

8 Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit zu verstehen, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Einsatzbedingungen eine definierte Funktion erfüllt. Zuverlässigkeitsangaben sind daher statistische Werte. Gebräuchliche Angaben sind die Lebensdauerwahrscheinlichkeit, das heißt, die Wahrscheinlichkeit dass n Prozent der Bauteile eine bestimmte Lebensdauer erreichen. Üblich ist die Lebensdauerangabe L10, mit der eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 90 Prozent bzw. eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 Prozent definiert wird. Verbreitet ist auch MTBF (IEV 191-12-09: Mean Time Between Failures), der Kehrwert der Ausfallrate FIT (1 FIT = 1 Ausfall je 10⁹ Betriebsstunden). Bei Lüftern ist der erste Fehler mit dem Totalausfall des Produktes gleichzusetzen. Die korrekte Bezeichnung hierfür wäre MTTF (IEV 191-12-07: Mean Time To Failure), die jedoch meist nicht verwendet wird. Bei Vergleichen der Zuverlässigkeitsangaben verschiedener Hersteller muss sorgfältig geprüft werden, welche Kenngröße angegeben wird und auf welche Umgebungsbedingung (Temperatur) sich die Angabe bezieht. Wichtig ist auch, wie der Hersteller das Ende der Lebensdauer definiert: Bei **SEPA**[®] Lüftern ist das Lebensdauerende in Anlehnung an ISO 281 dann erreicht, wenn ein einziger Parameter die zulässige Toleranzgrenze über- oder unterschreitet.

Die Ausfallrate von Lüftern (und anderen Produkten) weist drei verschiedene Bereiche auf. Dieser zeitliche Verlauf lässt sich an Hand der so genannten Badewannenkurve darstellen. Mathematisch ist das Verhalten mit der Weibull-Verteilung zu beschreiben.

Phase 1: Frühausfälle, hervorgerufen durch Fertigungs- und Materialfehler, aber auch durch unsachgemäße Handhabung. Die Ausfallrate nimmt mit der Zeit ab bis sie den Bereich 2 erreicht. Durch Burn-in (Einlaufen) kann die anfängliche Ausfallrate deutlich gesenkt werden.

Phase 2: zufällige Fehler, Ausfallrate sehr gering und zeitlich konstant.

Phase 3: Verschleißausfälle. In diesem Bereich steigt die Ausfallrate stark an, wodurch das Ende der akzeptablen Nutzungsdauer eines Produktes erreicht ist.

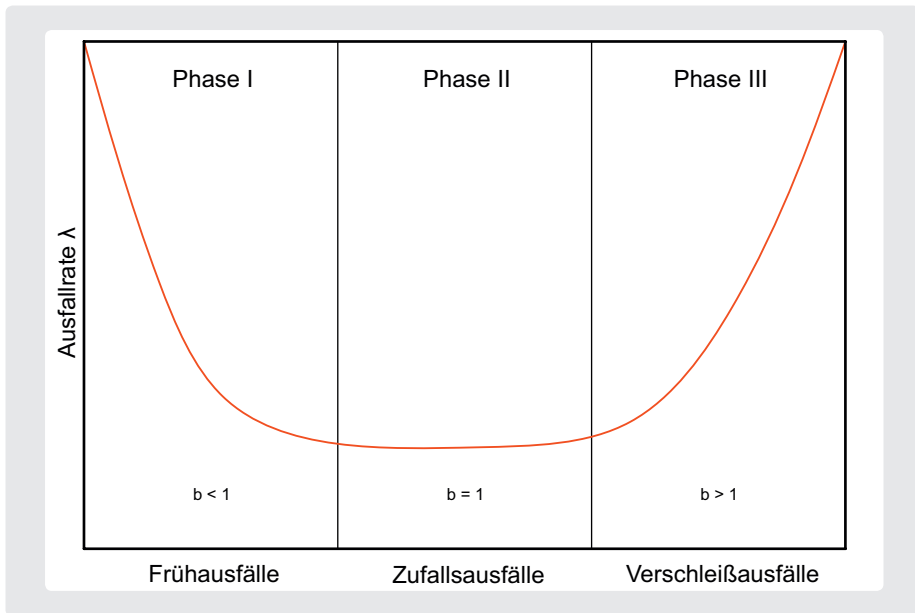


Abb. 27: Badewannenkurve

Vor der Auslieferung werden die Lüfter einem Test unterzogen und die Hauptparameter getestet. Nach diesem Arbeitsgang werden viele Fehler der 1. Phase der Badewannenkurve noch beim Hersteller erkannt und abgestellt. Fehlerhäufungen führen sofort zu Korrekturmaßnahmen in der Produktion. Ohne Test könnten ganze Chargen von Lüftern mit nicht erkannten Serienfehlern das Werk verlassen, bevor der Fehler beim Kunden auftritt und beim Hersteller abgestellt werden kann.

