SEPA GMBH EUROPE

Heinrich Cap

WÄRMEMANAGEMENT BEI ELEKTRONISCHEN BAUELEMENTEN

Praxisgerechte Einführung in die Elektronik- und Bauteilekühlung

Heinrich Cap

WÄRMEMANAGEMENT BEI ELEKTRONISCHEN BAUELEMENTEN

Der Autor

Ing. (grad) Heinrich Cap, Jahrgang 1941, studierte Elektrotechnik an der

HTL Schellinggasse in Wien. Sein beruflicher Werdegang führte ihn von Eumig in Wien und Körting in Grassau schließlich zu Papst-Motoren nach St. Georgen. Von 1978 bis Ende 1990 war er bei Papst tätig, zuletzt als Leiter der Entwicklung Motoren. Mit mehr als 50 Erfindungen hat er wesentlich zur Vervollkommnung der Papst-Produkte beigetragen. 1991 gründete er eine eigene Firma die schon 1992 den Handel mit ***SEPA***®-Lüftern aufnahm. 1999 wurde die Firma in die ***SEPA***® EUROPE GmbH umgewandelt und nach Freiburg übersiedelt. Gleichzeitig wurden Lüfter anderer namhafter Hersteller und Lüfterzubehör zusätzlich ins Vertriebsprogramm genommen. ***SEPA***® EUROPE GmbH ist der europäische Repräsentant für ***SEPA***®-Lüfter und Inhaber des Markenzeichens ***SEPA***®.

INHALT **Seite**

1 Einführung **6**

2 Elektronikkühlung **8**
2.1 Verlustleistung 8
2.1.1 Statische Verluste 8
2.1.2 Dynamische Verluste 9
2.2 Wärmeabgabe 9
2.2.1 Bauteilkühlung 11
2.2.2 Aktive und passive Kühlung 13
2.2.3 Kühlung von Leuchtmitteln 15
2.2.4 Entwärmung mittels Kühlkörper 15
2.2.5 Beispiel 19

3 Lüfterbauarten **20**
3.1 Axiallüfter 21
3.2 Radiallüfter 23
3.3 Gehäuselose Lüfter 24
3.4 Diagonallüfter 25
3.5 Sonderlüfter 25
3.6 Flachlüfter 26

4 Förderleistungen **26**
4.1 Lüfterkennlinie, Gerätekennlinie und Arbeitspunkt 26

5 Geräuschverhalten **29**
5.1 Ursachen der Geräuschentwicklung 29
5.2 Geräuschoptimierung 31
5.3 Montage im Gerät 33

INHALT **Seite**

6 Lüftungskonzepte **35**
6.1 Horizontale oder vertikale Durchlüftung 35
6.2 Saugende oder blasende Anbringung des Lüfters 35
6.3 Mehrfachanordnung von Lüftern 37
6.4 Verluste durch besondere Einbaubedingungen 38
6.5 Leistungsaufnahme 39

7 Überwachung und Steuerung **40**
7.1 Signalausgänge zur Überwachung 40
7.1.1 Tachoausgang 40
7.1.2 Alarmausgang 42
7.2 Regelung und Steuerung 42

8 Zuverlässigkeit **44**
8.1 Lagersysteme 47
8.2 Sinterlagertechnologie 48
8.3 Funktionsweise eines Sinterlagers 48
8.4 Kugellagersysteme 51
8.5 Sinterlager oder Kugellager? 54

9 Schutzarten **56**
9.1 Definition der Schutzarten 56
9.2 Weitere Schutzarten 57

10 Technischer Anhang **58**
10.1 Wichtige Formeln 58
10.2 Begriffe und Kurzbezeichnungen 59

11 Verzeichnis der Abbildungen **71**

1 Einführung

Alle elektronischen Bauelemente erwärmen sich im Betrieb aufgrund ihrer nicht idealen Eigenschaften. Die einwandfreie Funktion der Komponenten ist jedoch nur in einem relativ engen Temperaturbereich möglich. Eine zu hohe Temperatur kann nicht nur die Eigenschaften der Bauteile vorübergehend oder dauerhaft verändern, sondern diese sogar zerstören. Insbesondere bei Halbleitern konnten die Bauteilverluste durch Senken der Betriebsspannung deutlich verringert werden. Innerhalb der letzten 12 Jahre gelang es, die Versorgungsspannung von CPUs von 5 auf ca. 2,5 VDC zu senken und damit die Verlustleistung auf 1/4 zu bringen. Im gleichen Zeitraum stieg aber die Zahl der auf einem Chip integrierbaren Bauelemente auf das 64-fache (Mooresches-Gesetz). Die abzuführende Verlustleistung ist also heute 16 Mal (64/4) größer als vor etwa 12 Jahren. Nach Moores Schätzung vom Herbst 2007 werde diese Entwicklung noch 10 bis 15 Jahre andauern. Ein sorgfältiges Kühlmanagement bei Bauteilen ist also wichtiger als je zuvor.

Kompakte Ventilatoren werden seit Langem vor allem für die Elektronikkühlung eingesetzt. Am Anfang der bis heute ungebrochen stürmischen Entwicklung standen die AC-Ventilatoren, eine Variante einfacher AC-Rohrläufermotoren. Konstruktionen mit DC-Motoren folgten, mit denen sich sehr viel mehr Lüftervarianten gestalten ließen. Ohne moderne DC-Lüfter wäre der heutige Stand der Geräte an Kompaktheit und Leistungsdichte nicht erreichbar gewesen.

SEPA®-Lüfter – ***SEPA®*** steht für **S**ilent, **E**conomical, **P**owerful und **A**dvanced – waren von Anfang an dabei. Die japanische Firma Nippon Keiki Works LTD., gegründet 1943, produziert die Lüfter unter dem Markennamen ***SEPA®***. NKW spezialisierte sich zunächst auf elektromechanische Produkte hoher Qualität und brachte 1985 den ersten Miniaturlüfter MF 40A12, ein Axiallüfter der Größe 40 x 45 x 12 mm, auf den Markt. Hunderte von neuen Modellen folgten und viele wurden eigens für namhafte Kunden entwickelt. Das Produktspektrum an ***SEPA®***-Axiallüftern beginnt derzeit bei 10 x 10 x 2 mm und reicht bis 60 x 60 x 15 mm. Sehr bald erkannte NKW, dass sich Axiallüfter in manchen Fällen wegen

ihrer Geometrie nicht optimal einsetzen lassen. So schufen die Lüfterpioniere kleine Radiallüfter, von denen sich der erste, TFB45A, bis heute bewährt. Derzeit können die Kunden unter rund 25 verschiedenen Größenvarianten von 10 x 10 x 2 mm bis 65 x 65 x 13 mm wählen.

Ergänzt wird dieses Programm durch Lüfter bekannter Hersteller bis zu einer Größe von 218 x 218 x 83 mm.

Die strategische Vorgabe bei NKW ist seit der Firmengründung unverändert: Führend bei der Qualität ihrer Produkte zu sein. Dieses Ziel erreicht und über Jahrzehnte gehalten zu haben, ist eine große Leistung, auf die man bei NKW mit Recht stolz ist. Heute produziert der Hersteller an vier Standorten in Japan und China. Alle Neuheiten entstehen im Entwicklungszentrum Tsukuba nahe Tokyo und werden erst nach ausführlichen Testreihen für die Produktion freigegeben. NKW führt bei allen produzierten Lüftern einen verkürzten Dauerlauf (Burn-in) durch, bevor die Produkte nach einer endgültigen Inspektion versandt werden. Die Anlieferqualität ist dadurch nahe „Zero Defect“, ein Standard, der bei Serienlüftern kaum anderswo anzutreffen ist.

SEPA®-Lüfter sind heute weltweit u.a. in Geräten der Elektronikindustrie, Fahrzeugtechnik und Medizintechnik sowie der optischen und chemischen Industrie verbreitet. In besonderen Fällen werden kundenspezifische Modelle gefertigt, die auf NKW’s jahrzehntelanger Erfahrung in der Technik der Miniaturlüfter aufbauen.

2 Elektronikkühlung

Die nachstehende Schrift befasst sich mit der Kühlung von Bauelementen mit passiver oder aktiver Wärmeabfuhr mit DC-Lüftern, wobei auf die besonderen Eigenschaften der ***SEPA®-***Lüfter eingegangen wird. Die spezielle Technik der – von den DC-Lüftern mehr und mehr verdrängten – AC-Lüfter wurde in der Literatur bereits wiederholt dargestellt, sodass hier auf eine ausführliche Beschreibung verzichtet wird.

2.1 Verlustleistung

Elektronische Bauelemente arbeiten nicht verlustfrei: Sie entwickeln beim Betrieb Wärme, die abgeführt werden muss. Die Verlustleistung wird in Watt angegeben. Doch wie entstehen Verluste und wie müssen sie bei der Kühlungskonzeption berücksichtigt werden?

2.1.1 Statische Verluste

sind Verluste, die permanent nach der Inbetriebnahme des Bauteils entstehen. An ohmschen *Widerständen* entsteht Verlustleistung nach dem Gesetz:

$$P_R = I^2 * R \text{ oder } P_R = U^2 / R .$$

Widerstände können schaltungsbedingt notwendig oder parasitär, d.h. unerwünscht, vorhanden sein.

Dioden haben einen physikalisch bedingten und vom Halbleitermaterial abhängigen Spannungsabfall in Durchlassrichtung (0,1 bis 2 V), typisch 0,7 V bei Siliziumdioden. Die Verlustleistung ist $P_D = U_D * I_D$.

Schalttransistoren haben im Ein-Zustand einen nicht zu vernachlässigbaren Widerstand. In den Datenblättern wird bei bipolaren Transistoren die Sättigungsspannung bei definiertem Basis- und Kollektorstrom und bei MOS-Transistoren der ON-Widerstand angegeben. Die Verlustleistung errechnet sich aus:

$P_{ON} = U_{CEsat} * I_C$ bzw. $P_{ON} = I_D^2 * R_{DSon}$

Dioden (und Transistoren), die in Sperrrichtung betrieben werden, zeigen einen, durch einen parallel liegenden Isolationswiderstand hervorgerufenen, Sperrstrom. Die Verlustleistung ist $P_s = U^2 / R_s$. Der Isolationswiderstand ist spannungsabhängig.

2.1.2 Dynamische Verluste

entstehen erst, wenn das Bauelement elektrische Änderungen erfährt, wie beim Ein- und Ausschalten von Transistoren, Umpolen von Dioden usw. Die einzelnen Zonen eines Halbleiterbauteils sind durch Sperrschichten voneinander und von der Trägerzone isoliert. Neben den oben erwähnten parasitär vorhandenen Widerständen bilden die leitenden, voneinander isolierten Zonen die Flächen eines Kondensators. Ändert sich beispielsweise beim Taktbetrieb die Spannung der isolierten Zonen gegeneinander, werden die parasitären Kondensatoren umgeladen. Der Umladestrom erzeugt in den parasitären Bahnwiderständen eine Verlustleistung, die mit steigender Taktfrequenz zunimmt. Bei tieffrequent betriebenen Bauelementen, wie im Audio-Bereich, sind die dynamischen Verluste im Allgemeinen vernachlässigbar. Hochfrequent getaktete Bauelemente wie CPU's oder HF-Halbleiter weisen dagegen sehr hohe dynamische Verluste bei vergleichsweise geringen statischen Verlusten auf.
Für gewöhnlich sind die zur Berechnung der statischen Verlustleistung benötigten Angaben oder die Summe der statischen und dynamischen Verlustleistung in den Datenblättern der Komponenten angegeben.

2.2 Wärmeabgabe

Ein mit Verlustleistung behaftetes Bauteil erwärmt sich, seine Oberflächentemperatur steigt an. Dadurch erhöht sich der Temperaturunterschied zur Umgebung ($\Delta T = T_C - T_A$) und damit die an die Umgebung durch Strahlung, Konvektion oder Wärmeleitung abgeführte Leistung.
Wärmestrahlung ist eine elektromagnetische Strahlung, die jeder Körper abhängig von seiner Temperatur emittiert.

Konvektion ist ein Mechanismus zum Transport von thermischer Energie, bei dem die Wärme von Teilchen übertragen wird und in Gasen oder Flüssigkeiten kaum zu vermeiden ist. Bei der freien Konvektion erfolgt der Teilchentransport ausschließlich durch die Auswirkungen des Temperaturgradienten, also durch Auf- und Abtrieb des Fluids infolge der durch die Temperaturänderung hervorgerufenen Dichteunterschiede. Durch äußere Einwirkung, wie beispielsweise durch Lüfter oder Pumpen, wird der Teilchentransport bei der erzwungenen Konvektion hervorgerufen. Der Wärmewiderstand bei Konvektion lässt sich berechnen:

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha * A} \; (R_{th} \; [K/W], A \; [m^2]).$$

α ist der Wärmeübergangskoeffizient in W/m^2K.

Kühlmedium	**Wärmeübergangs-koeffizient** α [W/(m²K)]	**Thermischer Widerstand** R_{th} pro cm [K/W]
Luft, unbewegt	1...10	2000...1000
Luft, freie Konvektion	10...30	1000...333
Luft, erzwungene Konvektion	20...100	500...100
Wasser, freie Konvektion	30...300	333...33
Wasser, erzwungene Konvektion	300...10000	33...1
Sieden von Wasser (Konvektion)	2000...100000	5...0,1

Tabelle 1: Wärmeübergang zwischen Oberfläche und Fluid

Wärmeleitung, auch Wärmediffusion oder Konduktion, bezeichnet in der Physik den Wärmefluss in einem Feststoff oder ruhendem Fluid. Wärme fließt dabei von selbst immer in Richtung der geringeren Temperatur (zweiter Hauptsatz der Thermodynamik). Ein Maß für die Wärmeleitung in einem bestimmten Medium ist die Wärmeleitfähigkeit, die teilweise von der Temperatur abhängt. Der Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit ist der *Wärmewiderstand* R_{th}, für die Anwendung des *ohmschen Gesetzes des thermischen Kreises*.

Der Wärmewiderstand eines Körpers wird nach der Formel $R_{th} = \frac{l}{\lambda * A}$ berechnet (R_{th} [K/W], l [m], A [m^2]).

Stoff	**Wärmeleitfähigkeit** λ [W/(m*K)]
Silber	429
Kupfer	390
Aluminium	204
Graphite	119...165
Silizium	148
Stahl, legiert	42
Keramik	12...17
Glas	1,0
FR4 (Epoxy)	0,3
Luft	0,026

Tabelle 2: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien

2.2.1 Bauteilkühlung

Sind zugeführte und abgeführte Leistung gleich, ist der Zustand stabil: Die Bauteiltemperatur steigt nicht weiter an. Ein am Bauteil angebrachter Kühlkörper vergrößert – in erster Näherung – dessen Oberfläche, sodass eine höhere Leistung abgegeben werden kann. Nach dem Einschalten des Bauteils setzt der Temperaturanstieg nicht sofort ein und folgt dann einer *e*-Funktion, ähnlich einer Kondensatoraufladung. Die thermische Zeitkonstante (Steilheit der Kurve) hängt von der Masse des Bauteils bzw. von der Masse des Kühlkörpers ab.

Aufgrund des Zeitverhaltens des Temperaturanstiegs wird zwischen verschiedenen Betriebsarten unterschieden, von denen bei elektrischen Komponenten nur S1, S2 und S3 relevant sind:

Der Dauerbetrieb S1 (DB) ist die häufigste Betriebsart eines Bauteils bzw. Gerätes. Die Endtemperatur wird erst nach einiger Zeit erreicht und bleibt dann konstant, muss aber unterhalb dem erlaubten Grenzwert liegen.

Im Kurzzeitbetrieb S2 (KB) wird das Bauteil (Gerät) nur so lange eingeschaltet, dass der thermische Endzustand nicht erreicht wird. Während der Ruhepause

kann das Bauteil völlig abkühlen. Die Maximaltemperatur ist von der Einschaltdauer, der thermischen Zeitkonstante und von der Verlustleistung abhängig. Bei gleicher Grenztemperatur kann das Bauteil während der Ein-Phase mit höherer Leistung betrieben werden.

Der Aussetzbetrieb S3 (AB) ist ähnlich dem KB, jedoch kann das Bauteil während der Ruhephase nicht völlig abkühlen. Die hier erreichte Maximaltemperatur ist niedriger als beim DB, aber höher als beim KB, sodass bei gleicher Grenztemperatur ein Betrieb mit, im Vergleich zum DB, mäßig erhöhter Leistung möglich ist, abhängig von der thermischen Zeitkonstante, der Ein- und der Ausschaltdauer. Sind Einschaltdauer, Zykluszeit und die Verlustleistung während der Einschaltzeit bekannt, kann die wirksame Dauerverlustleistung P_D näherungsweise wie folgt bestimmt werden:

$$P_D = P_E * \sqrt{\frac{t_B\,\%}{t_s\,\%}}$$

Der Kühlkörper muss die durch P_D erzeugte Wärme so abführen können, dass die zulässige Grenztemperatur des Bauteils nicht überschritten wird. Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die Temperatur während der Einschaltzeit höher (abhängig von der thermischen Zeitkonstante) als die durchschnittliche, durch P_D erzeugte Temperatur ist.

