedingungen. Aber selbst wenn ein Lager gut gefertigt, korrekt montiert und nicht überlastet ist (o. a.), fällt es letztendlich durch Ermüdung des Lagermaterials aus.

Wie fallen sie aus?

Die meisten Ausfallarten beziehen das Wachstum der Schäden auf den Laufringen oder auf einem Rollelement mit ein. Im Laufe der Zeit breiten sich die Schäden aus und, wenn das

Lager nicht komplett ausfällt, werden diese Schäden schließlich immer weiter ausgewaschen (abgenutzt).

Wie schwingen sie?

Die Schwingung, die durch ein gesundes neues Lager erzeugt wird, hat einen niedrigen Pegel und sieht aus wie weißes Rauschen.

Beginnt sich ein Fehler zu entwickeln, ändert sich die Schwingung, die durch das Lager erzeugt wird. Jedes Mal, wenn ein Kugelement auf eine Unstetigkeit trifft, entsteht daraus ein Schwingungsimpuls. Die resultierenden Impulse der Schwingung wiederholen sich regelmäßig mit einer Rate, die durch die Drehgeschwindigkeit, die Position der Unstetigkeit und durch die Lagergeometrie bestimmt wird.



Diese Wiederholungsraten sind bekannt als Lagerfrequenzen, spezifischer ausgedrückt:

- Schadensfrequenz des Außenrings, für eine Störung am Außenring
- Schadensfrequenz des Innenrings, für eine Störung am Innenring
- Schadensfrequenz eines Wälzkörpers, für Störungen an der Kugel selbst
- Schadensfrequenz des Käfigs bezogen auf den Lageraußenring, für einen Schaden am Käfig.

Die Lagerfrequenzen können mit Hilfe der Formel aus Bild 1 einfach berechnet werden:

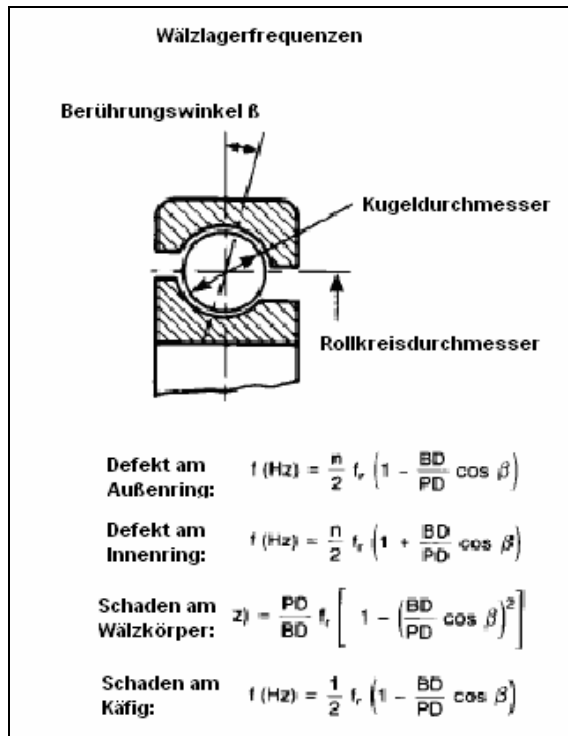


Bild 1. Formel zur Berechnung der Lagerfrequenzen

Beachten Sie, dass die Zusammenhänge reine Rollbewegungen vermuten lassen, während in der Realität auch Gleitbewegungen existieren. Aus diesem Grund sollten die Ergebnisse der Gleichungen als Näherungswert betrachtet werden.

In dem gemessenen Frequenzspektrum am Wälzlager sind alle Schadensfrequenzen enthalten,

Leider ist bei der Beurteilung der Frequenzspektren meistens die Unwucht so dominierend, dass die Wälzlagerschäden im FFT-Spektrum kaum sichtbar sind. Dadurch werden die gesuchten Frequenzen weitgehend überlagert und sind erst eindeutig feststellbar, wenn der Schaden bereits weit fortgeschritten ist und sich ausgebreitet hat.