Der Begriff „Lüfterlos“ wird in der Anlagenbeschreibung häufig mit hoher Zuverlässigkeit verwechselt und sogar als Qualitätsmerkmal dargestellt. Das elektromechanische Bauteil Lüfter wird fälschlicherweise als Risikobauteil angesehen. Oft jedoch wird das lüfterlose Design mit vielen Nachteilen erkaufte, das dann mehr Risiken als bei einer Konstruktion mit Lüfter enthält. Die schlechte Qualität von billigen Lüftern führt zu hoher Ausfallwahrscheinlichkeit der Geräte mit entsprechend hohen Kosten für die Reparatur und vor allem für die dadurch hervorgerufenen Folgekosten. Es wird daher versucht, mit Konstruktionen ohne Lüfter das Fehlerrisiko zu senken. Dabei wird jedoch übersehen, dass die oft geringe Zuverlässigkeit der Lüfter nur eine Funktion des sehr geringen Preises ist, mit dem manche Anbieter Wettbewerbsvorteile zu erringen versuchen. Fast immer wird übersehen, dass beim Ansteigen der

Gerätetemperatur das Ausfallrisiko von temperaturempfindlichen Bauteilen (Abbildung 28), wie bei Elektrolytkondensatoren, dramatisch ansteigt (Faktor 10 bei 25° Temperaturerhöhung, Gesetz von Arrhenius).

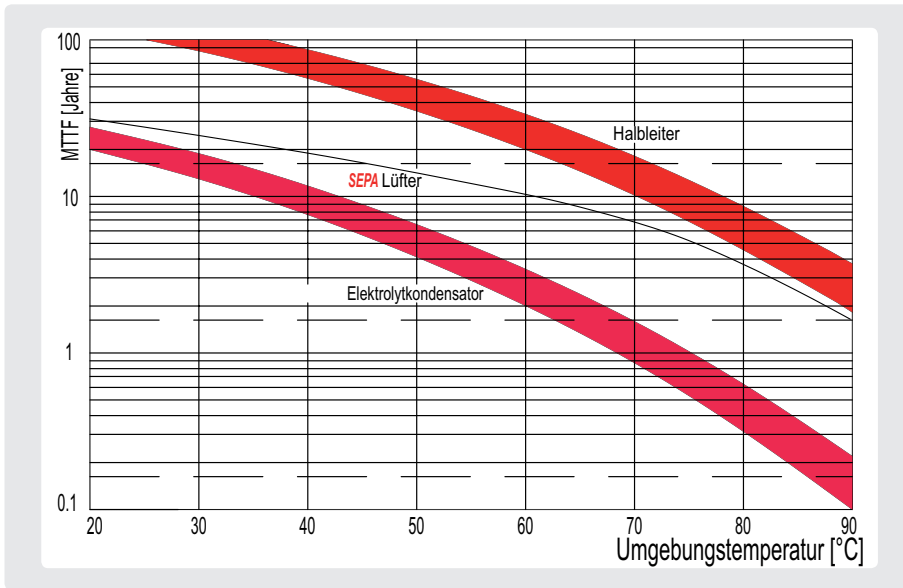


Abb. 28: Temperatureinfluss von MTBF verschiedener Bauteile

8.1 Das Lagersystem

Das Lagersystem in Lüftern bestimmt weitgehend deren Zuverlässigkeit und Lebensdauererwartung. In der Vergangenheit wurde der Markt durch teilweise unvollständige Informationen über Lagerungen verunsichert. Gelegentlich entstand sogar der falsche Eindruck, dass moderne Gleitlager den Einsatz von Kugellagern in jedem Fall überflüssig machen.