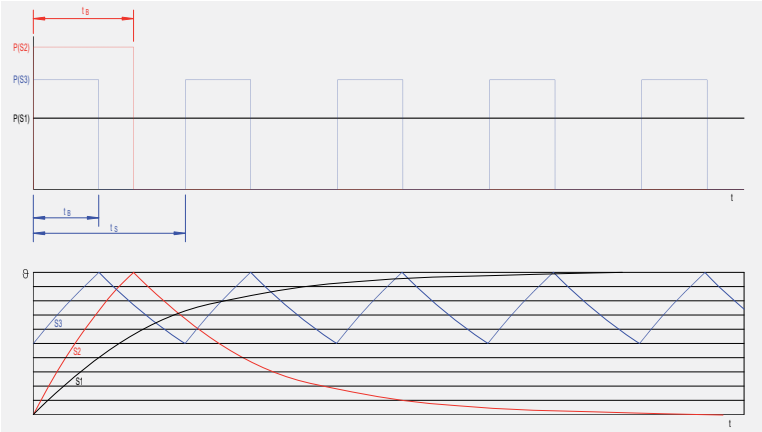


Abb. 1: Verlauf von Verlustleistung und Temperatur bei verschiedenen Betriebsarten

Abbildung 1 vergleicht den Temperaturverlauf einer verlustbehafteten Anordnung bei verschiedenen Betriebsarten. Die maximal erreichte Temperatur ist in allen Betriebsarten gleich. Bei der hier dargestellten Betriebszeit t_B kann die Verlustleistung im Aussetzbetrieb um ca. 50 Prozent und im Kurzzeitbetrieb um ca. 100 Prozent höher sein als im Dauerbetrieb.

2.2.2 Aktive und passive Kühlung

Die von den Bauteilen in einem Gerät abgegebene Energie erwärmt allmählich auch die im Gerät befindliche Luft. Erst wenn die durch das Gerät an die Umgebung abgegebene Leistung gleich der erzeugten ist, stellt sich ein stationärer Zustand ein und die Temperatur steigt nicht weiter an. Die Wärmeabgabe erfolgt dabei zum einen durch den Wärmeübergang von der erwärmten Luft im Geräteinneren über die Gehäusewände an die kühlere Außenluft, zum anderen durch Konvektion. Freie Konvektion wird die ungezwungene freie Luftströmung genannt, die durch den Dichteunterschied zwischen kühler und erwärmter Luft entsteht. Eine erzwungene Luftströmung (Lüfter) kann den Wärmeübergang verbessern. Eine grobe Abschätzung der erforderlichen Luftleistung bei gegebener Gesamtverlustleistung eines Gerätes zeigt Abbildung 2.

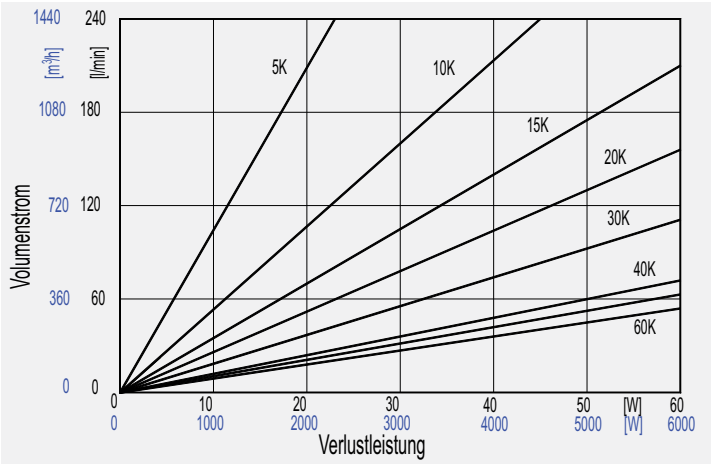


Abb. 2: Geschätzter Volumenstrom bei gegebener Verlustleistung

Dabei ist zu beachten, dass einzelne Bauteile mit besonders hoher Verlustleistung, wie Prozessoren, Leistungstransistoren und -ICs, trotz niederer Lufttemperatur im Geräteinneren zu heiß werden können und zusätzlich passiv oder aktiv gekühlt werden müssen (Abbildung 3). Heiße Leistungsbauteile können auch temperaturempfindliche Komponenten wie Elektrolytkondensatoren in ihrer Nähe schädigen, indem sie diese indirekt erwärmen. Ein auf der ebenen Oberfläche des Leistungsbauteils befestigter Kühlkörper vergrößert die Oberfläche erheblich. Wirkung: Die Wärmeabgabe steigt, die Bauteiltemperatur sinkt. Lüfterunterstützte Kühlkörper verstärken diesen Effekt (Abbildung 4). Zur Auswahl stehen Kühlkörper mit aufgesetztem Lüfter, Kühlkörper mit integrierten Lüftern und Kühlkörper mit seitlich angebrachten Tangentiallüftern. Dank der vielen verschiedenen Lüfterbauformen kann leicht eine optimale Lösung gefunden werden.

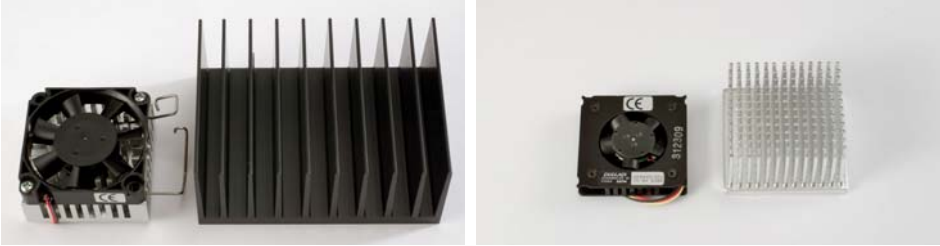


Abb. 3: Vergleich aktiver (links) und passiver (rechts) Kühlkörper mit annähernd gleichem Wärmewiderstand

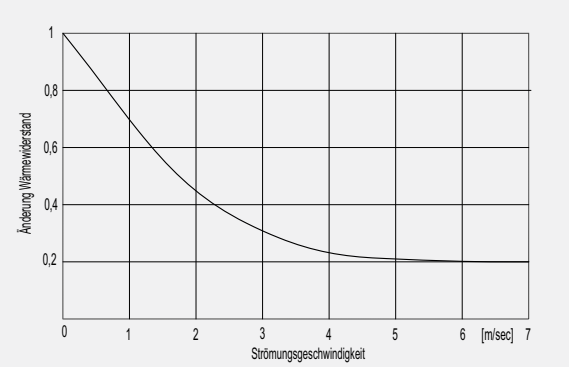


Abb. 4: Anblasen verbessert den Wärmewiderstand von Strangkühlkörpern

2.2.3 Kühlung von Leuchtmitteln

Seit mehr als 150 Jahren bringt die Glühlampe elektrisches Licht in unser Leben. Normalerweise benötigt sie keine forcierte Kühlung, obwohl durch ihren sehr schlechten Wirkungsgrad von 3 bis 5 Prozent der Großteil der zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird. Neue Leuchtmittel wie Energiesparlampen und LED-Lampen verdrängen die Glühlampe zunehmend. Licht emittierende Dioden wandeln bis zu 25 Prozent der zugeführten Energie in Licht um, müssen aber gekühlt werden, da ihre Energiedichte [W/cm^2] ungefähr 1000-mal größer ist als bei Glühlampen.

Bei Leistungs-LEDs ist auf ein effektives Wärmemanagement zu achten, da Leuchtintensität und Lebensdauer um rund 10 Prozent je 10 °C Chiptemperaturanstieg abnehmen. Während sich Leistungs-LEDs bis etwa 1 W Leistungsaufnahme noch gut passiv kühlen lassen, müssen Hochleistungs-LED-Lampen aktiv gekühlt werden, da ein passiver Kühlkörper zu groß, zu schwer und zu teuer wäre. Sämtliche Hersteller von Kühlkörpern bieten inzwischen spezielle Modelle für die LED-Kühlung an, die sich auch gut mit Lüftern kombinieren lassen.

Die bei einer Junction-Temperatur, die Temperatur des Halbleiterkristalls, von 85 °C erreichbare Lebensdauer beträgt etwa 10.000 h und ist damit viel höher als die einer Glühbirne. Die Lebensdauergrenze ist durch ein Absinken der Leuchtintensität auf 50 Prozent definiert und nicht durch einen Totalausfall der LED. Daher müssen die benötigten Lüfter entsprechend zuverlässig sein. L_1 (1 Prozent Ausfall nach n Stunden) von mindestens 10.000 h bei 40 °C ist anzustreben, wenn die Lampenlebensdauer nicht durch den Lüfter begrenzt sein soll. ***SEPA***®-Kugellagerlüfter erreichen bei 40 °C Umgebungstemperatur ein L_1 von 12.000 h und erfüllen somit die Mindestanforderung ausgezeichnet.

2.2.4 Entwärmung mittels Kühlkörper

Die Aufgabe eines passiven oder aktiven Kühlkörpers ist immer die Abfuhr der durch die Verlustleistung des elektronischen Bauteils (IC, LED) entstehenden Wärme, sodass die Kristalltemperatur einen bestimmten Wert nicht übersteigt. Die maximal mögliche Umgebungstemperatur ist die zweite Kenngröße, die zur

Ermittlung des Wärmewiderstands erforderlich ist. Auf dem Weg vom Kristall bis zur Umgebung durchdringt die Wärme Zonen mit unterschiedlichen Wärmewiderständen. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers ist nur ein Teil in der gesamten Kühlstrecke.

Äußerst wichtig ist die optimale thermische Ankopplung des zu kühlenden Bauteils an einen Kühlkörper. Die Oberflächen von Bauteil und Kühlkörper sind nie ganz eben und glatt. Ohne weitere Maßnahmen berühren sich beide Körper nur an relativ wenigen Punkten und die Wärmeleitung ist sehr schlecht, da größere Luftspalten bestehen, an denen kaum ein Wärmeübergang stattfindet. Es gibt mehrere Möglichkeiten, den Wärmeübergang zwischen Bauteil und Kühlkörper zu verbessern. Dabei wird immer die Luft zwischen Bauteil- und Kühlkörperfläche durch ein spaltfüllendes Medium mit möglichst hohem thermischen Leitwert verdrängt.

Eine *Wärmeleitpaste* ist eine meist mit keramischem Material oder Graphit angereicherte Fett- oder silikonhaltige Paste. Sie ist günstig und einfach anzuwenden, allerdings entsteht besonders bei silikonhaltigen Pasten die Gefahr der Verschmutzung.

Elastische *Wärmeleitfolien* passen sich bei der Montage relativ gut den rauen und unebenen Oberflächen beider Körper an und verringern so den Wärmewiderstand. Einseitig klebende Ausführungen lassen sich sehr einfach genau positionieren. Geliefert werden die Pads üblicherweise auf einem bandförmigen Kunststoffträger und sind mit einer Schutzfolie versehen. Vorteil: keine Verschmutzung. Die Folien sind jedoch relativ teuer und bei Demontage (Reparatur) wird die Folie häufig zerstört und muss sorgfältig entfernt werden.

Das im Anlieferzustand einer Wärmeleitfolie ähnliche *Zweiphasenmaterial* wird bei Erwärmung ab etwa 60 °C weich und passt sich den nicht idealen Oberflächen beider Medien sehr gut an. Beim Erkalten wird die Folie wieder hart, verliert aber nicht die im warmen Zustand gewonnene spaltfüllende Eigenschaft. Oft sind Kühler bereits mit Zweiphasenmaterial ausgestattet, welches sehr gute

Wärmeleiteigenschaft besitzt. Nachteil: Auch hier wird bei Demontage die Folie zerstört und muss sorgfältig entfernt werden.

Mit beidseitig klebenden Wärmeleitfolien lassen sich Kühlkörper auf die zu kühlenden Bauteile kleben. Diese Montageart ist bei großflächigen Verbindungen und flachen, leichten Kühlkörpern eine sehr preiswerte und effektive Methode. *Wärmeleitende Klebefolien* haben entweder einen Kunststoffkern mit keramischem Füllstoff und isolieren elektrisch, einen Kunststoffkern mit graphitartigem Füllstoff oder einen Metallkern aus Aluminium, wenn keine elektrische Isolation gefordert ist. Vorteile: Für Montage und Wärmeableitung ist nur ein Teil erforderlich und die Verbindung ist lösbar, wobei die Klebefolie zerstört wird. Klebeverbindungen eignen sich jedoch nur für relativ leichte Kühlkörper und sind nur bei sorgfältigster Verarbeitung und absolut sauberen Oberflächen sicher.

Eine gut wärmeleitende und mechanisch sehr sichere Verbindung zwischen Bauteil und Kühlkörper stellt der Wärmeleitkleber her. In der Regel bestehen Wärmeleitkleber aus zwei Komponenten. Der Kleber wird auf der einen Oberfläche aufgetragen, mit dem Aktivator wird die andere Oberfläche benetzt. Das Fügen muss nicht unmittelbar, aber innerhalb von wenigen Stunden erfolgen. Die Verbindung kann, je nach Fabrikat, bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur bereits innerhalb von wenigen Minuten handfest sein, was die Weiterverarbeitung erleichtert. Die Endfestigkeit wird nach einigen Stunden, ggf. unter Wärmeinwirkung, erreicht. Preiswerter als Klebefolien, weisen diese Kleber hervorragende mechanische und thermische Eigenschaften auf. Nachteil: Kleber und Aktivator müssen aufgetragen werden und die Klebeverbindung lässt sich nicht mehr lösen.

Oft sind konstruktionsbedingt oder wegen mechanischer Toleranzen Luftspalten bis zu mehreren Millimetern thermisch zu überbrücken. Dies kann mit so genannten *Spaltfüllern*, auch Gap-Filler genannt, erreicht werden. Das elektrisch isolierende, mit keramischen Stoffen gefüllte Silikon-Elastomer wird in Platten unterschiedlicher Dicke angeboten. Um seine optimale Wärmeleitfähigkeit zu erlangen, soll das Spaltfüllmaterial bei der Montage auf etwa 50 Prozent der An-

fangsdicke zusammengepresst werden. Es lassen sich Spalten von ca. 0,15 bis 3 mm überbrücken und auch bei Bauteilen unterschiedlicher Höhe können die Spaltfüller eingesetzt werden. Allerdings nimmt die Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Dicke des Füllstoffs und bei geringem Zusammenpressen ab. Eine mechanische Druckbefestigung des Kühlkörpers ist unbedingt erforderlich.

Thermische Durchkontaktierungen, Thermal Vias, verbessern die Wärmeleitfähigkeit in Z-Richtung (Dicke) der Leiterplatte. Sehr kleine Bauteile (SMD, Surface Mounted Devices) erlauben aus konstruktiven oder optischen (SMD-LED) Gründen oft kein direktes Anbringen eines Kühlkörpers am Gehäuse. Jedoch ist durch die verlöteten Anschlüsse und über den Gehäuseboden bereits ein sehr guter Wärmetransport möglich, der durch eine thermisch leitende Verklebung des Gehäuses an der Leiterplatte noch stark verbessert werden kann. Die Kühlwirkung einer Kupferfläche auf der Bauteilseite einer Leiterplatte ist gering und reicht meist nicht aus. Der Wärmeleitwert einer Leiterplatte in Z-Richtung ist mit etwa 0,3 W/mK sehr schlecht und kann durch ein Array von Thermal Vias um den Faktor 10 bis 50 verbessert werden. Ein solches Array besteht aus einer möglichst großen Anzahl von Durchkontaktierungen. Technisch sind bis zu 400 Bohrungen pro cm^2 mit einem Durchmesser von 0,35 mm möglich. Auf der Rückseite der Leiterplatte wird die über die Vias fließende Wärme über einen Kühlkörper abgeleitet.

Ein *Wärmerohr,* auch *Heatpipe* genannt, ist ein Wärmeübertrager, der unter Nutzung von Verdampfungs- und Kondensationswärme eines Stoffes eine hohe Wärmedichte erlaubt. Es ersetzt nicht einen Kühlkörper, sondern transportiert Wärme von A nach B und wird eingesetzt, wenn es wegen der Konstruktion nicht möglich ist, einen Kühlkörper in der erforderlichen Größe direkt am zu entwärmenden Bauteil anzubringen. Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Wärmerohres liegt zwischen 50.000 und 200.000 W/mK. Es gibt Standard-Wärmeleitrohre, doch wird eine Lösung, die speziell auf einen konkreten Anwendungsfall ausgerichtet ist, oft besser arbeiten.