Bild 2 zeigt ein Schwingungsspektrum, das an einem Motor gemessen wurde, an dem 6 Wochen später ein Wälzlager ausbrannte. Die Zunahmen in zwei Bändern im hochfrequenten Schwingungsbereich sind klar ersichtlich. Die Erfahrung hat gezeigt, dass solche Erhöhungen der Bänder in den hohen Frequenzen ein Indiz für ein fehlerhaftes Wälzlager sind.

Warum passiert dies?

Beachten Sie folgendes: Die Auswirkung auf das Wälzelement, wenn es auf eine Unstimmigkeit trifft, gleicht einer Glocke, die mit einem Hammer angeschlagen wird. Die Struktur, bestehend aus dem Lager, seinem Gehäuse und dem Maschinengehäuse, reagiert zusammen wie eine Glocke, die durch den Schlag „läutet“ (d.h. mit-schwingt).

Die Schwingerfrequenz oder Resonanz ist eine Eigenschaft der Struktur und wird nicht dadurch beeinflusst, wie oft oder wie stark es angeschlagen wird. Die Resonanzen solcher Strukturen liegen im Allgemeinen zwischen 1 kHz und 20 kHz und, anders als die Resonanz einer Glocke, liegen sie nicht bei den diskreten Frequenzen sondern eher in den Frequenzbändern, siehe Bild 2.

Aus diesem Grund erscheinen Fehler der Wälzlager im Frequenzspektrum als Zunahmen in einem oder mehr Frequenzbändern zwischen 1 kHz und 20 kHz.

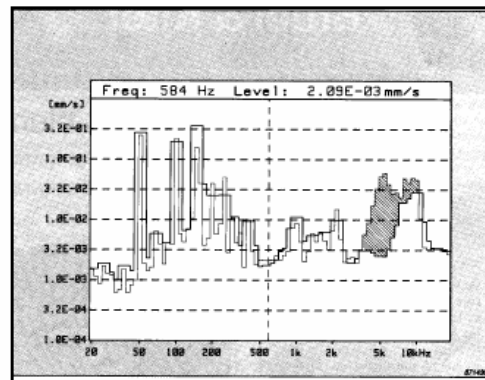




Bild 2: CPB-Spektrumvergleich der Schwingung eines 110 kW Motors. Die dunkle Kurve ist der „gute Zustand“ und ist eine Referenzschablone gegen das aktuelle Spektrum (helle Kurve).

Wie können Sie ein schlechtes Lager erkennen?

Gesamtschwingungspegel

Eine Möglichkeit ist die regelmäßige Messung des Effektivwertes (RMS = root-mean-square) des Gesamtschwingungspegels am Lagergehäuse. Diese Technik bezieht die Messung des Schwingungspegels über einen breiten Frequenzbereich mit ein. Das Messen der Beschleunigung über einen Bereich der hohen Frequenzen (z. B. 1000 Hz bis 10.000 Hz) liefert die besten Ergebnisse. Solche Messungen können mit einem Beschleunigungssensor und einem Schwingungsmessgerät durchgeführt werden, das mit einem entsprechenden Breitbandfilter ausgestattet ist. Die Messungen werden mit allgemeinen Standards oder mit festgelegten Referenzwerten für jedes Lager verglichen.

Durch die Darstellung der Messergebnisse über der Zeit kann der Trend der Schwingung verfolgt und hochgerechnet werden, um eine Vorhersage zu machen, wann die Lager ersetzt werden müssen. Allerdings erhöht sich die Gesamtschwingung eines Wälzlagers oft durch Fehler im Lager selbst erst im letzten Stadium eines Ausfalls. Diese Methode gibt deshalb auch eine sehr späte Warnung vor Ausfällen. Dies kommt daher, dass die kleinen Stöße im Lager durch den ursprünglichen Schaden sich nur gering auf den Gesamtschwingungswert auswirken und den Energiepegel der Schwingung nicht wesentlich erhöhen.