Tatsächlich ist es nicht leicht, die richtige Entscheidung zu treffen. Der geplante Einsatz, die Größe und das Gewicht des Lüfterrotors, Umweltbedingungen, Lebensdauererwartung, Zuverlässigkeit und Kosten müssen sorgfältig gegeneinander abgewogen werden. Nachstehend sollen die Vor- und Nachteile der Lagersysteme so gegenübergestellt werden, dass für jede Anwendung eine optimale Auswahl getroffen werden kann.

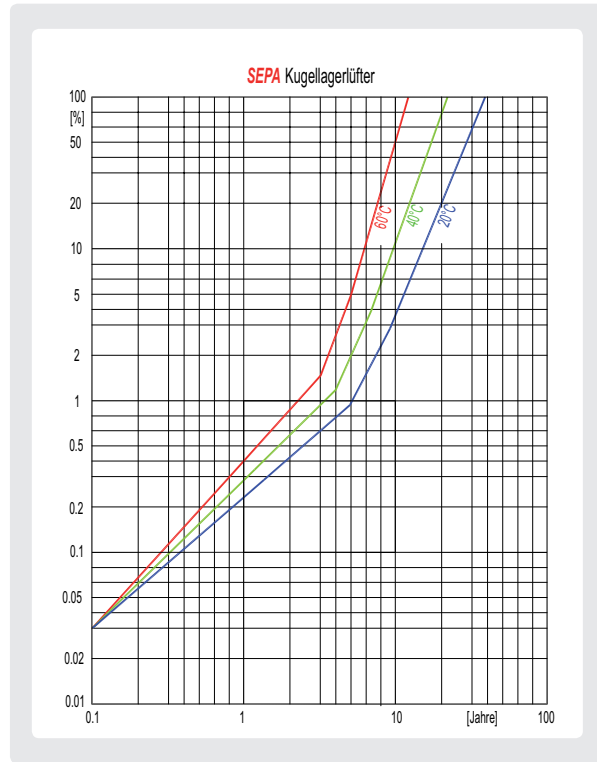


Abb. 29: Typ. Ausfallwahrscheinlichkeit von **SEPA**® Lüftern

8.2 Sinterlagertechnologie

Wenn man von Gleitlagern in Lüftern spricht, sind stets Sinterlager gemeint. Diese Sonderform der Gleitlager, etwa seit 1930 bekannt und ab 1952 in großen Serien hergestellt, erfüllt in nahezu idealer Weise die Anforderungen an ein Gleitlager: Es ist relativ einfach und genau herzustellen und ist vor allem wegen seines großen Öldepots wartungsfrei.

Das Rohmaterial besteht aus Eisen- oder Bronzekügelchen mit einer Korngröße von 0,02 bis 0,2 mm. Die Formgebung erfolgt durch Pressen in einer speziellen Form. Anschließend werden die Presslinge bei 800 bis 1250 °C unter Schutzgas „verbacken“. Die Genauigkeit wird durch einen Kalibrierprozess erreicht. Eine mechanische Nachbearbeitung ist möglich, aber bei den Sinterlagern für Lüfter unüblich. Eine spezielle Oberflächenbehandlung bei Sinterisenlagern verhindert Oxidation

und das Tränken mit Schmierstoff bildet den letzten Arbeitsgang. Bei dem Vakuum-Tränk-Verfahren führender Hersteller wird der Porenraum der Lager (15 bis 30 Prozent) vollständig mit Öl gefüllt. Temperaturbereich, Reibungs- und Verschleißverhalten bestimmen die Auswahl des Schmierstoffs.

8.3 Funktionsweise eines Sinterlagers

Die Schmierung im Sinterlager funktioniert nach dem hydrodynamischen Prinzip des Schmierkeils. Alle Sinterlager – auch jene neuester Technologie – arbeiten auf folgende Weise: die Abbildung zeigt den Schnitt durch ein Sinterlager und den teilweise mit Öl gefüllten Lagerspalt bei stehender und drehender Welle. Bei rotierender Welle wird ein Pumpeffekt wirksam, wodurch der Schmierstoff in einem Kreislauf durch das Lager fließt und ein Ölkeil entsteht, auf dem die Welle schwimmt.