2.2.5 Beispiel

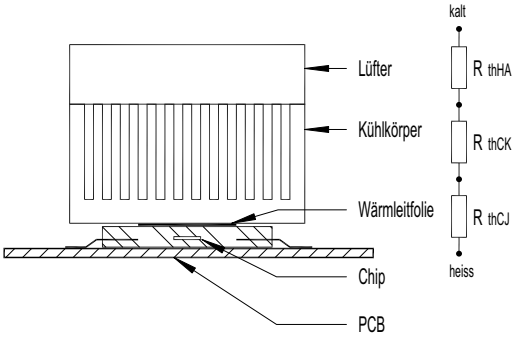


Abb. 5: Wärmeübergang in der Junction-Umgebung

Summe Wärmewiderstand: $R_{th} = R_{thCJ} + R_{thCK} + R_{thHA}$

Daraus Wärmewiderstand Kühlkörper: $R_{thHA} = R_{th} - R_{thCJ} - R_{thCK}$

Dabei sind:

R_{thCJ} = Wärmewiderstand Kristall (Junction) – Gehäuseoberfläche oder wärmeerzeugende Halbleiterzone – Gehäuseoberfläche, die mit dem Kühlkörper in Verbindung kommt. Die Angabe entfällt, wenn der Hersteller eine maximal zulässige Gehäuseoberflächentemperatur angibt.

R_{thCK} = Wärmewiderstand Gehäuse – Kühlkörper. Durch spaltfüllende Materialien optimierbar.

T_{thHA} = Wärmewiderstand des Kühlkörpers, der letztlich gesucht wird.

Rechenbeispiel:

Eine CPU soll gekühlt werden.

P_{VCPU} = 18 W (Angabe des Herstellers)

$T_{C\,max}$ = 85 °C (Angabe des Herstellers)

$T_{A\,max}$ = 40 °C (geschätzte Maximaltemperatur im Gerät)

Das Temperaturgefälle zwischen IC-Oberfläche und Umgebung beträgt

$\Delta T = T_{C\,max} - T_{A\,max}$, also 85 – 40 = 35 [K],

und der Gesamtwärmewiderstand

$R_{th} = \Delta T / P_{VCPU}$, gleich 35/18 = 1,94 [K/W].

Der Übergangswiderstand zwischen IC-Oberfläche und Kühlkörper kann anhand der thermisch aktiven Fläche und den Daten des spaltfüllenden Materials berechnet werden und liegt bei modernen Materialien etwa bei 0,2 K/W. Daher muss der Wärmewiderstand des Kühlkörpers

$R_{thHA} = R_{th} - R_{thCH}$ 1,94 – 0,2 = 1,74 [K/W] oder kleiner sein.

Für das Beispiel eignet sich ein HF500B50E05 mit 1,4 K/W. Nicht berücksichtigt ist hier der parallel zu R_{th} liegende Wärmewiderstand Chip – Leiterplatte (R_{thJPCB}). Diese eher vernachlässigbare Größe verbessert die Gesamtwärmeableitung nur geringfügig.

Viele moderne CPUs enthalten eine integrierte Messdiode, mit deren Hilfe die tatsächliche Chiptemperatur einfach festgestellt und mit den Herstellerangaben verglichen werden kann.

3 Lüfterbauarten

Der in der Umgangssprache verwendete Ausdruck Lüfter, englisch Fan, beschreibt definitionsgemäß eigentlich einen kleinen Ventilator. Als Ventilator hingegen wird umgangssprachlich ein eigenständiges, meist größeres Gerät zur Luftbewegung bezeichnet.

Ein Ventilator oder Lüfter besteht aus einem Rotor, der mit Schaufeln zur Luftförderung besetzt ist, dem Motor und einem Gehäuse, das auch die Motorlagerung enthält. Das Gehäuse bestimmt die Strömungsrichtung der bewegten Luft.

3.1 Axiallüfter

Axiallüfter (Abbildung 6) enthalten ein propellerähnliches Laufrad. Die Bewegung der Luft erfolgt weitgehend axial, also parallel zur Rotorachse. Die Formgebung der Rotorschaufeln ist nicht symmetrisch. Durch eine gezielte Krümmung wird eine Optimierung in Richtung einer Förderrichtung erreicht. Eine Drehrichtungs-/Förderrichtungsumkehr ist nicht vorgesehen. Die Schaufelgeometrie beeinflusst wesentliche Parameter des Lüfters wie Volumenstrom, Druck und Geräusch.
Die abströmende Luft enthält einen oft unerwünschten Drall. Durch so genannte Leitschaufeln lässt sich der Drall in eine weitgehend achsparallele Strömung umformen, wobei der Geräuschpegel allerdings deutlich ansteigt.
Das Laufrad des Lüfters ist gleichzeitig der Rotor des Antriebsmotors. Sehr häufig findet man Motoren mit axialem Luftspalt. Beim Gleichspannungslüfter wird ein Magnetring aus Kunststoff von einem Eisenring oder -topf umgeben, der den magnetischen Rückschluss bildet. Der Stator besteht meist aus 2 x 2 Polen, die durch entsprechende Wicklungen magnetisch erregt werden. Kleine, kurz gebaute Lüfter enthalten fast immer einen Klauenpolmotor, während die tiefer gebauten Motoren größerer DC-Lüfter einen Stator aus mehreren Lagen dünner Eisenbleche enthalten.

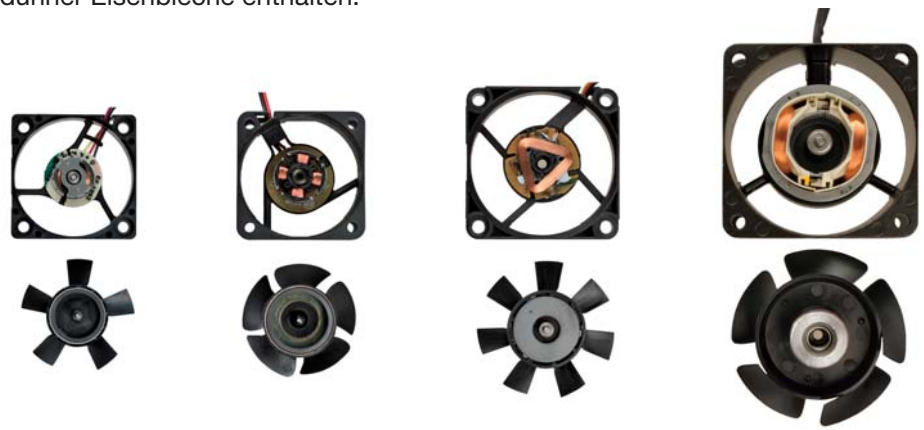


Abb. 6: Bauformen von Axiallüftern

Die Wicklungen des Stators werden so bestromt, dass die Pole eine zum gegenüberliegenden Rotormagneten anziehende Wirkung haben. Bei jedem Polwechsel entsteht bei dem einfach herzustellenden Zweipolmotor eine kleine Winkelzone mit neutraler elektromagnetischer Wirkung. Hier sind die links und rechts drehenden Kräfte gleich groß. Ein Motor könnte aus dieser Stellung nicht, oder nur mit unbestimmter Drehrichtung anlaufen. Asymmetrisch gestaltete Pole überlagern die elektromagnetisch neutrale Zone durch eine permanentmagnetische Wirkung (Reluktanzmoment). Der Motor pendelt sich beim Auslauf in eine permanentmagnetisch bestimmet Lage ein, aus der nicht nur ein sicheres Anlaufen möglich ist, sondern auch das elektromagnetisch entstehende Drehmoment unterstützt wird. Diese Konstruktion kommt bei allen DC-Lüftern vor. Ein über den gesamten Betriebstemperaturbereich und während der gesamten Lebensdauer bestens funktionierendes Lagersystem ist sehr wichtig, damit die Lüfter nach dem Abschalten ungebremst auspendeln, um wieder sicher starten zu können.

Extrem flache Lüfter haben keinen Platz für Motoren mit axialem Luftspalt. Hier finden so genannte Scheibenläufermotoren Anwendung. Der Rotor enthält einen scheibenförmig gestalteten Magnet aus Keramik oder bei besonders flachen Motoren aus SmCo (Seltenerdemagnet) bzw. NdFeB (Neodymmagnet). Durch den Rotormagneten entsteht eine konstante Kraft in axialer Richtung, die als Vorlast für Kugellager genutzt werden kann. Scheibenläufermotoren mit Gleitlager benötigen zum Abstützen ein Stirnlager am inneren Wellenende. Wegen der nahezu punktförmigen Belastung ist dieses Lager großem Verschleiß ausgesetzt und oft Ausfallursache bei billigen Flachlüftern.

Axiale AC-Lüfter sind noch sehr verbreitet, obwohl der Wirkungsgrad wegen des verwendeten Rohrläufermotors schlecht und die Leistungsaufnahme dementsprechend sehr hoch ist. Wegen der deutlich höheren Wärmebeanspruchung werden AC-Lüfter fast ausschließlich mit Metallrahmen angeboten und sind entsprechend teuer. Lüfterflügel aus Metall sind nur sinnvoll, wenn die AC-Lüfter bei Betriebstemperaturen über 60°C eingesetzt werden. Nur sehr große Lüfter werden mit Einphasen-Kondensatormotoren oder Dreiphasenmotoren ausgestattet, die einen höheren Wirkungsgrad haben.

Da in vielen Applikationen nur eine AC-Stromversorgung zur Verfügung steht, kann der mit einem Bruchteil der Leistungsaufnahme arbeitende DC-Lüfter nicht ohne weiteres eingesetzt werden. Die heutige Forderung nach Verringerung der Leistungsaufnahme zwingt hier zum Umdenken: Mit relativ einfach aufgebauten AC/DC-Wandlern (Abbildung 7) können die AC-Lüfter durch Standard-DC-Lüfter ersetzt werden. Die Gesamtleistungsaufnahme solcher Kombinationen liegt nur unwesentlich über der von DC-Lüftern. Während aufgrund strenger Vorschriften für Isolation und Kriechstrom die Größe von 230-VAC-Lüftern nach unten auf 60 x 60 x 25 mm begrenzt ist, kann nach einem AC/DC-Wandler jede beliebige DC-Lüftergröße eingesetzt werden. Es ist möglich, den AC/DC-Wandler auch in größere Lüfter zu integrieren, doch gelingt dies nur auf Kosten der Bautiefe und stellt, besonders bei Verwendung mehrerer Lüfter in einem Gerät, eine sehr teure Lösung dar. Mit externen AC/DC-Wandlern gibt es diese Nachteile nicht.

Abb. 7: AC/DC-Wandler für Lüfter

3.2 Radiallüfter

Bei dieser Lüfterbauart wird die Luft axial angesaugt und die Durchströmung des Laufrades erfolgt in radialer Richtung. Durch die 90°-Umlenkung des Luftstromes haben Radiallüfter (Abbildung 8) einen anderen Einsatzbereich als die Axiallüfter. Aufgrund der besonderen Konstruktion des einem Mühlrad ähnlichen Laufrads, kann der Lüfter größere Druckerhöhungen als ein Axiallüfter mit nahezu linearer Kennlinie erzeugen. Durch Veränderung der Lüfterschaufeln und des Gehäuses gelingt es, die Lüfter für das Ausblasen in eine oder in alle Richtungen zu optimieren.

Saugt der Lüfter die Luft von beiden Seiten an, spricht man von doppelflutiger Ausführung. Solche meist lange AC-Radiallüfter werden zur Gerätebelüftung eingesetzt. Flache DC-Radiallüfter hingegen werden verstärkt in der Elektronikkühlung verwendet, da sich mit dieser Bauart in Verbindung mit Strangpresskühlkörpern sehr Platz sparende Aktivkühllösungen realisieren lassen. Radiallüfter mit ungerichteter Ausblasrichtung sind oft in CPU- oder Chipcoolern integriert.

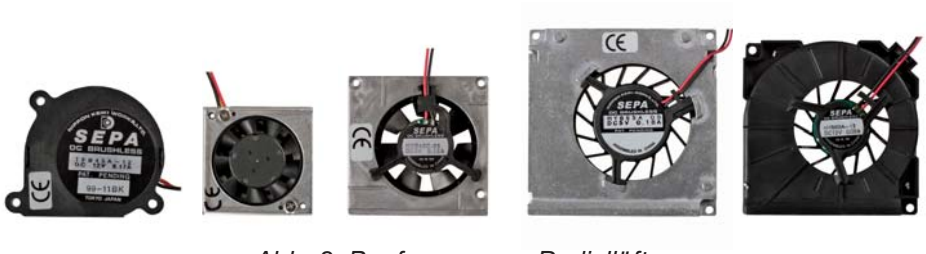


Abb. 8: Bauformen von Radiallüftern

3.3 Gehäuselose Lüfter

Wie oben erwähnt, benötigen Lüfter einen, den Propeller umschließenden, zylindrischen Kanal, um zu funktionieren. Beim Lüfter ohne Gehäuse (Rahmen) (Abbildung 9) enthält der Stator nur Elemente zur Befestigung, während die Lüfterfunktion erst durch den Einbau in ein Multifunktionsteil, welches den Propeller zylindrisch umschließt, erreicht wird. Diese Bauform ermöglicht besonders Platz sparende und preiswerte Konstruktionen, wenn der Lüfterrahmen in ein, auch andere Funktionen erfüllendes Bauteil integriert wird. Allerdings können die Lüftereigenschaften nur mit einem Gehäuseadapter gemessen werden. Rückschlüsse auf die einmal für eine bestimmte Konstruktion festgestellte Förderleistung sind im eingebauten Zustand über die Messung der Drehzahl möglich.

Abb. 9: Gehäuseloser Lüfter

3.4 Diagonallüfter

Diagonallüfter sind ähnlich aufgebaut wie Axiallüfter, sie saugen die Luft axial an, die Ausströmung erfolgt jedoch diagonal. Der Ausströmwinkel kann durch die Form von Nabe und Luftführung im Gehäuse in weiten Grenzen verändert werden. Der Einsatz kann bei größeren Lüftern sinnvoll sein, besonders wenn das Gerät einen großen Strömungswiderstand aufweist. Durch die nicht achsparallele Ausströmrichtung darf die Ausblasseite nicht durch in der Nähe der Lüfteraußenkante befindliche Teile oder Gehäusewände behindert werden.

3.5 Sonderlüfter

Als Sonderlüfter bezeichnen wir kundenspezifische Lüfterkonstruktionen, die vom Standarddesign abweichen, jedoch durchaus Einzelteile oder komplette Baugruppen aus Standardlüftern enthalten können. Populäres Beispiel aus dieser Familie sind beispielsweise die in Pkw-Klimaanlagen eingesetzten Lüfter (Abbildung 10), die extrem geräuscharm arbeiten und den Luftstrom aus dem Fahrgastraum einem Temperatursensor (NTC) zuleiten. In der Regel sind dabei spezielle Anforderungen des Kunden an die Mechanik und Elektronik des Lüfters zu berücksichtigen. Sonderlüfter werden ausschließlich für eine bestimmte Applikation entwickelt und es sind eigene Werkzeuge erforderlich. Durch die hohen Anfangskosten sind Sonderlüfter nur bei sehr hohen Fertigungsstückzahlen wirtschaftlich.

Abb. 10: Sensorlüfter für Pkw-Klimaanlagen

3.6 Flachlüfter

Die fortschreitende Miniaturisierung der elektronischen Bauelemente erschwert die Entwärmung erheblich. Mit speziellen Lüfterbauformen kann auch bei extrem geringem Platzbedarf eine effektive Lüftung erfolgen. Nicht nur kleine Abmessungen, sondern extrem flache Lüfter sind gefordert. Mit nur 10 x 10 x 2 mm setzt ***SEPA***® neue Maßstäbe bei der Realisierung von flachen Miniaturlüftern.

4 Förderleistungen

Ventilatoren haben die Aufgabe, Luft zu bewegen und diese durch eine Anlage, beispielsweise ein elektronisches Gerät, zu drücken. Die Anlage setzt diesem Vorgang einen Strömungswiderstand entgegen. Der Lüfter muss diesen Widerstand durch Erzeugen eines Druckes überwinden. Je größer der durch den Lüfter erzeugte Volumenstrom durch das Gerät ist, umso größer wird auch der Strömungswiderstand (Druckverlust), den der Lüfter durch größeren Druck ausgleichen muss. Zwischen Lüfter und Anlage stellt sich so immer ein Gleichgewichtszustand ein.

