

Zweite,  
überarbeitete  
Auflage



Heinrich Cap

# WÄRMEMANAGEMENT

bei elektronischen  
Bauelementen



Praxisgerechte Einführung  
in die Elektronik- und Bauteilekühlung

### Vorwort

Lüfter werden heute in vielen Applikationen nicht nur zur Kühlung sondern in vielfältigen Aufgaben eingesetzt. Durch die ungebrochen stürmische Entwicklung in allen Bereichen der Technik war es sinnvoll dieses Handbuch neu aufzulegen und wichtige Ergänzungen einfließen zu lassen. Dabei wurde ich durch meinen Sohn Robert in wesentlichen Punkten unterstützt.

Heinrich Cap

Heinrich Cap

# WÄRMEMANAGEMENT BEI ELEKTRONISCHEN BAUELEMENTEN

Zweite überarbeitete Auflage

Der Autor

Ing. (grad) Heinrich Cap, Jahrgang 1941, studierte Elektrotechnik 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 1989 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.



Im Jahr 1990 gründete er eine eigene Firma, die schon 1991 den Handel mit **SEPA**® Lüftern aufnahm. 1999 wurde die Firma in die **SEPA**® EUROPE GmbH umgewandelt und zog in neue Geschäftsräume nach Freiburg. Gleichzeitig wurden Lüfter anderer namhafter Hersteller und Lüfterzubehör zusätzlich ins Vertriebsprogramm aufgenommen.

2015 feierte **SEPA**® EUROPE im neuen, selbst errichteten Firmensitz in Eschbach das 25-jährige Firmenjubiläum. **SEPA**® EUROPE GmbH ist der europäische Repräsentant für **SEPA**® Lüfter und Inhaber des Markenzeichens **SEPA**®.

<b>INHALT</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>8</b>
<b>2 Elektronikkühlung</b>	<b>10</b>
2.1 Verlustleistung	10
2.1.1 Statische Verluste	10
2.1.2 Dynamische Verluste	11
2.2 Wärmeabgabe	12
2.2.1 Bauteilkühlung	13
2.2.2 Aktive und passive Kühlung	15
2.2.3 Kühlung von Leuchtmitteln	17
2.2.4 Entwärmung mittels Kühlkörper	18
2.2.5 Beispiel	18
<b>3 Lüfter und Zubehör</b>	<b>20</b>
3.1 Axiallüfter	20
3.2 Radiallüfter	23
3.3 Gehäuselose Lüfter	24
3.4 Diagonallüfter	25
3.5 Flachlüfter	25
3.6 Sonderlüfter	25
3.7 Chip Cooler	26
3.8 Zubehör	26
3.8.1 Mechanische und elektrische Schutzvorrichtungen	27
3.8.2 Montage- und Wärmeleitkomponenten	27
<b>4 Förderleistung</b>	<b>30</b>
4.1 Lüfterkennlinie, Gerätekenlinie und Arbeitspunkt	30
<b>5 Überwachung und Steuerung</b>	<b>33</b>
5.1 Signalausgänge zur Überwachung	33
5.1.1 Tachoausgang	33
5.1.2 Alarmausgang	34
5.2 Regelung und Steuerung	34

<b>INHALT</b>	<b>Seite</b>	
<b>6</b>	<b>Geräuschverhalten</b>	<b>37</b>
6.1	Ursachen der Geräuschentwicklung	37
6.2	Geräuschoptimierung	39
6.3	Montage im Gerät	40
<b>7</b>	<b>Lüftungskonzepte</b>	<b>42</b>
7.1	Horizontale oder vertikale Durchlüftung	42
7.2	Saugende oder blasende Anbringung des Lüfters	43
7.3	Mehrfachanordnung von Lüftern	44
7.4	Verluste durch besondere Einbaubedingungen	45
7.5	Leistungsaufnahme	46
<b>8</b>	<b>Zuverlässigkeit</b>	<b>47</b>
8.1	Das Lagersystem	49
8.2	Sinterlagertechnologie	50
8.3	Funktionsweise eines Sinterlagers	51
8.4	Kugellagersysteme	54
8.5	Sinterlager oder Kugellager?	57
<b>9</b>	<b>Schutzarten</b>	<b>59</b>
9.1	Definition der Schutzarten	58
9.2	Weitere Schutzarten	59
<b>10</b>	<b>Konfektionierung und Handhabung</b>	<b>60</b>
<b>11</b>	<b>Technischer Anhang</b>	<b>61</b>
11.1	Formelsammlung	61
11.2	Begriffe und Kurzbezeichnungen	62
<b>12</b>	<b>Verzeichnis der Abbildungen</b>	<b>72</b>
<b>13</b>	<b>Literatur</b>	<b>73</b>