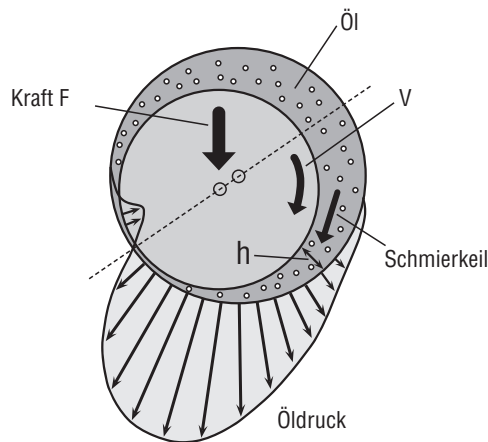


Abb. 30: Schmiermittelkeil beim Sinterlager

Das „reibunglose“ Funktionieren der Schmierung kann allerdings leicht durch äußere Einflüsse gestört werden. Neben der Rautiefe ist auch die Formgenauigkeit der Welle von großer Bedeutung. Abweichungen von der Idealform können zu Schwingungen (Geräusch) führen. Durch unerwünschte Pumpeffekte können erhebliche Mengen von Öl aus dem Lager abwandern (sogenannte Öler). Zu großes oder zu kleines Lagerspiel, falsche Drehzahl und Fluchtungsungenauigkeiten sind ebenfalls wesentliche Faktoren, deren Vernachlässigung zum frühzeitigen Ausfall des Lagers führen kann.

Eine Sonderform des Sinterlagers ist das Doppellager. Hier werden die zwei Lagerstellen in einem einzigen Sinterformteil hergestellt. Damit lassen sich wesentlich höhere Montagegenauigkeiten erzielen, als es mit zwei einzelnen, in einem Lagerrohr verpressten Lagern möglich ist. Die Abbildung illustriert die Fluchtungsungenauigkeiten, die beim Doppellager weitgehend vermieden werden.

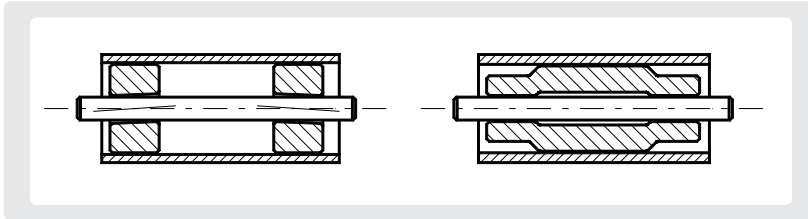


Abb. 31: Vergleich der Sinterlagersysteme
2 Einzellager (links) – Doppellager (rechts)

Bei sehr kurzen Lagersystemen, wie sie in flachen Lüftern anzutreffen sind, ist es nicht möglich, ein Doppellager einzusetzen. Einen vertretbaren Kompromiss stellt hier ein längeres einstückiges Lager dar.

Sinterlager sind axial nur gering belastbar, entwickeln an den Stirnseiten zu wenig Schmierung und eignen sich nicht für die axiale Lagerung von Rotoren. Ältere Gleitlagersysteme sind axial nicht verspannt und können deshalb in ungünstiger Betriebslage zum Klappern des Lüfterrotors führen.

MagFix-Lager, oft auch als Magnetlagerung bezeichnet, haben diese Nachteile nicht. Moderne Lüfter verwenden Gleitlager für die radiale Lagerung und ein Spurlager am Wellenende für die axiale Lagerung und Fixierung. Durch geschickte Ausnutzung der axial wirkenden dauermagnetischen Kräfte im DC-Motor kann die axiale Lage der Welle praktisch unabhängig von der Einbaulage des Lüfters erfolgen.

Absolut verschleißfreie Lagerung ist auch mit magnetischer Kompensation nicht erreichbar.