4.1 Lüfterkennlinie, Gerätekennlinie und Arbeitspunkt

Die in den Datenblättern angegebene Förderleistung wird bei frei ausblasendem Ventilator ohne Gegendruck ermittelt. Hier fördert der Ventilator den maximalen Volumenstrom. Bläst dieser hingegen in einen Raum ohne Luftaustritt, entwickelt er seinen maximalen Druck bei einem Volumenstrom 0. Dieser Wert steht ebenfalls in den Datenblättern. Die Kennlinie zwischen diesen beiden Extremwerten zeigt den Zusammenhang zwischen Förderleistung und Druck.

Wird der Lüfter an ein Gerät angeschlossen, muss er den auftretenden Strömungswiderstand überwinden, indem er einen gewissen Druck aufbaut, wodurch der Volumenstrom abnimmt. Die Gerätekennlinie zeigt den Druckverlust in Abhängigkeit vom Volumenstrom. Der Schnittpunkt von Lüfterkennlinie und Gerätekennlinie ist der Arbeitspunkt des Ventilators (Abbildung 11). Das Produkt aus Volumenstrom und Druckerhöhung im Arbeitspunkt ergibt die zugehörige Förderleistung P des Ventilators.

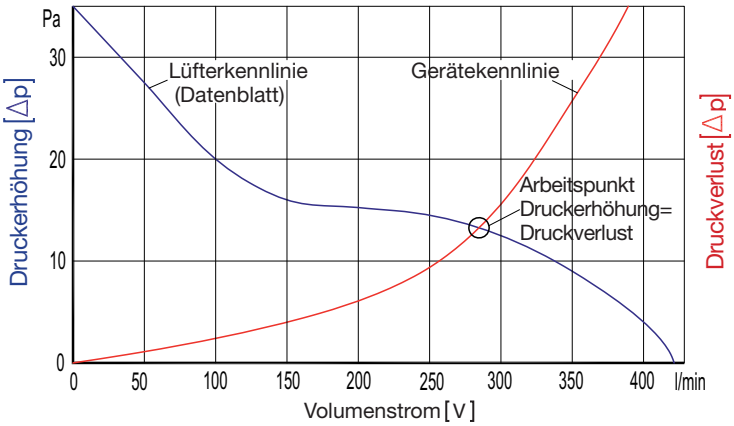


Abb. 11: Ventilatorkennlinie, Gerätekennlinie, Arbeitspunkt

Die Druckwerte werden in Pa angegeben (1 Pa = 1 N/m²).
Ältere Datenblätter zeigen auch mmH_2O oder InH_2O.

Umrechnung: 1 Pa = 9,81 mmH_2O 1 mmH_2O = 0,102 Pa

1 Pa = 0,386 InH_2O 1 InH_2O = 2,589 Pa

Für den Volumenstrom wird in den Katalogen m³/h, l/min, seltener l/s oder CFM verwendet.

Umrechnungen: 1 m³/h = 16,67 l/min 1 l/min = 0,06 m³/h

1 l/s = 3,6 m³/h 1 m³/h = 0,2778 l/s

1 m³/s = 60 m³/h 1 m³/s = 60.000 l/min

1 CFM = 1,7 m³/h 1 CFM = 28 l/min

Die Einsattelung der Lüfterkennlinie ist typisch für die axiale Bauform. Bei zunehmender Druckerhöhung reißt die Flügelumströmung an der Radnabe ab, was zu einem Druckabfall und einem Geräuschanstieg führt. Radial- und Tangentiallüfter haben diese Einsattelung nicht oder nur sehr schwach ausgeprägt.

Für die Ermittlung der Lüfterkennlinie sind aufwendige Prüfanlagen erforderlich, über die der Lüfterhersteller verfügt. Anwender und Händler besitzen diese meist nicht. Die Ermittlung der notwendigen Förderleistung kann durch Simulationsprogramme erfolgen, wenn die Gerätegeometrie und die Lüfterkennlinie ausreichend genau bekannt und im Simulationsprogramm gespeichert sind. Einfacher und meist ausreichend genau ist die empirische Methode: Durch Temperaturmessung an den kritischen Bauteilen wird festgestellt, ob der anfangs gewählte Lüfter zufriedenstellende Ergebnisse bringt. Durch Verändern von Lüftergröße und Drehzahlanpassung wird rasch der optimale Lüfter ermittelt. Mit dem Diagramm in Abbildung 2 kann bei gegebener Temperaturerhöhung und abzuführender Verlustleistung der erforderliche Volumenstrom näherungsweise festgestellt werden.

Den so ermittelten Volumenstrom muss der Lüfter trotz Druckerhöhung liefern. Wenn die Gerätekennlinie nicht bekannt ist, muss die Druckerhöhung des Lüfters geschätzt werden. Je nach der Komponentendichte im Gerät kann eine Druckerhöhung von 20 bis 30 Prozent des Maximaldruckes angenommen werden. Dieser Bereich wird von üblichen Axiallüftern gut abgedeckt, ohne in den ungünstigen Einsattelungsbereich der Lüfterkennlinie zu geraten. Ist die Druckerhöhung durch extreme Bauteildichte größer, muss ein Tangential- oder Radiallüfter gewählt werden, dessen Kennlinien kaum oder gar keine Einsattelung aufweisen.

5 Geräuschverhalten

Die Belastung durch Lärm ist zu einem ernst zu nehmenden Problem geworden. Im privaten wie im kommerziellen Bereich steigt die Belastung durch elektromagnetischen und akustischen Smog. Während im vergangenen Jahrzehnt die Strahlungsemission der Geräte sehr stark verringert wurde, ist die Geräuschentwicklung erst in jüngerer Zeit ein stark beachtetes Thema geworden. Die Lärmbelastung in größeren Büros schränkt die Belastbarkeit und Konzentration der dort tätigen Mitarbeiter ein und ist bei andauernder Einwirkung sogar gesundheitsschädlich. Die Elektronik selbst entwickelt kein Geräusch. Boozer und andere Signalgeber lassen sich abschalten und durch Lichtsignale ersetzen. Festplattenlaufwerke und Lüfter sind zur Funktion der Anlagen (derzeit) noch unersetzbar, entwickeln aber mehr oder weniger unangenehmen Lärm. Es ist abzusehen, dass der elektromechanische Plattenspeicher (HDD) in nicht allzu ferner Zeit durch Halbleiterspeicher sehr hoher Kapazität ersetzt wird. Auf Lüfter kann jedoch, wie weiter oben erwähnt wurde, kaum verzichtet werden.

5.1 Ursachen der Geräuschentwicklung

Zunächst muss zwischen Luftschall und Körperschall unterschieden werden. Beide Schallereignisse zusammen machen sich in unterschiedlicher Gewichtung bemerkbar und müssen getrennt optimiert werden.
Das Geräusch, welches vom Lüfter direkt über die Luft ausgesendet wird, heißt Luftschall:

- Rauschen, das durch die Luftverwirbelung an den Propellerflügeln erzeugt wird
- Vibrationen, die der Propeller und das Gehäuse an die Luft abstrahlen
- Lagergeräusch, wie Rollgeräusch von Kugellagern oder Klappern einer Welle im Gleitlager
- Luftschwingungen, die durch zu nahe an Gehäusestegen oder Schutzgitter vorbeibewegende Propellerflügel erzeugt werden (Sireneneffekt)

Die Angaben in den Datenblättern der Lüfter sind in dB(A), das heißt, es wurde eine dem menschlichen Ohr für niedrige Lautstärkepegel angepasste Frequenz-

bewertung (A-Kurve, Abbildung 12) vorgenommen und sie beziehen sich ausschließlich auf den Luftschall, wobei der Lüfter im extrem schallarmen Raum auf Gummiseilen aufgehängt, mit 1 oder 0,1 m Abstand zum Mikrofon, gemessen wird. 0 dB ist nicht etwa mit lautlos gleich zu setzten, sondern entspricht einem (äußerst) geringen Schalldruck von $2*10^{-5}$ Pa. Leider eignet sich der Luftschall allein kaum für die Abschätzung der Geräuschentwicklung in einem Gerät.

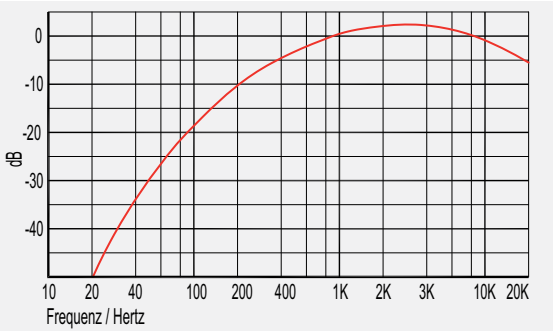


Abb. 12: A-Bewertungskurve

Unter Körperschall versteht man nieder- und mittelfrequente Vibrationen, die im Lüfter durch den Motor, durch das Lager und durch schlechte Wuchtung angeregt werden und die der Lüfter über seinen Rahmen an das Gerätegehäuse leitet, an das er montiert ist. Die Gehäusewand strahlt die Vibrationen wie ein Lautsprecher als Luftschall ab, wobei durch Fläche, Dichte, Material und Steifigkeit der Gehäusewand die Abstrahlenergie in sehr weiten Grenzen schwanken kann. Durch Resonanzen können Körperschallfrequenzen besonders angeregt oder auch gedämpft werden. Somit kann ein im Luftschall besonders leiser Lüfter in einem Gerät sogar lauter sein als ein anderer Lüfter mit schlechteren Daten und umgekehrt.

Die tatsächlich wahrgenommenen Geräusche setzen sich aus Luftschall und Körperschall zusammen. Lüfter und Gerät beeinflussen das Geräusch, sodass eine Geräuschoptimierung schon bei der Konstruktion beider Einheiten vorgenommen werden soll. Das Gehäuse kann bestimmte Körperschallfrequenzen durch Resonanzen verstärken. Ähnlich kann eine Luftsäulenresonanz im Ge-

häuseinneren zufällig mit einer vom Lüfter über die Luft oder über das Gehäuse abgegebenen Frequenz übereinstimmen und verstärkt werden.

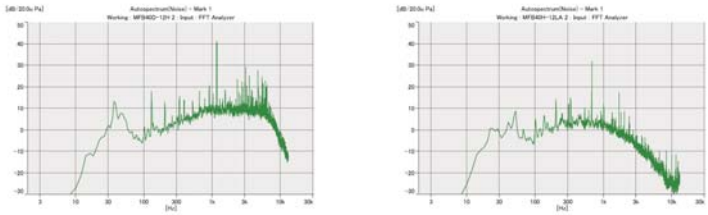


Abb. 13: Geräuschentwicklung älterer (links) und moderner (rechts) Lüfter

Moderne Lüfterkonstruktionen der letzten Generation sind tatsächlich leiser (Abbildung 13). Eine Verbesserungen der Schaufelgeometrie steigerte auch die Luftleistung. Dadurch ist es möglich, mit niederer Drehzahl geräuscharm einen ausreichenden Volumenstrom zu erzeugen.
Geräteseitig wirkt die Forderung nach Verkleinerung der Geräuschoptimierung entgegen: Je kleiner die Abmessungen der Lüfter werden, umso höhere Drehzahlen sind notwendig, um die geforderte Luftleistung zu erreichen. Dem verbesserten Wirkungsgrad der elektronischen Komponenten stehen immer höhere Leistungsanforderung (Taktfrequenz der CPU, Speichervolumen, Abgabeleistung von Stromversorgungen oder Steuerungen usw.) sowie immer kompaktere Bauweisen entgegen, sodass die geräuschoptimierte aktive Kühlung immer wichtiger wird.

5.2 Geräuschoptimierung

Bei der Entwicklung eines elektronischen Gerätes muss die Kühlung von Anfang an mit eingeplant werden. Es ist besser, eine überdimensionierte Kühlung nach dem Vorliegen endgültiger Messungen zu verkleinern, als eine unterdimensionierte Kühlung nachträglich unter erheblichen Schwierigkeiten zu verstärken. Einige Regeln für die nach dem Geräusch optimierte Lüfterauswahl:

- Stets den mechanisch größtmöglichen Lüfter wählen. Je größer der Lüfter, umso niedriger kann seine Drehzahl sein, die zur Erzeugung des erforderlichen Luftstroms benötigt wird.

- Die Lüfterdrehzahl der tatsächlich benötigten Kühlleistung durch Temperatursteuerung anpassen. Die Förderleistung eines Lüfters muss immer den ungünstigsten Bedingungen entsprechen. Im Normalbetrieb wird diese Luftleistung kaum benötigt, der Lüfter kann langsamer drehen. Bei jedem DC-Standardlüfter ist das mit einer kleinen Zusatzelektronik (Abbildung 14) zu geringen Kosten möglich. Die Drehzahlsteuerung erfolgt bei DC-Lüftern einfach über die Betriebsspannung. Die im Datenblatt angegebene untere Spannungsgrenze ist für den sicheren Anlauf unbedingt erforderlich und muss beim Starten kurzzeitig anliegen. Im Betrieb kann die Spannung ohne weiteres auf 50 Prozent zurückgenommen werden, 5-VDC-Lüfter benötigen wenigstens 3,5 VDC Betriebsspannung nach dem Hochlaufen.

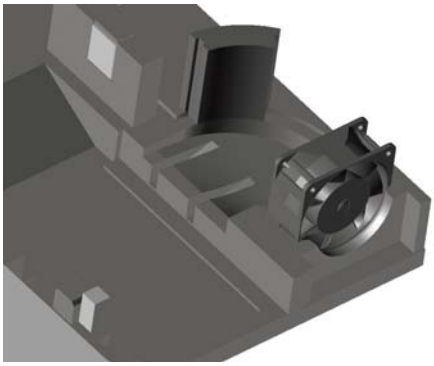
Abb. 14: Elektronik zur Drehzahlsteuerung

- Müssen mehrere Lüfter parallel betrieben werden, soll deren Drehzahl nicht gleich sein. Entweder wählt man Lüfter unterschiedlicher Drehzahl oder sieht unterschiedliche Versorgungsspannungen (wenigstens ±5 Prozent) vor, um Schwebungsresonanzen zu vermeiden.
- Gleitlagerlüfter sind höchstens messbar, aber nicht hörbar leiser. Jedoch können sie nach relativ kurzer Zeit durch Lagerverschleiß deutlich lauter werden. Moderne Gleitlagersysteme (HYPRO, VAPO usw.) sind zwar besser als Standardgleitlager, aber auch teurer und dem Kugellager besonders im Grenztemperaturbereich an Zuverlässigkeit unterlegen.
- Pulsweitenmodulation (PWM) ist nur bei entsprechend ausgestatteten Lüftern zulässig. Diese haben einen Steuereingang, mit dem die Motorspulen ein- und ausgeschaltet werden können, während die Kommutierungselektronik permanent mit Spannung versorgt bleibt. Die Geräuschreduzierung

ist mäßig, da die Taktung hörbar ist. Die PWM-Frequenz wird meist zwischen 30 und 400 Hz gewählt, sodass möglichst wenig Geräusch entsteht. Bei Standardlüftern soll ein einfaches LC-Filter vorgeschaltet werden, damit trotz Spannungswelligkeit die Versorgungsspannung direkt am Lüfter während der Austaktphase nie unter 3,5 V sinkt.

5.3 Montage im Gerät

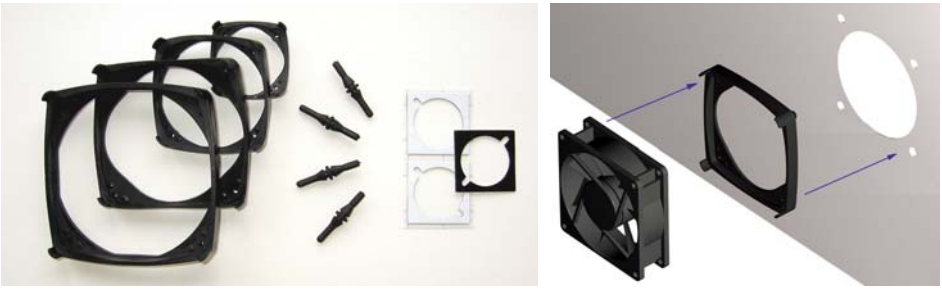
Die Vorauswahl der akustisch am besten geeigneten Modelle kann eventuell mit der aus anderen Gesichtspunkten (z.B. Zuverlässigkeit, elektrische oder aerodynamische Parameter) kollidieren, insbesondere wenn der favorisierte Lüfter im Gerät doch zu laut ist. Konstruktive Maßnahmen verbessern die Geräuschentwicklung im Gerät:



- Die den Lüfter tragende Wand immer so dick, steif und mit so geringer Fläche wie möglich wählen.
- Körperschallankopplung durch elastische Zwischenelemente (Gummiringe oder -Manschetten) optimieren. Volumen im Inneren des Gerätes durch Schaumstoffeinlagen optimieren (verkleinern).
- Ansaug- und Ausblasseite des (der) Lüfter(s) strömungstechnisch trennen.
- Schutzgitter nie direkt vor dem Lüfter anbringen (Abstand ≥ 10 Prozent Lüfterdurchmesser).
- Kompetenten Lüfteranbieter bei Planung und Optimierung der Kühllösung hinzuziehen.