## 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 Jahrzehnte gelang es, die Versorgungsspannung von CPUs von 5 auf weniger als 2,5 VDC zu senken und damit die Verlustleistung auf unter 25% gegenüber dem Jahr 2000 zu bringen. Im gleichen Zeitraum stieg aber die Zahl der auf einem Chip integrierbaren Bauelemente überproportional an (Moore'sches-Gesetz). Inzwischen nähert man sich aber der physikalischen Grenze bei der Vermehrung der Transistoren pro Flächeneinheit. Aktuelle Trends der Weiterentwicklung sind aber z.B. dreidimensionale Schaltkreise, mehrwertige Logik oder optische Computer. Mit diesen neuen Technologien werden die Rechenleistungen gesteigert, ohne die Anzahl der Transistoren selbst zu steigern. Die abzuführende Verlustleistung pro Volumeinheit ist also heute größer und steigt weiter an. Darüber hinaus greifen immer striktere Vorschriften zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission. Ein sorgfältiges Kühlmanagement bei Bauteilen ist also wichtiger als je zuvor.

Kompakte Ventilatoren werden seit Langem vor allem für die Elektronik Kühlung 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 Varianten 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 MF40A12, 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**<sup>®</sup> Axiallüftern beginnt aktuell bei 15 x 15 x 4.5 mm und reicht bis 60 x 60 x 25 mm. Sehr bald erkannte NKW, dass sich Axiallüfter in manchen Fällen wegen ihrer Geometrie nicht optimal einsetzen lassen. So schufen die NKW Lüfterpioniere kleine DC Radiallüfter, die sich in der Praxis so gut bewährt haben, dass inzwischen viele Größen- und Spannungsvarianten entstanden sind.

Derzeit können die Kunden unter rund 25 verschiedenen Standardgrößen von 15 x 15 x 4.5 mm bis 60 x 60 x 25 mm im Spannungsbereich von 5VDC bis 24VDC wählen.



Abb. 1 SEPA Lüfter und Kühler

Ergänzt wird dieses Programm durch Lüfter ausgewählter Hersteller bis zu einer Größe von 280 x 280 x 80 mm.

Die strategische Vorgabe bei NKW ist seit der Firmengründung unverändert: Führend bei der Qualität ihrer Produkte zu sein. Dieses Ziel erreicht und bis heute gehalten zu haben, ist eine große Leistung, auf die man bei NKW mit Recht stolz ist. Heute produziert der Hersteller an mehreren 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 in der Regel 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**® Komponenten zur Elektronikkühlung 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 jahrzehntelanger Erfahrung in der Technik der Lüfter aufbauen.

## 2 Elektronikkühlung

Dieses Kapitel befasst sich mit der Kühlung von Bauelementen, insbesondere mit passiver oder aktiver Wärmeabfuhr durch Lüfter. Hier wird auf die besonderen Eigenschaften der **SEPA**® Lüfter eingegangen.

### 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:

$$P_V = I^2 \cdot R \quad (1)$$

oder

$$P_V = \frac{U^2}{R} \quad (2)$$

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

**Diode**n haben einen physikalisch bedingten und vom Halbleitermaterial abhängigen Spannungsabfall in Durchlassrichtung (0,1 bis 2 V), typisch sind 0,7 V bei Siliziumdioden. Die Verlustleistung ist  $P_D = U_D \cdot I_D$  (3)



**Schalttransistoren** haben im On-Zustand einen nicht vernachlässigbaren Widerstand. In den Datenblättern wird bei bipolaren Transistoren die Sättigungsspannung  $U_{CEsat}$  bei definiertem Basis- und Kollektorstrom  $I_C$  und bei MOS-Transistoren der Widerstand in eingeschaltetem Zustand angegeben. Die Verlustleistung  $P_{ON}$  errechnet sich aus:

$$\text{Bipolare Transistoren} \quad P_{ON} = U_{CEsat} \cdot I_C \quad (4)$$

bzw.

$$\text{MOS-Transistoren} \quad P_{ON} = I_D^2 \cdot R_{DSon} \quad (5)$$

Dioden (und Transistoren), die in Sperrrichtung betrieben werden, zeigen einen, durch einen parallel liegenden Isolationswiderstand hervorgerufenen, Sperrstrom. Die Verlustleistung ist

$$P_S = \frac{U^2}{R_S} \quad (6)$$

### 2.1.2 Dynamische Verluste

entstehen erst, wenn das Bauelement elektrisch 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 periodisch 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 CPUs 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  $T_C$  steigt an. Dadurch erhöht sich der Temperaturunterschied zur Umgebung  $T_A$  ( $\Delta T = T_C - T_A$ ) 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.