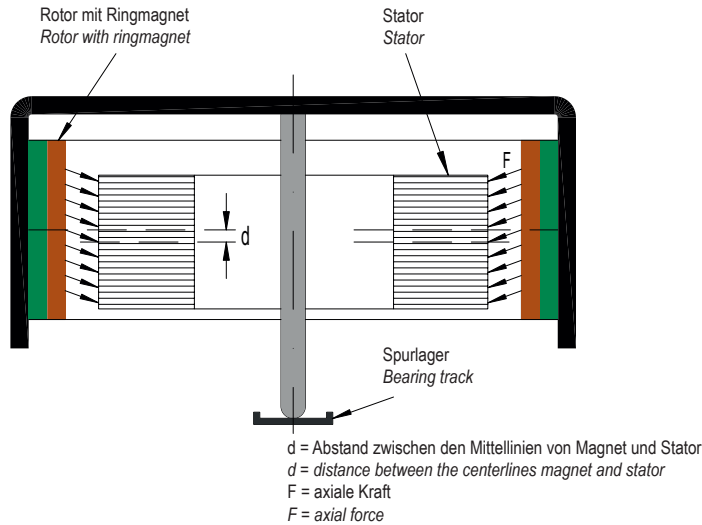


Abb. 32: MagFix Lagersystem

Verschiedene Hersteller bieten Lüfter mit weiterentwickelten Sinterlagern an, bei denen der hydrodynamische Effekt verbessert und stabilisiert wird. Diese Gleitlagertechnologien nutzen spezielle Oberflächen an der Welle oder/und im Lagerinneren, um über einen höheren Öldruck einen möglichst stabilen Schmierfilm zu erhalten, der die Welle auch bei Erschütterungen oder bei geringen Drehzahlen sicher trägt. Allerdings sind diese Lösungen sehr aufwendig herzustellen und daher nur unwesentlich preiswerter als ein System mit Kugellagern und dadurch bisher nicht weit verbreitet.

Durch die – mit vertretbarem Aufwand – nicht ideal herstellbare Form und Oberflächenbeschaffenheit von Lager und Welle kommt es nicht nur im An- und Auslauf, sondern auch während des Betriebs zu gelegentlicher metallischer Berührung (Mischreibung). Unzureichende Rotorwuchtung und hohes Rotorgewicht verstärken diesen Effekt, sodass durch die Mischreibung die Poren an der gesamten Lauffläche allmählich verstopfen oder sich schließen können.

Darüber hinaus spielen auch die Umgebungsbedingungen eine Rolle: Temperatur, Luftverschmutzung durch aggressive Gase oder Staub und die Art des Betriebs (Dauer- oder Kurzzeitbetrieb). Zwar kann eine Lagerseite nach außen hin leicht abgedichtet werden, das rotorseitige Lager kann konstruktionsbedingt aber nur

teilweise geschützt werden. Mit guten Gleitlagersystemen lassen sich heute MTBF-Werte um 200.000 h (20 °C) erreichen, die allerdings bei einer Betriebstemperatur von 60 °C auf 50.000 h oder weniger zurückgehen. Da Lüfter aus Kostengründen nie in Reinraumumgebung montiert werden, ist eine gewisse Verschmutzung beim Zusammenbau von Rotor und Stator nicht auszuschließen. Diese kann zu einem vorzeitigen Ausfall des Lagersystems und damit des Lüfters führen.

Anders als oft behauptet sind Gleitlagersysteme nicht völlig unempfindlich gegen Schock und Vibrationen. Bei starken Stößen schlägt die Welle gegen das weiche Sintermaterial, was zu Verformungen der Lagergeometrie führen kann. Dies wiederum ist oft Ursache für einen mangelhaft ausgebildeten Schmierfilm, der zu frühzeitigem Ausfall des Lagers führt. Vibrationen verursachen ein Taumeln der Welle im Lager, sodass der tragende Ölkeil unter Umständen oft durchstoßen wird und es dann zu metallischer Berührung von Welle und Sinterlagerwand kommt (Mischreibung), was durch einen erhöhten Lagerverschleiß ebenfalls zu unerwartet frühen Störungen führen kann.

8.4 Kugellagersysteme

Auch Kugellager sind wartungsfrei und dauergeschmiert. Sie bestehen aus einem Innen- und einem Außenring mit präzise geschliffenen und polierten Rillen (HG-Lager), in denen fünf bis neun Kugeln laufen. Die Position der Kugeln wird durch einen so genannten Käfig aus Metall vorgegeben. Die Kugeln bewegen sich in einem Depot aus Fett, dessen Abfließen bei der Ausführung ZZ durch zwei Deckscheiben verhindert wird. Drehen Innen- und Außenring gegeneinander, entsteht eine sehr reibungsarme Abrollbewegung. Um ein stabiles Abrollen der Kugeln in den Laufrillen sicherzustellen, müssen Innen- und Außenringe der Lager gegeneinander durch ein elastisches Element (Feder) verspannt werden. Die mechanische Belastung der Lager durch Verspannung, Unwucht und elektromotorische Kräfte ist bei Lüftern sehr gering. Die Lebensdauerberechnung der Lager nach ISO281 ergibt unrealistisch hohe Werte von mehreren hunderttausend Stunden. Die richtige Auswahl des Schmierstoffes ist von besonderer Wichtigkeit. Die berechneten Werte für die Ermüdungslebensdauer werden in der Praxis jedoch nicht erreicht, weil der Schmierstoff früher versagt. Die Gebrauchsdauer des Schmierstoffes wird durch Alterung begrenzt, hervorgerufen durch Aufnahme von Wasser, Staub und ggf. auch durch aggressive Stoffe aus der Umgebung der Lüfter.