Vorteile:

- Schnell
- Einfach
- Niedrige Investitionskosten
- Einzelwert-Ergebnis

Nachteile:

- Nicht empfindlich für die ersten Wirkungen von Fehlern
- Ermittelt Fehler spät, näher am Ausfall

Lagerzustandsmessungen BCU und Bandpass

Stöße, die im Lager aufgrund einer Schädigung stattfinden, strahlen nach außen. Wenn ein Beschleunigungssensor in der Nähe montiert ist, veranlassen diese Stöße den Sensor, zu seiner Resonanzfrequenz bei jedem Stoß zu schwingen. Die Sensorresonanz reagiert wie ein Verstärker auf die Stöße und deshalb ist die Messung sehr empfindlich für die sehr kleinen regelmäßigen Stöße, die im frühen Stadium der Beschädigung stattfinden. Der Frequenzbereich für diese Messung ist an die Resonanzfrequenz der Sensorresonanz und liegt bei ca. 32 kHz.

Das Signal, das erzeugt wird, kann derart verarbeitet werden, dass es eine Messung genannt BCU (Bearing Condition Unit) liefern kann. Diese Messung ist wiederholbar und verlässlich genug, um einen Trend herzustellen und eine sehr frühe Warnung abzugeben, dass der Schaden begonnen hat, bevor er an den Lagerkomponenten sichtbar ist.

Eine Bandpass-Messung liefert andererseits gerade früh genug die Warnung und kann für den gleichen Effekt wie eine BCU-Messung eingesetzt werden. Jedoch in diesem Fall basiert die Messung nicht auf der Sensorresonanz, sondern auf der Schwingung, die durch das Lager oder Komponenten in der Nähe der Maschine produziert wird. Folglich kann der Frequenzbereich für diese Messung eingestellt werden, um den interessierenden Frequenzbereich abzudecken.

Der Crest-Faktor

liefert eine frühere Warnung eines Lagerausfalls, indem er die gleiche Ausrüstung wie zur Gesamtschwingungsmessung einsetzt, um regelmäßig den Crest-Faktor der Lagerschwingung zu messen (Bild 3).

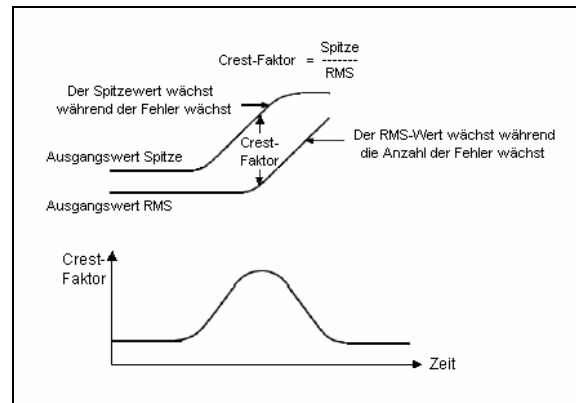


Bild 3: Das Crest-Faktor-Prinzip



Der Crest-Faktor ist das Spitze-Effektivwert-Verhältnis der Schwingung. Der Spitze-Detektor im Schwingungsmessgerät misst die Schwingungsimpulse, die durch einen Lagerdefekt erzeugt werden. Das Messen der Beschleunigung über einen hohen Frequenzbereich (z. B. 1.000 Hz bis 10.000 Hz) liefert die besten Ergebnisse.

Die Kurve in Bild 5 zeigt den typischen Trendverlauf des Crest-Faktors während sich der Lagerzustand verschlechtert. Ursprünglich war das Verhältnis vom Spitze- zum RMS-Wert relativ konstant. Während sich ein lokalisierter Fehler entwickelt erhöhen die daraus resultierenden Stöße den Spitzepegel erheblich, haben aber nur einen geringen Einfluss auf den RMS-Pegel. Der Spitzepegel steigt gewöhnlich an und hat damit einen Einfluss auf das Verhältnis vom Spitze- zum RMS-Wert. Da das Lager sich verschlechtert, werden durch den Kugellauf mehr Stöße erzeugt und diese beeinflussen schließlich den RMS-Pegel. Der Crest-Faktor sinkt, während das Verhältnis vom Spitze- zum RMS-Wert beginnt, sich dem ursprünglichen Wert zu nähern, als der Lagerzustand noch in Ordnung war.