*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 berechnet nach der Formel:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A} \quad (7)$$

$R_{th}$  [K/W],  $A$  [m<sup>2</sup>],  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit W/m · K

Stoff	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]
Silber	429
Kupfer	390
Aluminium	204
Graphit	119...165
Silizium	148
Stahl, legiert	42
Keramik	12...17
Glas	1,0
FR4 (Epoxy)	0,3
Luft	0,026

Tabelle 1: 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 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 DB, AB und KB relevant sind: Der Dauerbetrieb 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 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 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:

$$P_D = P_E \cdot \sqrt{\frac{t_B \%}{t_S \%}} \quad t_B = \text{Zeit „on“}, t_S = \text{Zeit „off“} \quad (8)$$

Der Kühlkörper muss die durch  $P_D$  erzeugte Wärme so abführen können, dass die zulässige Grenztemperatur des Bauteils auch im Worst Case 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.

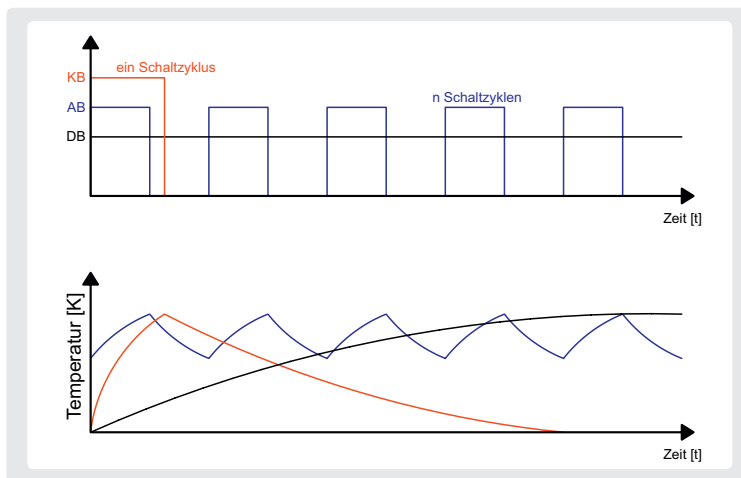


Abb.2: Verlauf von Verlustleistung und Temperatur bei verschiedenen Betriebsarten

Abbildung 2 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 (AB) um ca. 50 Prozent und im Kurzzeitbetrieb (KB) um ca. 100 Prozent höher sein als im Dauerbetrieb (DB).

### 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 3. In diesem Diagramm ist der Volumenstrom für kleinere Lüfter in  $\text{m}^3/\text{h}$  der Verlustleistungsskala bis 60W Verlustleistung zugeordnet ( $1 \text{ m}^3/\text{h} = 16,7 \text{ l}/\text{min}$ ).

Beispiel:  $P_V = 40 \text{ W}$ ,  $\Delta T_{\text{max}} = 15\text{k}$ , benötigte Luftleistung  $\sim 12 \text{ m}^3/\text{h}$

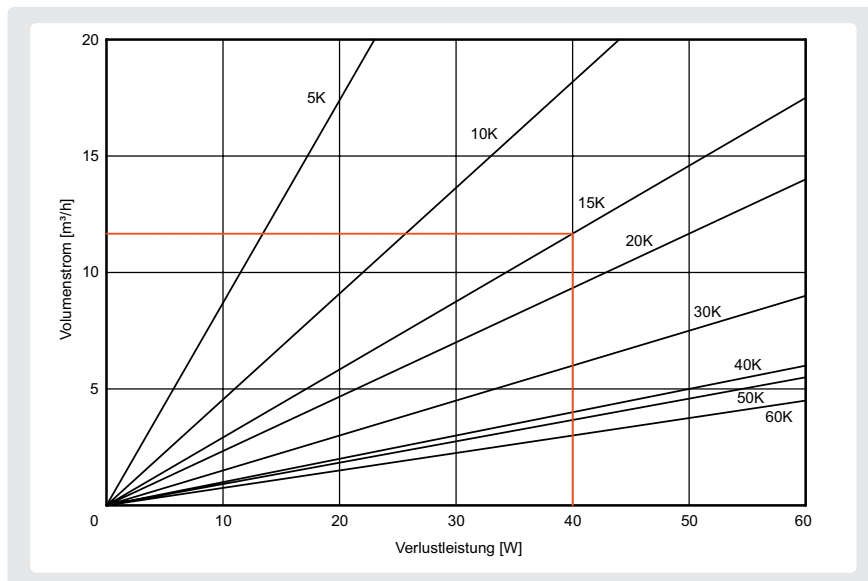


Abb. 3: Überschlägige Ermittlung des Volumenstroms bei gegebener Verlustleistung und gewünschter max. Temperaturerhöhung