Kugellager sind Präzisionsbauelemente, deren Einzelteile noch genauer als ein Sinterlager gefertigt werden müssen. Maßtoleranzen im Bereich von 0,3 bis 5 µm sind üblich. Ringe und Kugeln werden aus einer speziellen Stahllegierung durch Schmieden hergestellt. Durch Drehen und immer feineres Schleifen lassen sich allmählich die Präzisionseinzelteile in der erforderlichen Genauigkeit herstellen. Anders als bei Gleitlagern erfolgen Montage, Befüllen mit Fett, Prüfen und Verpacken vollautomatisch in Reinräumen der Klasse 10 bis 100, wodurch ein Lagerversagen durch Verschmutzung praktisch ausgeschlossen ist.

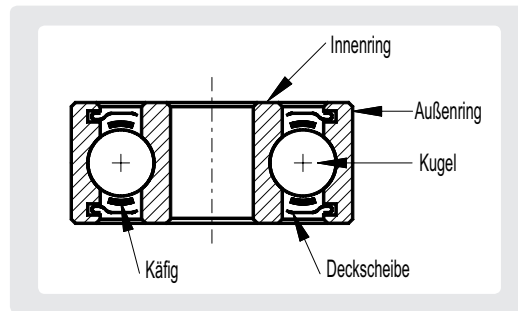


Abb. 33: Aufbau eines Rillenkugellagers ZZ

Ähnlich wie beim Sinterlager sind auch hohe Genauigkeiten bei der Montage des Lagersystems einzuhalten. Doppelkugellager (Spindellager) mit hoher Fügegenauigkeit sind verfügbar, haben sich aber wegen des hohen Preises bisher nicht bei Lüftern durchsetzen können.

Der Abrollvorgang ist lauter als der Bewegungsvorgang bei einem Sinterlager. Bei Lüftern, insbesondere bei Miniaturlüftern mit Kunststoffrahmen, spielt das Laufgeräusch aber praktisch keine Rolle, da das Luftgeräusch meist deutlich überwiegt. Lüfter mit Ganzmetallgehäuse übertragen das Laufgeräusch der Kugellager als Körperschall über das Gehäuse, sodass der Körperschallpegel etwas höher sein kann als bei gleich großen Lüftern mit Gleitlagern.

Setzt man eine solide Konstruktion des Lagersystems voraus, sind Kugellager einem Sinterlager überlegen. Sehr verschleißarme und elastische Sonderstähle für Ringe und Kugeln sowie hochtemperaturfester, unverlierbarer Schmierstoff machen ein Kugellagersystem zuverlässiger als jedes Sinterlagersystem. Die Lebensdauererwartung ist viel höher, bei deutlich breiterem Einsatztemperaturbereich.

Gegen Schock und Vibration reagieren Kugellager empfindlicher als Sinterlager.

Bei Miniaturlüftern mit Rotormassen von wenigen Gramm werden Kugellager im Betrieb mechanisch kaum belastet, können aber durch unvorsichtige Handhabung, wie Berühren des Rotors (Hebelwirkung durch Kippen!), unsachgemäße Lagerung, Transport in ungeeigneten Behältern, relativ leicht beschädigt werden. Die Lebensdauerwahrscheinlichkeit wird fast ausschließlich durch die Alterung des Schmiermittels bestimmt. Natürlich beschleunigen aggressive Gase, Feuchtigkeit und hohe Temperaturen die Alterung des Fettes. Die viel bessere Abdichtung der Kugellager (gegenüber der großen Oberfläche beim Gleitlager) lassen schädliche Umwelteinflüsse jedoch nur sehr langsam einwirken.