Mechanisch und akustisch hervorragend und relativ preiswert ist die Montage der Lüfter mittels dämpfender Montagehilfen (Abbildung 15) wie beispielsweise mit kundenspezifisch gefertigten Schaumstoffteilen. Diese konstruktiv optimierten Teile können sogar Luftkanäle enthalten und so den Luftstrom gezielt auf die kritischen Bauteile leiten. Dadurch kann eventuell ein langsam drehender, leiser

Lüfter gewählt werden. Das Einbringen des Formteils und des Lüfters er- folgt einfach durch montage- und demontagefreundliches Stecken. Elastische Lüftermanschetten in Standardabmessungen für Lüfter ab 60 x 60 mm oder elastische Nieten sind eine weitere preiswerte Montagehilfe für kleinere und mittlere Mengen. Lüfter kleinerer Abmessungen bis 40 x 40 mm können auch gut durch doppelseitig klebende Schaumstoffstanzteile montiert werden. In jedem Fall lässt sich die Körperschalldämpfung sehr effektiv verbessern.



Werkzeichnung Ruch-Novaplast

Abb. 15: Dämpfende Montagehilfen

Eine einfache und günstige, aber dennoch gute Entkopplung ergibt sich, wenn die Befestigungsschrauben nicht direkt an der Gehäusewand, sondern mit Hilfe von Kabeldurchführungen (Abbildung 16) montiert werden.

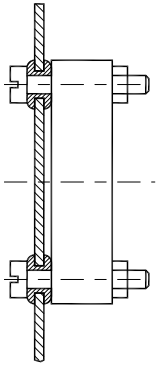


Abb. 16: Lüftermontage mit Kabeltüllen

6 Lüftungskonzepte

Bei der Konstruktion eines Gerätes oder einer Anlage ist festzulegen, in welcher Richtung die Durchströmung erfolgen soll und wo Lüfter, Lufteinlass und -Auslass anzuordnen sind.

6.1 Horizontale oder vertikale Durchlüftung

Bei der Anlagenkühlung wird Luft erwärmt, weshalb es von Vorteil ist, die Wirkung der freien Konvektion zu nutzen und die Durchströmungsrichtung von unten nach oben zu wählen. Dieser Grundsatz gilt vor allem bei hohen Anlagen wie Schränken.

In vielen Anlagen, insbesondere bei flacher Gerätebauform, ist jedoch die Energie, die sich durch die Temperaturunterschiede ergibt, viel kleiner als die von den Lüftern erzeugte Strömungsenergie. Hier lassen sich auch alle anderen alternativen Strömungsrichtungen ohne merkbare Abstriche realisieren.

Bei der Gerätekonstruktion müssen aber auch einige praktische Gesichtspunkte beachtet werden:

- An- und Ausblasöffungen möglichst weit voneinander entfernt und nicht auf Dachflächen anordnen, die auch als Ablage genutzt werden könnten
- Ansaugöffnung ohne Filter nicht in Bodennähe vorsehen, da sonst Schmutz und Staub ins Gerät gelangen
- Ausblasöffnung so wählen, dass der austretende Luftstrom den Benutzer des Geräts nicht direkt anbläst.

6.2 Saugende oder blasende Anbringung des Lüfters

Grundsätzlich arbeitet der Lüfter, unabhängig von der Durchströmungsrichtung, am gleichen Schnittpunkt zwischen Lüfterkennlinie und Gerätekennlinie. Zu beachten ist jedoch, dass die Saugströmung eines Lüfters näherungsweise linear, also geordnet erfolgt, während das Ausblasen turbulent, also unregelmäßig und in einer Vorzugsrichtung (beim Axiallüfter axial) stattfindet. Die Turbulenz verstärkt die Kühlwirkung an den angeströmten Bauteilen, weshalb die druckseitige Anordnung zu empfehlen ist. Hinzu kommt, dass hier der Lüfter nicht durch

die ausgeblasene Luft des Gerätes belastet wird, da er die relativ kühle Umgebungsluft ansaugt. Die Lebensdauer erhöht sich.
Soll das Eindringen von Staub in das Gerät verhindert werden, muss ein Staubfilter vor dem Lüfter an der Lufteintrittsöffnung angebracht werden. Der im Gerät aufgebaute Überdruck verhindert, dass Staub an undichten Stellen des Gehäuses eindringen kann.

In einzelnen Fällen kann der Lüfter auch auf der ausblasenden Seite des Gerätes angebracht werden, besonders wenn die gewünschte Verteilung der Durchströmung nicht anders erreicht werden kann.

Der Lüfter kann allerdings auch an beliebiger Stelle inmitten des Geräts angeordnet werden. Dabei ist zu beachten, dass er an einer Trennwand befestigt ist, die einen Rückstrom der Luft von der Über- zur Unterdruckseite verhindert. Der Rückstrom hätte zur Folge, dass ein Teil des Volumenstromes nicht für die Gerätebelüftung zur Verfügung steht und nur ein Teil der Förderleistung verfügbar ist.

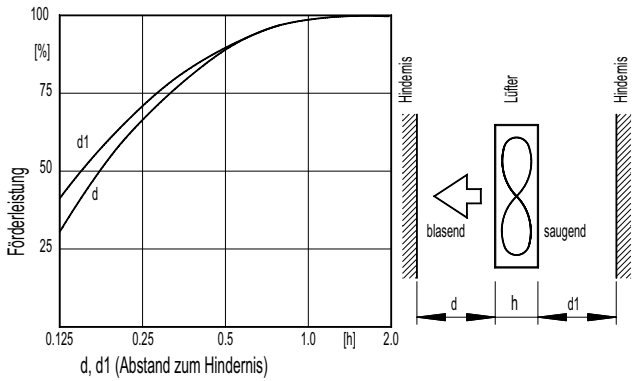


Abb. 17: Saugende oder blasende Anordnung von Lüftern

6.3 Mehrfachanordnung von Lüftern

Reicht ein einzelner Lüfter nicht für die Kühlung einer Anlage aus und kann aus konstruktiven Gründen kein Lüfter mit größeren Abmessungen (und höherer Luftleistung) gewählt werden, ist eine Mehrfachanordnung von Lüftern sinnvoll. Vorher ist zu klären, ob eine Parallel- oder eine Reihenanordung sinnvoll ist.
Bei nebeneinander angeordneten Lüftern vervielfacht sich der Volumenstrom mit der Zahl der eingesetzten Lüfter. Dabei muss beachtet werden, dass sich zu dicht nebeneinander angeordnete Lüfter gegenseitig behindern. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei gegebener Gerätekennlinie der Volumenstrom keineswegs linear mit der Zahl der Lüfter ansteigt, da der Druckverlust der Gerätekennlinie mit dem Quadrat des Volumenstroms zunimmt.

Der Druck lässt sich durch übereinander gestapelt angeordnete Lüfter erhöhen. Die rechnerisch mögliche Verdopplung durch zwei Lüfter wird in der Praxis, besonders bei eng aneinander gesetzten Lüftern, nicht erreicht, da die Abströmung des ersten Lüfters einen Drall enthält, der die Ansaugbedingung des zweiten Lüfters verschlechtert. Mit so genannten Luftleiträdern zwischen den Lüftern kann der Drallanteil des ersten Lüfters in die Hauptströmungsrichtung des zweiten Lüfters umgelenkt werden. Sogar einfache Luftleiträder mit achsparallelen Leitschaufeln verbessern bereits deutlich die Förderleistung. Kann, etwa aus Platzgründen, kein Luftleitrad eingesetzt werden, sollen ein Lüfter an der Lufteintrittsseite und der zweite an der Luftaustrittsseite angebracht werden. Die beim Durchströmen durch das Gerät stattfindende Entkopplung der beiden Lüfter ist sehr gut, es werden nicht nur gute Strömungsleistungen, sondern auch optimale Geräuschpegel erzielt.

Werden zwei Lüfter mit gegensinniger Drehrichtung dicht übereinander eingesetzt, verdoppelt sich der Druck, allerdings bei stärkerer Belastung der Antriebsmotoren und erheblich höherem Geräuschpegel.

In größeren Anlagen ist die Mehrfachanordnung von Lüftern üblich. Dabei werden Lüfter nebeneinander oder übereinander oder sogar in Kombination dieser Montageanordnungen eingesetzt. Dabei ist vorteilhaft, dass bei einem Ausfall

eines einzelnen Lüfters eine Lüftungsnotversorgung der Anlage erhalten bleibt. Allerdings wirkt der ausgefallene Lüfter in übereinander liegender Anordnung als Dämpfung, die bei blockiertem (nicht mitlaufendem) Rotor bis zu 50 Prozent Druckverlust verursachen kann.

6.4 Verluste durch besondere Einbaubedingungen

Elektrische Geräte werden im Allgemeinen über den gesamten Querschnitt belüftet. Besondere Luftführungseinrichtungen, wie Kanäle oder Krümmungen, werden nur in wenigen Fällen benötigt. Der gerätebedingte Druckverlust entsteht bei der Durch- und Umströmung von Gerätekomponenten, Baugruppen oder Leiterplatten und bei den Einlass- und Austrittsöffnungen, die meist Schutzgitter oder Staubfilter enthalten.Wegen der komplexen Anordnung der Komponenten lassen sich Strömungsverluste kaum berechnen. Steht ein fertiges Gerät (Entwicklungsmuster) zur Verfügung, kann experimentell weiter gearbeitet werden. Da ein Ventilatormessplatz kaum vorhanden ist, kann durch Einbau den eines bekannten Lüfters und durch Messen der Druckerhöhung im Gerät (bei von außen ansaugenden Lüftern an der Luftaustrittsseite) oder der Druckminderung (bei nach außen blasenden Lüftern an der Lufteintrittsseite) der Arbeitspunkt auf der Lüfterkennlinie näherungsweise bestimmt werden. Noch einfacher ist, die Temperaturerhöhung im Gerät oder an den kritischen Bauteilen zu messen und den Lüfter entsprechend der Ergebnisse zu variieren.

Im Allgemeinen sind Lüfter für den offenen, auf der Luftaustrittseite nicht behinderten, Einbau optimiert. Wird der Luftaustritt durch nahe am Lüfter angeordnete Bleche wie Gehäusedeckel und -boden gestört, wird die Förderleistung deutlich herabgesenkt. Ebenso wirkt ein Hindernis (Platte) direkt vor der Ausblasseite des Lüfters. Der Einfluss ist vernachlässigbar, wenn der Abstand zur Lüfterkante mindestens die zweifache Lüfterdicke beträgt.

Ein wesentlicher Anteil des Druckverlusts entsteht durch Schutz- und Filtergitter (Abbildung 18). Während bei speziellen Lüftergittern nur wenig Druckverlust entsteht, können strömungstechnisch nicht optimierte, oft im Gehäuse integrierte (gestanzte) Gitter erhebliche Verluste und Geräusche erzeugen. Bei optimierten

Gittern ist die Geräuschzunahme bei saugseitiger Anbringung relativ gering, bei druckseitiger vernachlässigbar.

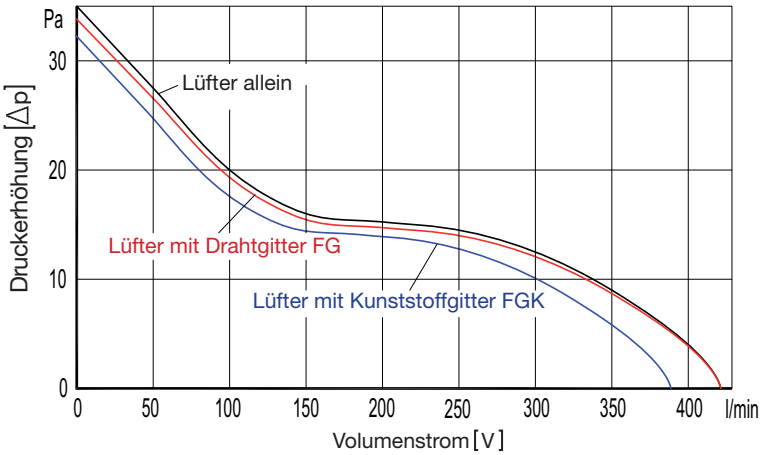


Abb.18: Druckverlust durch Schutzgitter und -filter

6.5 Leistungsaufnahme

Nicht vorrangig, aber zunehmend an Bedeutung ist die elektrische Leistung, die einem Lüfter zugeführt werden muss, um einen bestimmten Volumenstrom zu erreichen. Im Kapitel 3.1 wurde bereits auf den hohen Leistungsbedarf von AC-Lüftern im Vergleich zu DC-Lüftern hingewiesen. Aber auch bei DC-Lüftern, besonders bei kleinen Bauformen, gibt es von Hersteller zu Hersteller große Unterschiede. Eine Zahl, die angibt, welche Leistung pro Volumenstromeinheit (l/min oder m^3/h) benötigt wird (mW/l/min oder W/m^3/h zeigt den Gesamtwirkungsgrad eines Lüfters), wird in den Datenblättern nicht angegeben. ***SEPA®***-Lüfter zeichnen sich durch besonders hohen Wirkungsgrad aus, wie die nachstehende Tabelle für einige Lüfter eindrucksvoll zeigt (siehe Seite 40).

Größe [mm]	Modell Nr.	Spannung [VDC]	Stromaufn. [mA]	Volumenstr. [l/min]	Liestungskennz. [mW/l/min]
30x30x6,5	MFB30E12	12	30	67	5,4
30x30x7	Wettbewerb	12	80	104	9,2
30x30x10	MFB30G12	12	70	124	6,9
30x30x10	Wettbewerb	12	100	130	9,2
40x40x10	MFB40H12	12	40	185	2,6
40x40x10	Wettbewerb	12	67	150	5,4
50x50x10	MFB50E12	12	40	238	2,0
50x50x10	Wettbewerb	12	83	333	3,0
60x60x15	MFB60D12	12	90	420	2,6
60x60x15	Wettbewerb	12	100	418	2,9

Tabelle 3: Leistungskennzahl von SEPA-Lüftern und von einigen Wettbewerbslüftern

7 Überwachung und Steuerung

7.1 Signalausgänge zur Überwachung

Obwohl sich ***SEPA***®-Lüfter durch hohe Zuverlässigkeit auszeichnen, wird oft die Überwachung der Lüfterfunktion gefordert. Alle DC-Lüfter lassen sich optional mit Signalausgängen zur Überwachung ausstatten. Bei AC-Lüftern ist sowohl die Überwachung als auch die Drehzahlbeeinflussung sehr aufwendig, manchmal sogar unmöglich. DC-Lüfter, die über einen AC/DC-Wandler betrieben werden, haben diese Einschränkung nicht. Man kann zwischen folgenden Signalarten wählen:

7.1.1 Tachoausgang

Am Signalausgang stehen drehzahlproportionale rechteckähnliche Signale zur Verfügung. Bei Stillstand des Lüfters kann der Signalausgang „H“ oder „L“ annehmen. Die meisten Lüfter haben einen so genannten „Open-Collector“-Ausgang (Abbildung 19). Dieser benötigt einen „Pull-Up“-Widerstand, der mit der positiven Lüfterspannung oder auch einer anderen positiven Spannungs-

quelle, die einen gemeinsamen negativen Bezug mit der Lüfterspannung haben muss, verbunden wird. Das Ausgangssignal bewegt sich zwischen nahezu 0 V und der Pull-Up-Spannung. Es gibt auch Tachoausgänge, die keinen Pull-Up-Widerstand benötigen. Diese Signale schalten zwischen etwa 1 und –1,5 V Lüfterspannung und müssen für einen CPU-Eingang über einen Spannungsteiler geführt werden, da dieser „L“ nur erkennt, wenn die Spannung unter 0,8 V sinkt.