Gegen Ende der Lager-Lebensdauer kann der Crest-Faktor auf seinen ursprünglichen Wert gefallen sein, obwohl sich Spitze- und Effektivwerte beträchtlich erhöht haben. Die beste Möglichkeit den Trend der Daten zu beobachten ist, wie im Bild 3 dargestellt; Effektiv- und Spitzepegel in einer Grafik, mit dem abgeleiteten Crest-Faktor als Unterschied zwischen den beiden Kurven.

Vorteile:

- Schnell zu implementieren
- Einfach
- Niedrige Investitionskosten

Nachteile:

- Neigt zu Störungen durch andere Anschlag-schwingungen (z. B. Getriebschwingungen)
- Ein gutes und ein sehr schlechtes Lager liefert im allgemeinen die gleichen Ergebnisse

CPB-Spektrumvergleich

Die Methode, die auch andere Arten von Maschinenfehlern erkennt, wie Unwucht, Versatz, Spiel, usw., ist der CPB-Spektrumvergleich (CPB = Konstante Prozentuale Bandbreite; siehe Bild 2).

Die konstante prozentuale Auflösung (8% in Bild 2) entlang der Frequenzachse des CPB-Spektrums bedeutet, dass Sie einen breiten Bereich zur Ermittlung fehlerhafter Wälzlager nutzen können, während die Auflösung trotzdem ausreichend ist, um niedrige Frequenzfehler, wie Unwucht oder Versatz zu erkennen.

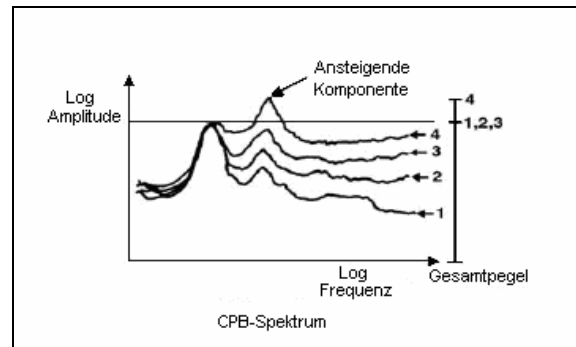


Bild 4: Ein CPB-Spektrumvergleich gibt frühere Warnungen als die Überwachung der Gesamtschwingung

Der Gesamtschwingungspegel wird weitgehend durch den Pegel der höchsten Spitze im Spektrum der Schwingung bestimmt. Aus diesem Grund steigt der Pegel nur, nachdem eine steigende Komponente die größte Spitze im Spektrum geworden ist, siehe Bild 4.

Auf diese Art gibt der CPB-Spektrumvergleich frühere Warnungen als die Überwachung der Gesamtschwingung.

Vorteile:

- Erkennt eine breite Palette an Maschinenfehlern
- Stellt Frequenzinformationen zur Verfügung, die zur Fehlerdiagnose genutzt werden kann
- Die gleiche Ausrüstung kann auch für weitere Fehlerdiagnosen genutzt werden

Nachteile:

- Größere Investitionskosten

Wie können Sie mehr über den Fehler herausfinden?

Alle oben genannten Methoden können - manuell oder anders - eine Vorhersage liefern, wann die Maschine überholt werden muss. Je mehr Sie über den Fehler wissen, umso sicherer wird die Prognose.



Mit den folgenden Diagnosetechniken können Sie mehr über den Fehler herausfinden:

- Hüllkurvenanalyse
- Kepstrum

Eine **Hüllkurvenanalyse** kann die periodischen Stöße und das modulierte weiße Rauschen, welches innerhalb eines sich verschlechternden Wälzlagers entsteht, extrahieren. Diese Analyse ist selbst dann dazu in der Lage, wenn die Stöße und das Rauschen einen relativ niedrigen Energiepegel haben und durch andere Schwingungen von der Maschine „überlagert“ werden.