SEPA[®] Miniaturlüfter haben aufgrund der speziellen Motortechnologie besonders leichte Rotoren, die außerdem feinstgewuchtet sind und deshalb hohen Schockbeanspruchungen von 196 bis 490 m/sec² (20 bis 50 G) und Vibrationsbelastungen bis zu 34,3 m/sec² (3,5 G) widerstehen, ohne Schaden zu erleiden.

Die Kugellager im Lagersystem müssen durch ein elastisches Element mit einer definierten Kraft verspannt werden. Die Abbildung stellt das Lagersystem in einem **SEPA**[®] Kugellagerlüfter beispielhaft dar. Die Kugellager werden in einem sehr genau hergestellten Lagerrohr montiert. Fluchtungsfehler und Schrägstehen der Lager werden durch diese Konstruktion vermieden. Mit derart hochwertigen Konstruktionen werden MTBF-Werte um 280.000 h, bezogen auf Raumtemperatur, und über 100.000 h bei 60 °C Betriebstemperatur erreicht. Bei Chip Coolern ist die Temperatur des Kühlkörpers deutlich höher als die für die Lebensdauer der Lüfter wichtige Lufttemperatur.

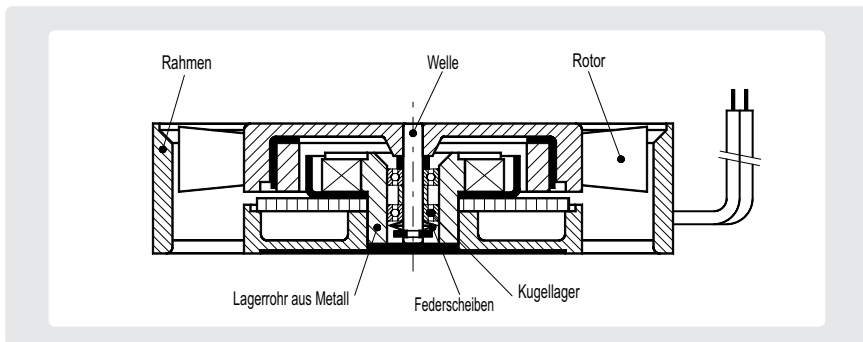


Abb. 34: Lagersystem mit Kugellager in einem modernen Miniaturlüfter von **SEPA**[®]

8.5 Sinterlager oder Kugellager?

In den nachstehend gezeigten Vergleichslisten werden die wichtigsten Entscheidungsmerkmale der unterschiedlichen Lagersysteme gegenübergestellt und in einer Skala veranschaulicht.

Vor einer zu geringen Beachtung von Zuverlässigkeit und Lebensdauererwartung sei jedoch ausdrücklich gewarnt. Es ist hinreichend bewiesen, dass Reparaturen (vor allem, wenn die Ausfälle erst beim Kunden auftreten) unverhältnismäßig teuer sind und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines Gerätes völlig verändern können. Der drohende Verlust an Vertrauen beim Kunden ist ein weiterer, sehr ernster Faktor, der gründlich bedacht werden sollte, bevor man sich für eine günstigere, aber wahrscheinlich nicht so zuverlässige Lösung entscheidet.

	GLEITLAGERSYSTEME	KUGELLAGERSYSTEME
Lebensdauererwartung	gut	sehr gut
Betriebstemperaturbereich	groß	sehr groß
Zuverlässigkeit	gut	sehr gut
Geräusch	sehr leise	leise
Schockempfindlichkeit	gering	hoch
Vibrationsempfindlichkeit	gering	mittel
Kosten	sehr gering	gering

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Lagersysteme

Der Vergleich zeigt, dass Kugellagersysteme in vielen Fällen die passendere Lösung sein können. Besonders bei hohen Temperaturen wird das Kugellager wegen seiner Zuverlässigkeit geschätzt, da sie nur wenig von der Temperatur beeinflusst wird. Bei großem Preisdruck oder moderaten Umgebungstemperaturen hingegen ist der Einsatz von Gleitlagerlüftern sinnvoller.

Die bei kleinen, günstigeren Lüftern heute kaum mehr anzutreffenden Gemischtlagersysteme, bestehend aus einem Kugellager und einem Sinterlager, sind eher in die Kategorie Sinterlager einzureihen, da das Sinterlager mit seinem höheren Ausfallrisiko und der geringeren Lebensdauer die Qualität nachhaltig beeinflusst.