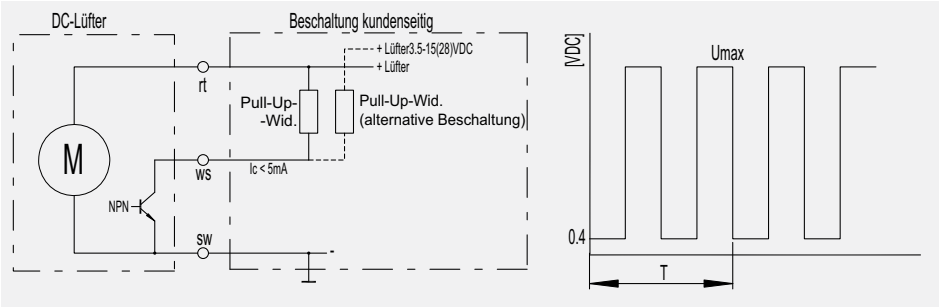


Abb.19: Tachosignal Open-Collector-Ausgang

Aus den Tachosignalen kann eine entsprechend programmierte CPU oder eine externe Schaltung grobe Abweichungen von der Nenndrehzahl des Lüfters erkennen und ein Warnsignal auslösen.

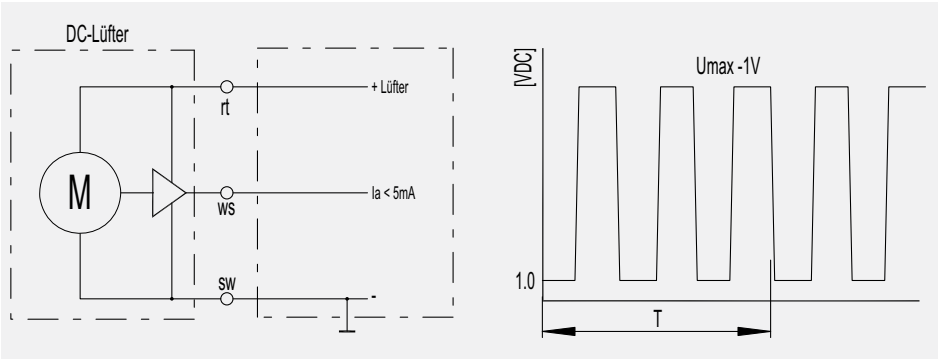


Abb. 20: Tachosignal Leitungstreiberausgang

7.1.2 Alarmausgang

Bei größeren Lüftern ab 60 x 60 x 20 mm wird häufig an Stelle eines Tachosignals ein Alarmsignal ausgegeben. Dieses Signal wird üblicherweise ebenfalls über einen Pull-Up-Widerstand geführt. Standard ist „L“ im Betriebszustand und „H“ bei Blockieren (Abbildung 21) des Lüfters. Auf Wunsch kann auch ein invertiertes Signal angeboten werden.

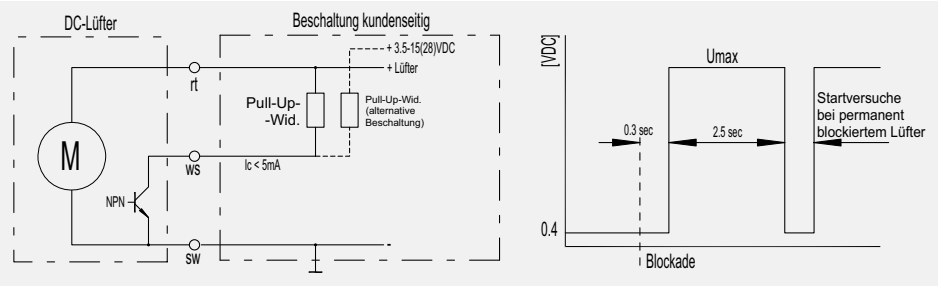


Abb. 21: Alarmsignal bei Blockierung

7.2 Regelung und Steuerung

Lüfter in Anlagen müssen stets so ausgelegt werden, dass sie auch unter extremen Bedingungen ausreichend belüften. Im typischen Betriebsfall wird jedoch nur ein Bruchteil der maximalen Förderleistung benötigt. Im einfachsten Fall können Lüfter über Thermoschalter zugeschaltet werden, wenn die Gerätetemperatur über einen vorgegebenen Wert steigt und wieder Abschalten, wenn die Temperatur gesunken ist. Diese Methode bringt keine Geräuschverbesserung, da der Lüfter im Betriebsfall immer mit Nenndrehzahl läuft. Häufiges Ein- und Ausschalten verschlechtert Zuverlässigkeit und Lebensdauer, da die Lager im An- und Auslaufzustand besonders belastet werden. Daher ist dieser Betrieb nur dann zu empfehlen, wenn der Lüfter bei selten auftretenden Spitzenbelastungen einen erhöhten Luftdurchsatz aufbringen muss.

Eine Anpassung der Lüfterdrehzahl an die tatsächlich benötigte Leistung senkt das Geräusch wesentlich. Eine merkbare Verbesserung der Lebensdauer ist jedoch nicht zu erwarten. Die Drehzahlanpassung ist bei DC-Lüftern einfach und erfolgt über die Betriebsspannung. Bei AC-Lüftern ist die Steuerung der Drehzahl aufwendig und bei manchen Motoren nicht befriedigend lösbar.

Wird die Lüfterdrehzahl über die Betriebsspannung verändert, ohne dass eine Rückmeldung erfolgt, spricht man von Steuerung. Diese Methode ist meist ausreichend genau. Mit einer Auswertung des Tachosignals kann ein geschlossener Regelkreis gebildet werden, der eine präzise Drehzahlregelung ermöglicht. Besser ist jedoch die Regelung über die Temperatur (Abbildung 22). Mit einem Sensor, beispielsweise einem NTC-Widerstand, kann die Temperatur in ein elektrisches Signal ungesetzt werden, welches die Lüfterdrehzahl beeinflusst. Der Regelkreis ist jetzt aber nicht über die Drehzahl, sondern über die Temperatur geschlossen. Im Idealfall wird die Temperatur im Messpunkt fast konstant gehalten. Im einfachsten Fall ist der NTC-Sensor in der Lüfternabe eingebaut und misst dort die Temperatur der durch den Lüfter strömenden Luft.

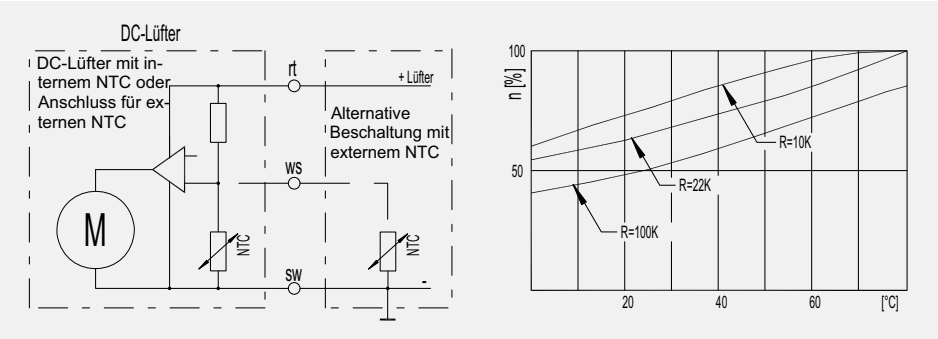


Abb. 22: Temperaturgesteuerte Lüfter

Alternativ kann der Anschluss für einen extern anzuschließenden NTC herausgeführt werden. Diese Lösung ist vorteilhaft, wenn an definierter Stelle im Gerät gemessen werden soll. Zudem besteht die Möglichkeit, die Drehzahlkennlinie in Grenzen durch den Widerstandswert des externen NTC zu beeinflussen. Außerdem können mehrere Lüfter parallel mit einem einzigen Sensor gesteuert werden. Der Widerstandswert des NTC muss dann durch die Zahl der parallel geschalteten Lüfter geteilt werden. Der Einsatz eines Sonderlüfters ist oft nachteilig: teuer, schwer beschaffbar, Bindung an einen Lieferanten. Deshalb werden mehrere Schaltungen angeboten, mit deren Hilfe Standard-DC-Lüfter über die Temperatur geregelt werden können.

Ferner besteht auch die Möglichkeit, die Lüfterdrehzahl über ein PM-moduliertes Gleichspannungssignal zu steuern (Abbildung 23). Hier wird ein Sonderlüfter mit PWM-Eingang benötigt. Standard DC-Lüfter mit PM-geschalteter Spannung zu betreiben, ist nicht zu empfehlen, da es zu Funktionsstörungen und Geräuschproblemen kommen kann.

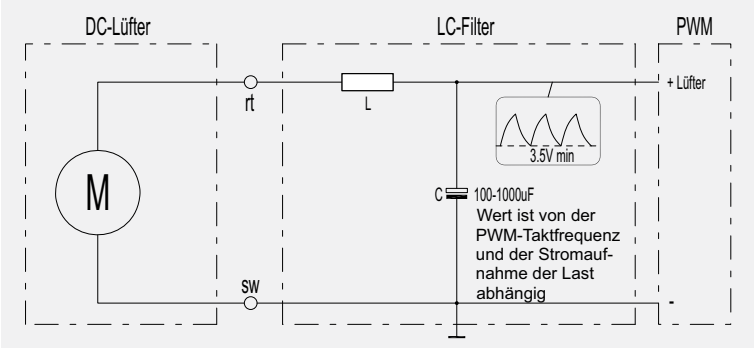


Abb. 23: PWM-Steuerung mit Filter

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 L_{10}, mit der eine *Überlebenswahrscheinlichkeit* von 90 Prozent bzw. eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 Prozent definiert wird. Verbreitet ist auch MTBF (Mean Time Between Failures), der Kehrwert der Ausfallrate FIT (1 FIT = 1 Ausfall je 10^{-9} Betriebsstunden). Bei Lüftern ist der erste Fehler mit dem Totalausfall des Produktes gleichzusetzten. Die korrekte Bezeichnung hierfür wäre MTTF (Mean Time To Failure), die jedoch nicht verwendet wird. Bei konstanter Ausfallrate, welche bei ***SEPA***®-Lüftern wegen des Burn-in-Tests angenommen werden kann, sind bis zur MTTF 63 Prozent der Teile ausgefallen. 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.

Bereich 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.

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

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

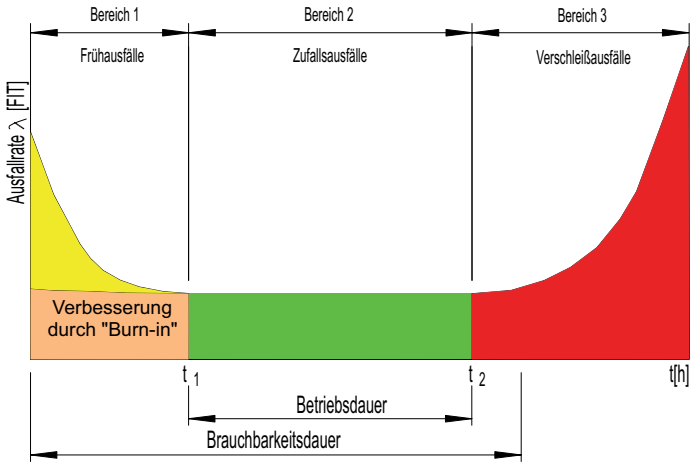


Abb. 24: Badewannenkurve

Alle ***SEPA***®-Lüfter werden – ohne Aufpreis – einem 12-stündigem Burn-in-Test bei etwa 35 °C unterzogen und anschließend nochmals getestet. Nach diesem Arbeitsgang werden praktisch alle Fehler des 1. Bereichs noch beim Hersteller erkannt und abgestellt. Fehlerhäufungen führen sofort zu Korrekturmaßnahmen in der Produktion. Bei der sonst verbreiteten Produktionsmethode ohne Burn-in-Test können ganze Chargen verdächtiger Lüfter das Werk verlassen, bevor der Fehler beim Kunden bemerkt und beim Hersteller abgestellt werden kann.

Der Begriff „Lüfterlos“ wird in der Anlagenbeschreibung häufig mit hoher Zuverlässigkeit verwechselt. Das elektromechanische Bauteil Lüfter wird allgemein als Risikobauteil eingestuft. Oft jedoch wird das lüfterlose Design mit vielen Nachteilen erkauft, das dann mehr Risiken als bei einer Konstruktion mit Lüfter enthält. Die verbreitet 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 25), wie bei Elektrolytkondensatoren, dramatisch ansteigt (Faktor 10 bei 25 ° Temperaturerhöhung, Gesetz von Arhenius).

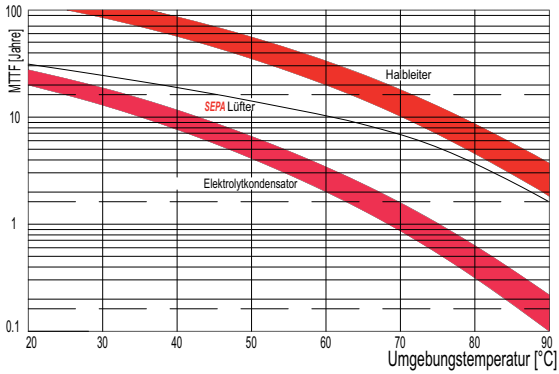


Abb. 25: Temperaturabhängigkeit von MTBF verschiedener Bauteile

8.1 Lagersysteme

Das Lagersystem in Lüftern bestimmt weitgehend deren Zuverlässigkeit und Lebensdauererwartung. In der Vergangenheit wurde der Markt durch teilweise unvollständige Informationen über Lagerungen und mit Phantasiebezeichnungen 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.

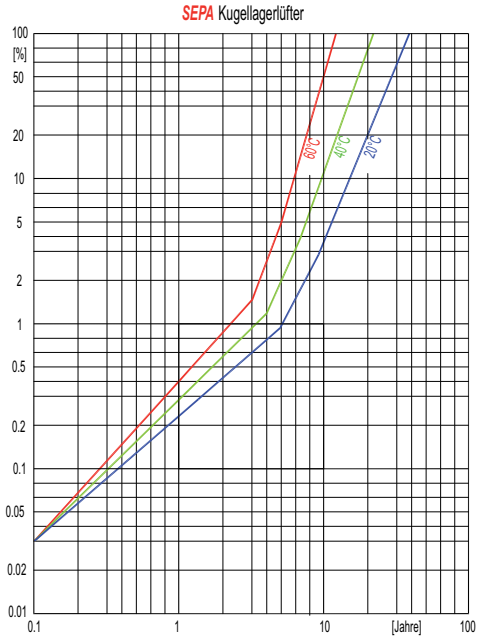


*Abb. 26: Typ. Ausfallwahrscheinlichkeit von **SEPA**®-Kugellagerlüftern*

8.2 Sinterlagertechnologie

Wenn man von Gleitlagern in Lüftern spricht, sind stets Sinterlager gemeint. Diese Sonderform der Gleitlager, etwa seit 1930 bekannt und seit 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 Sintereisenlagern verhindert Oxidation und das Tränken mit Schmierstoff bildet den letzten Arbeitsgang. Bei dem Vakuum-Druck-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: Abbildung 27 zeigt den Schnitt durch ein Sinterlager und den teilweise mit Öl gefüllten Lagerspalt bei stehender und drehender Welle. Bei rotierender Welle (rechts im Bild) wird ein Pumpeffekt wirksam, wodurch der Schmierstoff in einem Kreislauf durch das Lager fließt und ein Ölkeil entsteht, auf dem die Welle schwimmt.

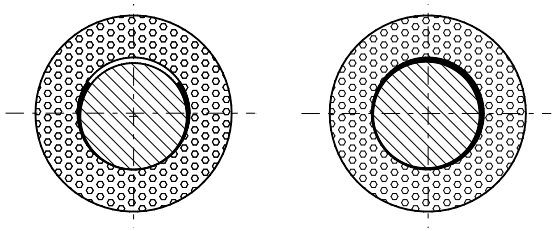


Abb. 27: Schmiermittelverteilung beim Sinterlager in Ruhe und bei drehender Welle

Das „reibungslose“ 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 (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. Abbildung 28 illustriert die Fluchtungsungenauigkeiten, die beim Doppellager weitgehend vermieden werden.

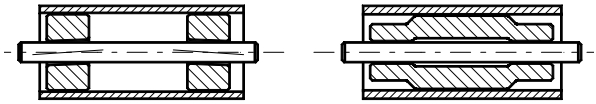


Abb. 28: Vergleich der Sinterlagersysteme
Einzellager (links) – Doppellager (rechts)

Bei sehr kurzen Lagersystemen, wie sie in flachen Lüftern anzutreffen sind, ist es nicht möglich, ein Doppellager einzusetzen: Die Tragfähigkeit des Lagers würde, wegen der Poren ohnedies relativ gering, unzulässig klein werden. 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. Gleitlagersysteme sind axial nicht verspannt und können deshalb in ungünstiger Betriebslage zum Klappern des Lüfterrotors führen. Moderne Lüfter verwenden Gleitlager für die radiale Lagerung und ein Spurlager am Wellenende für die axiale Lagerung. Durch geschickte Ausnutzung der axial wirkenden dauermagnetischen Kräfte kann die axiale Lage der Welle weitgehend unabhängig von der Einbaulage des Lüfters erfolgen. Es gibt auch Konstruktionen, die durch Aus-

nutzung der elektromagnetischen Kräfte die axiale Lage des Rotors stabilisieren (Abbildung 29) und damit die Belastung des Spurlagers senken.