In einem Hüllkurvenspektrum wie in Bild 7 gezeigt wird, erscheinen regelmäßige Stöße im Lager wie eine Spitze (möglicherweise mit einigen Harmonischen) bei einer Schadensfrequenz (siehe Bild 1), die der Position des Fehlers entspricht (z. B. Innenring, Außenring, Käfig oder Wälzkörper). Die Hüllkurvenanalyse unterscheidet zwischen den periodischen Stößen eines Wälzlagerefehlers und den gelegentlichen Stößen von anderen Phänomenen, z. B. Kavitation in einer Pumpe. Ein Wälzlager produziert ein weißes Rauschen. Das Hüllkurvenspektrum misst die Modulation der Rauschstörung, die im Lager erzeugt wird. Dies wird genutzt, um geglättete Lagerdefekte sowie Lagermontagefehler zu diagnostizieren und mengenmäßig zu bestimmen.

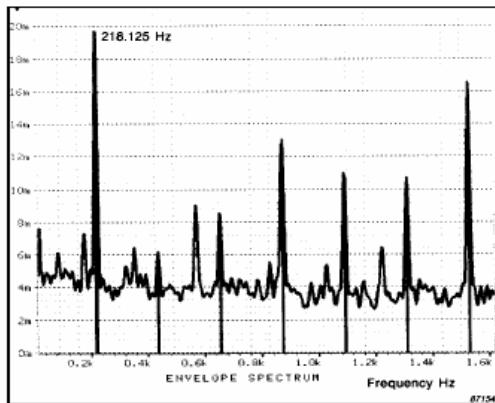


Bild 7: Das Hüllkurvenspektrum zu den Bildern 5 und 6 zeigt eine harmonische Serie der BPFO (Außenringdefekt)

Zoom

Das "Zoomen" in einen Bereich eines Frequenzspektrums erhöht die Auflösung, mit welchem dieser Teil des Spektrums angezeigt wird, sehr stark. Deshalb wird durch das Zoomen, was als einzelne Spitze im gewöhnlichen Spektrum angezeigt wird, möglicherweise als zwei oder mehr

Komponenten im vergrößerten Spektrum aufgedeckt.

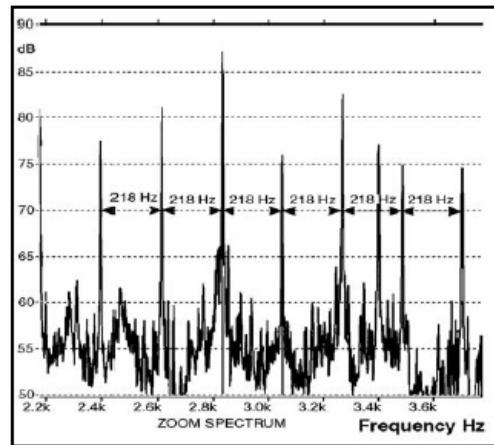


Bild 5: Gezooptes Spektrum mit Harmonischen entsprechend der „Kugelpassierfrequenzen am Außenring“ (BPFO). Als das Lager abgetragen war (8 Monate nach erstmaliger Entdeckung des Fehlers) entdeckte man einige Ausplatzungen am Außenring.

Das Zoomen senkt auch den angezeigten Rauschboden und dadurch werden niedrigere Komponentenebenen deutlicher sichtbar.

Das Zoomen der Zahneingriffsfrequenzen eines Getriebes kann Seitenbandkomponenten aufdecken deren Abstand einer oder mehr Wellendrehzahlen des Getriebes entspricht Erhöhungen in der Anzahl oder Größe solcher Seitenbänder können auf fehlerhafte Lager auf der entsprechenden Welle, auf Wellenversatz oder auf ein sich verschlechterndes Zahnrad hinweisen.

Manchmal deckt das Zoomen Harmonische einer Lagerfrequenz auf, siehe Bild 5. Das Ansteigen solcher Spektrumskomponenten kann ein Hinweis auf ein fehlerhaftes Wälzlager sein. Normalerweise werden diese Komponenten durch die kleinen Abweichungen in der Betriebsdrehzahl des Lagers „geschmiert“, oder durch hochgradige Komponenten verdeckt.