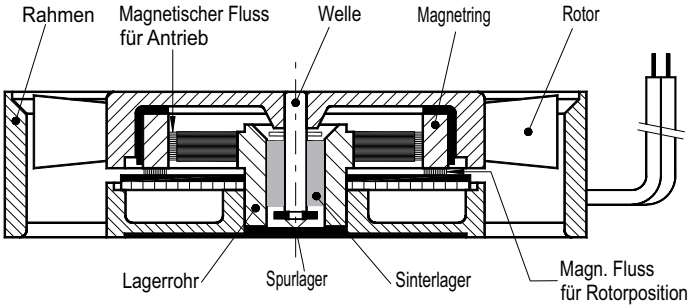


Abb. 29: Magnetisch gelagerte Systeme

Absolut verschleißfreie Lagerung ist auch mit magnetischer Kompensation nicht erreichbar.

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 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, 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 Gleitlagersytemen 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 Rillen, in denen fünf bis neun Kugeln laufen. Die Position der Kugeln wird durch einen so genannten Käfig vorgegeben. Die Kugeln bewegen sich in einem Depot aus Fett, dessen Abfließen bei der Ausführung ZZ (Abbildung 30) 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 verspannt werden. Die Belastung der Lager durch Verspannung, Unwucht und elektromotorische Kräfte ist sehr viel kleiner als die

Tragzahlen der Lager. Die Lebensdauerberechnung 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.

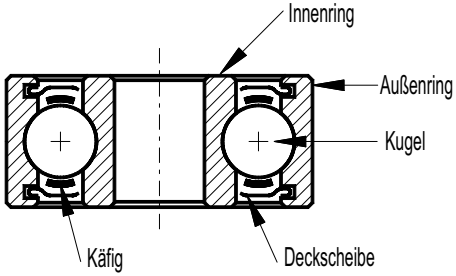


Abb. 30: Aufbau eines Rillenkugellagers ZZ

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 deutlich überwiegt. Lüfter mit Ganzmetallgehäuse übertragen das Laufgeräusch der Kugel-

lager als Körperschall über das Gehäuse, sodass der Körperschallpegel etwas höher sein kann als bei gleich großen Lüftern mit Gleitlagern.

Setzt man einen korrekten Einbau der Lager voraus, beispielsweise durch Montage in einem präzisen Lagerrohr, sind Kugellager einem Sinterlager weit 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 kaum 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, unsachgemäße Lagerung, Transport als „Schüttgut“, 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 widerstehen deshalb hohen Schockbeanspruchungen von 20 bis 50 G (196 bis 490 m/sec^2) und Vibrationsbelastungen bis zu 3,5 G (34,3 m/sec^2), ohne Schaden zu erleiden.

Die Kugellager im Lagersystem müssen durch ein elastisches Element mit einer definierten Kraft verspannt werden. Abbildung 31 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 CPU-Coolern ist die Temperatur des Kühlkörpers entscheidend, die bis zu 40 °C höher als die für die Lebensdauer der Lüfter wichtige Lufttemperatur sein kann. Die Lebensdauerdaten von Coolern werden auf die Kühlkörpertemperatur bezogen. Die MTBF ist 210.000 h bei T_C = 60 ° (T_U = 35 °C).

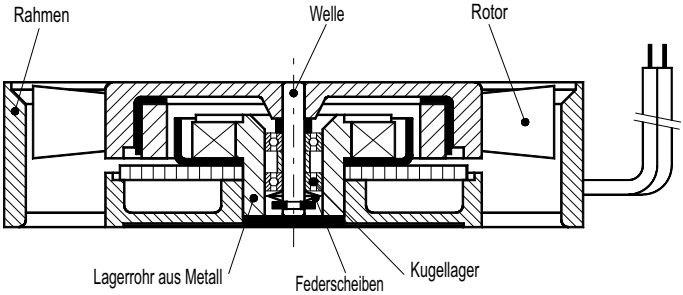


*Abb. 31: Lagersystem mit Kugellager in einem modernen Miniaturlüfter von **SEPA®***

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 ein günstigere, aber wahrscheinlich nicht so zuverlässige Lösung entscheidet.

	SINTERLAGERSYSTEME		KUGELLAGERSYSTEME	
Lebensdauererwartung	gering	-	sehr gut	++
Betriebstemperaturbereich	klein	-	sehr groß	++
Zuverlässigkeit	gering	-	sehr gut	++
Geräusch	sehr gering	++	gering	+-
Schockempfindlichkeit	mittel	+-	mittel	+-
Vibrationsempfindlichkeit	mittel	+-	mittel	+-
Kosten	sehr gering	++	sehr hoch	--

Tabelle 4: Gegenüberstellung der Lagersysteme

Der Vergleich zeigt, dass Kugellagersysteme die deutlich überlegene Lösung sind und in fast allen Fällen bevorzugt werden sollten. Besonders bei höheren Betriebstemperaturen ist das Kugellager besser geeignet, da seine Zuverlässigkeit nur wenig von der Temperatur beeinflusst wird. Nur wenn geringe Anforderungen an die Betriebssicherheit und großer Preisdruck vorhanden sind, ist der Einsatz von Gleitlagerlüftern technisch vertretbar. Die Reparaturstatistik vieler Betriebe zeigt oft realistisch die deutlich höhere Ausfallwahrscheinlichkeit von Gleitlagerlüftern. Die bei kleinen, billigeren Lüftern heute teilweise nur mehr selten 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.

Abb. 32: Verschiedene Lagersysteme
2 Sinterlager - Sinterdoppellager - 2 Kugellager

9 Schutzarten

Der Schutzgrad gibt an, wie der Lüfter gegen Berührung bzw. Fremdkörper und gegen Wasser geschützt ist. Zur Kennzeichnung wird nach DIN40050 bzw. VDE 0530 je eine Ziffer verwendet, der die Buchstaben IP (Internal Protection) vorangestellt sind. Bei Lüftern ist die Schutzart nur auf den Motor bezogen, Gehäuse und Propeller müssen durch Schutzgitter bei Bedarf extra gegen Berührung geschützt werden. Die Lager sind konstruktiv durch labyrinthförmige Luftstrekken und durch Deckscheiben bei Kugellagern (Bauform ZZ) geschützt, etwa dem Schutzgrad IP54 entsprechend. Der Motor kann durch eine Lackierung der elektrischen Teile (IP25), durch Vergießen der Statorwicklung (IP54) oder durch Einkapselung des Stators in Kunststoff (IP55) geschützt sein. Standard (ohne Aufpreis) ist der Schutzgrad IP20.

9.1 Definition der Schutzarten

In der nachstehenden Tabelle ist der, der jeweiligen Kennziffer zugeordnete, Schutzumfang beschrieben.

1. Kenn-Ziffer	Berührungs- und Fremdkörperschutz Schutzumfang	2. Kenn-Ziffer	Wasserschutz Schutzumfang
0	Kein Berührungsschutz hinsichtlich unter Spannung stehender oder sich bewegender Teile	0	Kein Wasserschutz
		1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
1	Schutz gegen zufällig großflächige Berührung mit der Hand oder einem Fremdkörper ø > 50 mm	2	Schutz gegen Tropfwasser aus senkrechter oder schräger Richtung bis 15° zur Senkrechten
2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern oder einem Fremdkörper ø > 12 mm	3	Schutz gegen Sprühwasser aus beliebigen Richtungen
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen od. Fremdkörper ø > 2,5 mm	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
4	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen oder Fremdkörper ø > 1 mm	5	Schutz gegen Strahlwasser aus allen Richtungen
5	Vollständiger Schutz gegen Berührung mit Hilfsmitteln jeglicher Art, Staubschutz im Innern	6	Schutz bei Überflutung
		7	Schutz beim Eintauchen mit definierten Druck- und Zeitbedingungen
6	Staubdichte Maschine	8	Schutz beim dauernden Untertauchen

Tabelle 5: IP Schutzarten, Schutzgrad

Schutzarten über IP55 sind mit üblichen Lüfterkonstruktionen nicht zu realisieren, sie erfordern Sonderlösungen.

9.1 Weitere Schutzarten

Werden Lüfter in Bereichen eingesetzt, in denen ein Funke oder eine zu hohe Oberflächentemperatur eine Explosion hervorrufen kann, sind besondere Bestimmungen einzuhalten, die in der EN50014-50020 bzw. VDE 0170/0171 beschrieben sind.

Lüfter, die in Flugzeugen eingesetzt werden, unterliegen ebenfalls besonderen Sicherheitsvorschriften. Die Einhaltung dieser Vorschriften muss vom BA für Flugsicherheit an entsprechenden Mustern festgestellt und bestätigt werden.

10 Technischer Anhang

10.1 Wichtige Formeln

Maximaler Wärmewiderstand eines Kühlkörpers:

$$\Sigma R = \frac{T_{C\max} + T_{a\max}}{P_V}$$

$$\Sigma R = R_H + R_I$$

ΣR = Summe aller Wärmewiderstände vom Chipgehäuse bis zur umgebenden Luft [K/W]

T_{Cmax} = maximale Temperatur am Chipgehäuse [°C]

T_{amax} = maximale Umgebungstemperatur [°C]

P_V = Verlustleistung [W]

R_H = Wärmewiderstand Kühlkörper [K/W]

R_I = Wärmewiderstand Interface-Folie/Wärmeleitpaste

Volumenstrom im Gerät bei gegebener Verlustleistung:

$$V \approx \frac{50 * P_V}{\Delta T}$$

V = Volumenstrom [l/min],

ΔT = Temperaturdifferenz [K]

Änderung von Druck und Volumenstrom bei Drehzahländerung:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \qquad \frac{p_1}{p_2} = \left\{\frac{n_1}{n_2}\right\}^2 = \left\{\frac{V_1}{V_2}\right\}^2 \qquad \frac{P_1}{P_2} = \left\{\frac{n_1}{n_2}\right\}^3 = \left\{\frac{V_1}{V_2}\right\}^3$$

Änderung der Drehzahl von DC-Lüftern bei Spannungsänderung:

$$n \approx f[U - 1]$$

n = Drehzahl [U/min]

p = Gesamtdruck

U = Betriebsspannung [VDC]

Weibull-Gleichungen

$$R_{(t)} = e^{-(t/T)^b}$$

$R(t)$ = Überlebenswahrscheinlichkeit,

$$F_{(t)} = 1 - R_{(t)}$$

$F(t)$ = Ausfallwahrscheinlichkeit, $\lambda(t)$ = Ausfallrate

$$\lambda(t) = \frac{b}{T}\left(\frac{t}{T}\right)^{b-1}$$

T = Charakteristische Lebensdauer, B = Ausfallsteilheit

t = Betriebsdauer

10.2 Begriffe und Kurzbezeichnungen	
0 dB	Bezugsgröße für den Schallpegel, entspricht einem Schalldruck von $2*10^{-5}$Pa. Ist der Schalldruck geringer, wird der Schallpegel negativ zur Bezugsgröße.
AC/DC-Konverter	Spezialnetzteil, welches eine Gleichspannung aus dem Wechselspannungsnetz zum Betreiben von Standard-DC-Lüftern am AC-Netz erzeugt.
Alarmsignal	Elektrisches Ausgangssignal, welches beim Blockieren des Lüfters von einem logischen Zustand (z.B. H) in einen anderen logischen Zustand wechselt (z.B. L).
Anlaufstromaufnahme	Maximale Stromaufnahme beim Starten (Drehzahl 0) oder Blockieren des Lüftermotors. Dieser Strom sinkt mit steigender Drehzahl bis auf den Nennstrom bei Nenndrehzahl ab.
Arbeitspunkt	Der Arbeitspunkt eines Lüfters ist der Schnittpunkt von Lüfterkennlinie und Gerätekennlinie (Druckerhöhung = Druckverlust)
Arhenius'sches Gesetz	Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen steigt um den Faktor 10 je 25° Temperaturerhöhung.
Auswuchten	Unter dynamischem Auswuchten wird die Verbesserung der Masseverteilung eines rotierenden Körpers verstanden, sodass die freien Fliehkräfte des um seine geometrische, konstruktiv erzwungene Drehachse umlaufenden Rotors die zulässigen Toleranzen nicht übersteigt. Dies geschieht mittels Wuchtgewichten (additiv) oder durch Abbohren/Abfräsen (subtraktiv).

	Bei Drehkörpern mit sehr großem Verhältnis Durchmesser zu Länge wird in einer Ebene, mittig zur Länge gemessen. Längere Drehkörper werden an jedem Ende gewuchtet (Zweiebenenwuchtung).
Automotive	Der Zusatz Automotive beschreibt spezielle, für die Automobilindustrie geltende Mindestanforderungen, die in der Regel einen deutlich erweiterten Temperaturbereich und sehr hohe Anforderungen an die Anliefer- und Betriebszuverlässigkeit einschließen, während die Lebensdaueranforderung im Vergleich zu industriellen Applikationen viel geringer ist.
AWG	American Wire Gauge, amerikanische Norm für den Drahtquerschnitt. Wichtig, wenn die Lüfterlitzen mit Steckern versehen werden. AWG22 ist der bei den meisten Lüftern größter und AWG28 kleinster Querschnitt.
Badewannenkurve	Stellt die Ausfallhäufigkeit in Abhängigkeit von der Betriebszeit dar.
Betriebsspannung	Nennspannungsbereich mit dem zulässigen Toleranzbereich für Unter- und Überspannung. Übliche Nennspannungen sind: 3,3; 5; 12; 24 und 48 VDC, 24, 115, 230 und 400 VAC. Der Standardtoleranzbereich ist ±10%, kann aber bis –50% spezifiziert sein.
Bewertungskurve A-Kurve	Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass das menschliche Ohr Töne mit gleichem Schalldruck in unterschiedlichen Tonhöhen unterschiedlich laut empfindet, werden so genannte Frequenzbewertungskurven verwendet. Für leise Geräusche von unter

	40 Phon, wie sie Lüfter erzeugen, wurde die A-Kurve definiert.
Blockierschutz	Elektrische Schutzeinrichtung eines Lüfters gegen Blockieren des Rotors. Kleine Lüfter sind impedanzgeschützt, d.h., die Leistungsaufnahme eines blockierten Lüfters führt nicht zu einer schädlichen Überhitzung. Andere Lüfter haben eine elektronische Überlastabschaltung, die beim Blockieren den Lüfter zunächst abschaltet. In regelmäßigen Abständen prüft diese Einrichtung durch kurzes Einschalten, ob die Blockierung noch weiter besteht.
Burn-in	Verfahren zum Feststellen und Abstellen von Frühausfällen durch mehrstündigen oder mehrtägigen Probelauf, teilweise unter erschwerten Betriebsbedingungen. Alle ***SEPA®***-Lüfter werden bereits beim Hersteller einem Burn-in unterzogen und anschließend geprüft.
CE	Abk. für Communauté Européenne. Die CE-Kennzeichnung eines Produktes weist auf die Übereinstimmung mit allen EU-Richtlinien hin, von denen das gekennzeichnete Produkt erfasst wird.
CFM	Abk. für Cubic Feet per Minute. Veraltete, in den USA noch häufig anzutreffende Angabe des Volumenstroms von Lüftern. 1 CFM = 28 l/min (1,7 m^3/h)
Chipcooler	Kühlkörper, oft mit aufgesetztem oder integriertem Lüfter zur Kühlung planer Oberflächen von integrierten Schaltungen (CPUs).

dB(A)	Angabe des Schallpegels (Lautstärke) in Dezibel, wobei die Messung mit einem der Empfindlichkeit des menschlichen Ohres angenäherten Filters (A) bewertet wird. 1 BEL = 10 dB. 0 dB(A) entsprechen einem Schalldruck von $2*10^{-5}$ Pa.
Druckerhöhung	Der Strömungswiderstand in einem Gerät muss durch Druckerhöhung, die der Lüfter aufbaut, überwunden werden, damit ein Volumenstrom entstehen kann. Die Lüfterkennlinie beschreibt den Zusammenhang zwischen Druckerhöhung und Volumenstrom.
Elektrostatische Entladung	Korrekt: Entladung statischer Elektrizität. Die Festigkeit gegen elektrostatische Entladungen bei Lüftern wird bei der CE-Prüfung erfasst.
EMC/EMV	Abk. für Electro Magnetic Compatibility/Elektromagnetische Verträglichkeit. Die Festigkeit eines Lüfters gegen elektromagnetische Strahlung wird bei der CE-Prüfung erfasst.
EME	Abk. für Electro Magnetic Emission/Elektromagnetische Umgebung. Die Größe der Aussendung elektromagnetischer Störungen wird bei der CE-Prüfung erfasst.
FFT	Schmalbandfrequenzfilter, stellt frequenzabhängig (in Terzbandbreiten) das Geräusch eines Prüflings dar. Die Auswertung gestattet Rückschlüsse auf eventuelle Fehler oder Störquellen.
Frühausfälle	Fehler, die nach relativ kurzer Zeit auftreten, bedingt durch Konstruktions-, Fertigungs-, oder Materialfehler,

	sowie unsachgemäße Handhabung. Siehe auch Badewannenkurve.
Geräuschangabe	In den Datenblättern wird das Luftgeräusch eines unter Nennbedingungen betriebenen, elastisch (in Gummiseilen) in einem Schallmessraum aufgehängten Lüfters angegeben. Bei der Messung des Geräusches wird die Ohrempfindlichkeit (A-Kurve) berücksichtigt. Aus diesem Wert ist nur bedingt auf die Geräuschentwicklung im Gerät zu schließen
Gerätekennlinie	Stellt den Volumenstrom in Abhängigkeit des Druckverlusts eines Gerätes dar.
Gleitlager	Zur Aufnahme und radialen Lagefixierung der (drehenden) Welle. Besteht bei Lüftern aus porösem (gesinterten) Material mit Langzeit-Schmierstoff-Füllung. Sehr günstig, aber mit begrenztem Betriebstemperaturbereich und geringer Zuverlässigkeit. Vorkehrungen für eine axiale Lagefixierung müssen zusätzlich getroffen werden. Kaum schockempfindlich. Sonderformen (z.B. Hypro-) verbessern den Aufbau des Schmierfilms.
Hall-IC	Als Hall-Effekt wird die Widerstandsänderung eines Halbleiterelementes in Abhängigkeit eines magnetischen Feldes bezeichnet. Das so genannte Hall-Element erzeugt einem Magnetfeld proportionale Spannungen, wenn ein Strom angelegt wird. Zusammen mit einem Schwellspannungsverstärker werden im Hall-IC logische Ausgangssignale generiert, welche die Stärke oder Polarität eines Magnetfeldes zeigen. Mit Hilfe dieser Signale werden die Spulen eines bürstenlos kommutierten Motors gesteuert.

Hotspot	Hier: begrenzter Bereich, innerhalb dessen eine hohe Erwärmung auftritt.
Hydrodynamischer Effekt	Bewirkt bei einer sich schnell drehenden Welle mit geringer Oberflächenunebenheit in einem mit Öl gefüllten porösen Lager (Sinterlager), dass das Öl auf der ablaufenden Seite aus dem Lager gesaugt wird und sich auf der auflaufenden Seite in der Druckzone zu einem Keil aufstaut. Im Idealfall schwimmt die Welle so im Lager auf einem Ölfilm und es kommt zu keiner metallischen Berührung zwischen Lager und Welle.
Integrated Circuit (IC)	Integrierte Schaltung, vereint auf einem Halbleiterchip mehrere hundert bis mehrere Millionen aktive (Dioden, Transistoren) und passive (R, C) elektrische Bauteile.
IPnn	Schutzart nach DIN, deren Zahl den Grad des Schutzes angibt. Ungeschützte Lüfter haben IP20, geschützte Lüfter IP25, IP54 oder IP55.
Kommutierung	Elektrisches Umschalten von Magnetspulen im Stator eines Motors, sodass beim Drehen des Rotors ständig Kräfte entstehen, die ein Drehmoment aufrechterhalten. Die Lage der Rotormagnetpole wird durch einen Sensor (Hall-IC) festgestellt, der die Umschaltung über Verstärker steuert.
Kugellager	Zur Aufnahme sowie radialen und axialen Lagefixierung der (drehenden) Welle. Relativ teuer, aber mit hervorragendem Betriebstemperaturbereich und hoher Zuverlässigkeit. Schockempfindlich.

L_{10}	Lebensdauerwartung, gemittelt über eine große Stückzahl. Nach n Stunden dürfen 10% der Bauteile ausgefallen sein (90% überleben). Bei ***SEPA®***-Lüftern ist der Ausfall mit dem Über- bzw. Unterschreiten des Toleranzbereichs definiert. Neben L_{10} kann auch L_1, L_2 oder L_5 angegeben sein.
Lebensdauererwartung	Kennzahl, die eine unter Nennbedingungen zu erwartende Lebensdauer angibt. Diese statistische Zahl wird aus einer großen Zahl an Prüflingen ermittelt. Die Lebensdauererwartung kann bei Raumtemperatur, bei 40 °C oder bei max. zulässiger Temperatur angegeben werden. Üblicherweise werden L_{10} und (oder) MTBF angegeben.
Lüfterkennlinie	Stellt den Volumenstrom eines Lüfters in Abhängigkeit von der Druckerhöhung dar.
Montagedämpfung	Montagehilfen aus Gummi, deren Eigenschaften Schock- und Vibrationsbelastung auf für den Lüfter ungefährliche Werte dämpft. Außerdem wird durch diese Montagehilfen der vom Lüfter erzeugte Körperschall um bis zu 10 dB(A) gedämpft.
Mooresches Gesetz (Moore's Law)	Moores Gesetz ist kein wissenschaftliches Naturgesetz, sondern eine Faustregel, die auf empirische Beobachtung zurückgeht. Gordon Moore veröffentlichte im April 1965, dass sich die Zahl der Transistoren auf einem handelsüblichen Prozessor jährlich verdoppelt, korrigierte jedoch seine Aussage 1975 auf eine Verdopplung alle zwei Jahre. In den Medien ist auch oft von einer Verdopplung der Integrationsdichte alle 18 Monate die Rede, woher die Zahl stammt, ist unbekannt.

MTBF / MTTF	Abkürzung Für Mean Time Between Failures (mittlere Zeit zwischen zwei Ausfällen). Die Angabe bei Lüftern ist unkorrekt, da ein Lüfter bereits nach dem ersten Fehler ausfällt und nicht repariert wird. Gemeint ist eigentlich MTTF, Mean Time To Failure. Bei konstanter Ausfallrate sind bis zum MTTF 63,2% der Teile ausgefallen.
Nenndrehzahl	Typische Rotordrehzahl eines Lüfters unter Nennbedingungen. Die Drehzahl bestimmt Förderleistung und Geräusch bei gleicher Konstruktion und ist nicht zum Vergleich verschiedener Lüftermodelle geeignet.
Nennstromaufnahme	Typische Stromaufnahme (eines Lüfters) unter Nennbedingungen.
NTC	Abkürzung für einen Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizient (Heißleiter). Der Widerstand sinkt exponentiell mit steigender Temperatur. Der NTC wird u. a. als Temperatursensor bei Temperatursteuerungen von Lüftern verwendet.
PBT	Auch PBTP, Abk. für Polybutylenterephthalat. Mit 30% Glasfaser, brandgeschützt (PBT GF30 V0). Hervorragende Eigenschaften für präzise Spritzgussteile, beständig gegen Schmierstoffe, schwache Säuren und Alkohole.
PCB	Abk. für Printed Circuit Board, Leiterplatte mit geätzten Leiterbahnen, ein- oder mehrlagig. Das isolierende Trägermaterial ist in verschiedenen Qualitätsstufen und Preisklassen zu finden.

PPM	Abk. für Parts per Million. Anzahl von Teilen aus einer Stichprobe aus einer Million Teilen.
PWM	Abk. für Pulsweitenmodulation. Werden Standard-DC-Lüfter über eine PWM angesteuert, soll im Aus-Zustand eine Mindestspannung von 3,5 VDC gehalten werden, um die Grundfunktion des Kommutierungs-ICs sicherzustellen. Lüfter mit PWM-Eingang steuern nur die Spulen über die PWM an, während der IC ständig mit Nennspannung versorgt wird.
RoHs	Abk. für Restriction of Hazardous Substances. Seit 01.07.2006 ist die EU-Richtlinie 2002/95/EG in Kraft, welche die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe (z.B. Blei) stark einschränkt oder verbietet (Ausnahmen u. a. für die Medizintechnik, Flugzeugindustrie und bei Reparatur von Altgeräten).
Rotor	Drehender Teil eines Motors. Beim Lüfter meist auch der Teil, der die Permanentmagnete, den Rückschluss und die Schaufeln zur Luftbewegung enthält.
RPM	Abk. für Rotation Per Minute, Umdrehungen pro Minute ($Umin^{-1}$)
Schallmessraum	Besonders gut gegen Fremdgeräusche von außen isolierter Messraum zur Geräuschmessung (von Lüftern). Das Grundgeräusch bei guten Schallmessräumen liegt bei 5 dB(A).
Schmierfilm	Dünne Schicht eines flüssigen Schmiermittels zwischen drehender Welle und Lagerinnenwand. Erst ab Erreichen einer Mindestdrehzahl kann sich durch den

	hydrodynamischen Effekt ein Schmierfilm im Lager aufbauen, auf dem die Welle „schwimmt“. Temperatur, Wellenoberfläche, Porosität des Lagers und Viskosität des Schmierstoffes beeinflussen die Stabilität des Schmierfilmes. Siehe auch Hydrodynamischer Effekt.
Schock	Stoßbelastung bei Lüftern, wobei ein Vielfaches der Erdbeschleunigung auftritt. Die Schockbelastung wird meist in 3 Richtungen (X, Y, Z) mit einer Beschleunigung von 196 m/sec^2 (ca. 20 G) getestet, wobei der Prüfling keinen Schaden nehmen darf. Automotive-Lüfter haben eine Schockfestigkeit bis zu 490,5 m/sec^2 (50 G).
Sensorlüfter	Sonderlüfter, dessen integrierter NTC die Temperatur der angesaugten Luft misst. Hauptapplikation: Kfz-Klimaanlagen.
Spurlager	Gleitlager, welches eine in Achsrichtung vorgespannte Motorwelle axial fixiert. Bei den meisten Gleitlagerlüftern zusammen mit einer magnetischen Vorspannung wirksam. Nahezu punktförmige Berührung der Wellenkuppe mit einem ebenen Lagerteil, daher tritt starker Verschleiß auf.
Stator	Feststehender Teil des Motors. Enthält beim Lüfter die magnetischen Spulen, das Lagersystem und die Befestigung. Der äußere Teil des Stators bildet den Rahmen oder das Gehäuse.
Tachosignal	Ausgangssignal, welches Impulse liefert, deren Frequenz proportional mit der Drehzahl ist. Bei Lüftern werden, je nach Motorkonzept, zwei oder drei Pulse

	pro Umdrehung abgegeben. Höhere Winkelauflösungen werden durch spezielle Tachokonstruktionen erreicht, bei Lüftern jedoch unüblich.
Temperatursteuerung	Im Lüfter eingebaute oder externe Schaltung zum Steuern der Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit von der Temperatur an einer definierten Mess-Stelle.
Thermal Management	Thermisches Management, welches die Betrachtung aller elektrischen und mechanischen Auswirkungen, denen das Bauteil bei thermischer Belastung ausgesetzt sein kann, einschließt.
Turbulenz	Ungeordnete (chaotische) Luftströmung entsteht an scharfkantigen Gebilden, die den geordneten Luftstrom behindern, und an den Flügelenden. Turbulenzen verschlechtern die Förderleistung eines Lüfters und erhöhen das Geräusch. Luftkanäle mit sanften Abrundungen verbessern die Turbulenzen.
Unwucht	Abweichung des Mittelpunktes der drehenden Masse von der Drehachse. Unwucht führt zu Radialbelastung von Lagern und damit zu erhöhtem Verschleiß und zu Geräuschentwicklung. Verbesserung durch Auswuchten
Ventilatorkennlinie	Stellt den Volumenstrom eines Lüfters in Abhängigkeit der Druckerhöhung dar.
Verpolungsschutz	Elektrische Schutzeinrichtung (Diode) eines Lüfters gegen Falschpolung
Vibration	Permanente Stöße mit gleich bleibender oder variabler Frequenz. Die Vibrationssicherheit wird mit Beschleu-

	nigung von z.B. 14,7 m/sec^2 (1,5 G) unterschiedlicher Frequenz und Richtung geprüft. Meist wird in drei Richtungen getestet und dabei die Frequenz drei Mal im Bereich 10-500-10 Hz geändert wird, wobei der Prüfling keinen Schaden nehmen darf.
Viskosität	Messgröße, welche die Zähigkeit (Reibungswiderstand N*s/m^2) eines Schmierstoffes angibt. Die Viskosität bei Schmierstoffen nimmt mit steigender Temperatur ab (dünnflüssiger).
Volumenstrom	Fördermenge in Volumen/Zeiteinheit, beim Lüfter Fördermenge von Luft normaler Dichte und Temperatur. Angaben meist in m^3/h, l/min oder CFM

11 Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Verlauf von Verlustleistung und Temperatur bei verschiedenen Betriebsarten
Abb. 2: Überschlägige Ermittlung des Volumenstroms bei gegebener Verlustleistung
Abb. 3: Vergleich passiver und aktiver Kühlkörper mit annähernd gleichem Wärmewiderstand
Abb. 4: Verbesserung des Wärmewiderstandes von Strangkühlkörpern durch Anblasen
Abb. 5: Wärmeübergang der Junktion-Umgebung
Abb. 6: Bauformen von Axiallüftern
Abb. 7: AC/DC-Wandler für Lüfter
Abb. 8: Bauformen von Radiallüftern
Abb. 9: Gehäuseloser Lüfter
Abb.10: Sensorlüfter für PKW-Klimaanlagen
Abb.11: Ventilatorkennlinie, Gerätekennlinie, Arbeitspunkt
Abb.12: A-Bewertungskurve
Abb.13: Geräuschentwicklung älterer und moderner Lüfter
Abb.14: Elektronik zur Drehzahlsteuerung
Abb.15: Dämpfende Montagehilfen (Quelle: Werkzeichnung Ruch-Novaplast)
Abb.16: Lüftermontage mit Kabeltüllen
Abb.17: Saugende oder blasende Anordnung von Lüftern
Abb.18: Druckverlust durch Schutzgitter und -filter
Abb.19: Tachosignal *Open-Collector-Ausgang*
Abb.20: Tachosignal *Leitungstreiberausgang*
Abb.21: Alarmsignal bei Blockierung
Abb.22: Temperaturgesteuerte Lüfter
Abb.23: PWM-Steuerung mit Filter
Abb.24: Badewannenkurve
Abb.25: Temperatureinfluss von MTBF verschiedener Bauteile
Abb.26: Typ. Ausfallwahrscheinlichkeit von ***SEPA***®-Kugellagerlüftern
Abb.27: Schmiermittelverteilung beim Sinterlager

Abb.28: Vergleich der Sinterlagersysteme
Abb.29: Magnetisch gelagerte Systeme
Abb.30: Aufbau eines Rillenkugellagers ZZ
Abb.31: Lagersystem mit Kugellager in einem modernen Lüfter von ***SEPA®***
Abb.32: Lagersysteme 2 Sinterlager - Sinterdoppellager - 2 Kugellager

Literatur:

H. Cap, SEPA Europe: Ordnung im Chaos
H. Cap, SEPA Europe: Die leisen Lüfter kommen
H. Cap, SEPA Europe: Kühlung in der Leistungselektronik
Dr. S. Harmsen: Gerätelüfter für die Elektronikkühlung
Koyo, Deutsche Wälzlager Verkaufsgesellschaft: Handbuch der Wälzlagertechnik
L. Noelle, Fischer Elekronik: Kühlkörper
Ruch-Novaplast: Novaplex™-Workshop Handbuch
Schunk Sintermetalltechnik: Sinterlager und Formteile

Notizen

SEPA GMBH EUROPE

Dieses Buch ist als Hilfsmittel für Elektronikentwickler und Konstrukteure gedacht. Aufbauend auf bekannte Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik, führt sie den Leser an die Problematik der Elektronikkühlung, speziell der Bauteilekühlung, so heran, dass er mit relativ einfachen Berechnungen oder Modellen rasch zum Ergebnis gelangen oder gezielt die wesentlichen Parameter für eine Simulation angeben kann.

Den Schwerpunkt bilden Gleichspannungslüfter, die bei der Kühlung von Bauteilen fast ausnahmslos verwendet werden.

Ein Anliegen des Verfassers war es auch, aufzuzeigen, dass Lüfter, richtig eingesetzt, kein Qualitätsrisiko darstellen und die Zuverlässigkeit eines Gerätes sogar noch verbessern können.

Eine Kurzerklärung der wichtigsten und im Zusammenhang mit der Entwärmung von Bauteilen häufig gebrauchten Begriffen runden dieses Taschenbuch ab.

SEPA EUROPE GmbH • Weißerlenstraße 8 • D-79108 Freiburg • www.sepa-europe.com