Kepstrum

Ein fehlerhaftes Lager oder Zahnrad, oder eine falsch ausgerichtet Welle in einem Getriebe können als Erhöhung in der Anzahl oder des Pegels von Seitenbändern rund um die Komponente entsprechend der Zahneingriffsfrequenzen im Spektrum sichtbar werden.



Die Kepstrumanalyse identifiziert Familien von Seitenbändern und Harmonischen in einem Spektrum und deckt ihren jeweiligen Wert auf, siehe Bild 6.

Je größer die Anzahl der Komponenten in einer Familie von Seitenbändern/Harmonischen – oder je größer die durchschnittliche Größe der Seitenbänder/Harmonischen – umso höher ist die entsprechende Spitze im Kepstrum.

Kepstren sind relativ unempfindlich gegen Änderungen der Maschinenlast und können deshalb nützlich für eine Trendbeobachtung sein. Kepstren für Messungen, die an verschiedenen Stellen des gleichen Getriebes gebildet werden sind sich wahrscheinlich sehr ähnlich, d. h. Kepstren sind verhältnismäßig unempfindlich gegenüber Änderungen im Übertragungspfad zwischen Beschleunigungssensor und der Quelle der Schwingung.

Kepstren sind auch nützlich, da sie die Abstände von Seitenbändern oder Harmonischen mit hoher Genauigkeit darstellen.

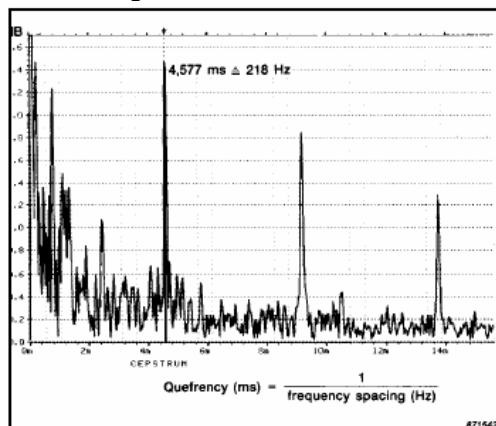


Bild 6: Die Familie von Harmonischen in Bild 5 erscheint im Kepstrum als eindeutige Spitze deren Quefrenz dem Frequenzabstand der Harmonischen entspricht. Eine Reihe von Harmonischen (gleichwertig mit Harmonischen in einem normalen Spektrum) ist auch präsent.

Warum Brüel & Kjær Vibro?

Jedes vorbeugende Instandhaltungsprogramm verliert schnell seine Glaubwürdigkeit durch falsche Alarmer oder ungeplante Ausfälle, und die Qualität der Messausrüstung ist abhängig von seinem Erfolg.

Brüel & Kjær Vibro produziert die gesamte Produktpalette der Schwingungsüberwachung und in der Welt der Messungen steht der Name Brüel & Kjær Vibro für Qualität. Das erklärte Ziel für die breite Produktpalette und der Service von Brüel & Kjær Vibro ist das Bereitstellen von Lösungen für nahezu alle Überwachungsaufgaben der vorbeugenden Zustands-/Instandhaltungsstrategien.

Brüel & Kjær Vibro liefert alles aus einer Hand als unabhängiger Lieferant. Angefangen bei den Schwingungssensoren und einer umfangreichen Palette an Installationszubehör, über die Messhardware und –Software, bis hin zum Ingenieurwesen und der Inbetriebnahme – wir bieten zusammen mit unseren gelieferten Geräten und Systemen einen lebenslangen Support.

Das bedeutet, dass die zuverlässigen Produkte von Brüel & Kjær Vibro, die sich über jahrzehntelange Erfahrung hindurch entwickelt haben, die jeweiligen Bestandteile und ihre Konfiguration sind die Besten auf dem Markt. Die außerordentliche Zahl der Lieferungen, Referenzen und zufriedene Kunden in allen Bereichen weltweit unterstützen diesen Anspruch!