Dabei ist zu beachten, dass einzelne Bauteile mit besonders hoher Verlustleistung, wie Prozessoren, Leistungstransistoren und -ICs, trotz niedriger Lufttemperatur im Geräteinneren zu heiß werden können und zusätzlich passiv oder aktiv gekühlt werden müssen. 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. Die Wärmeabgabe steigt, die Bauteiltemperatur sinkt. Mit stärkerer Luftbewegung erhöht sich dieser Effekt. 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.

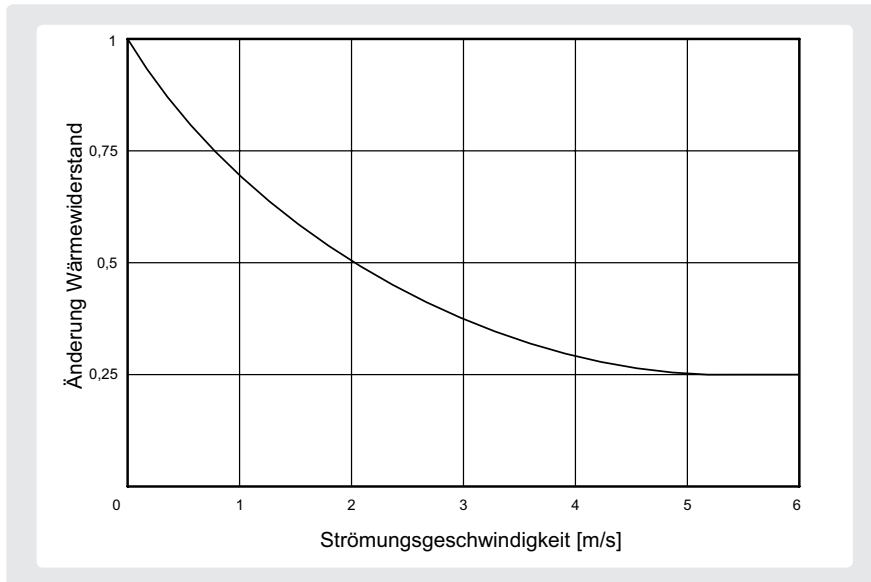


Abb. 4: Forcierter Luftstrom verbessert den Wärmewiderstand

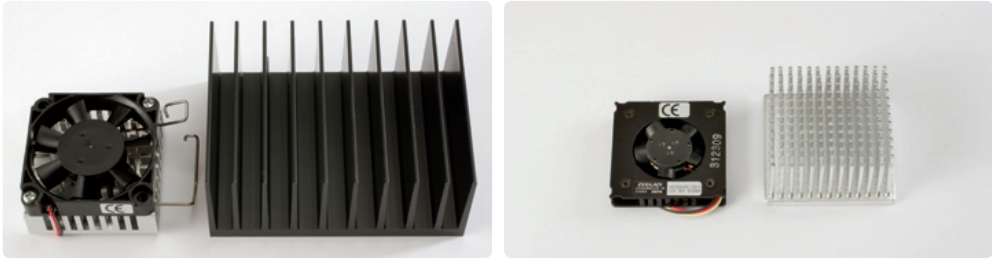


Abb. 5: Vergleich aktiver (links) und passiver (rechts) Kühlkörper mit annähernd gleichem Wärmewiderstand. Forcierte Kühlung bringt Volumen- und Gewichtseinsparung bei Kühlkörpern

### 2.2.3 Kühlung von Leuchtmitteln

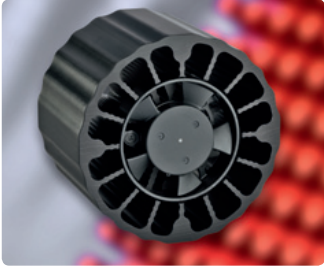
Neue Leuchtmittel, insbesondere LED Lampen, haben die Glühlampe weitgehend verdrängt. Normalerweise benötigt sie keine forcierte Kühlung, obwohl durch ihren sehr schlechten Wirkungsgrad von 3 bis 5 Prozent der Großteil der zugeführten Energie in Wärme umgesetzt wird. Licht emittierende Dioden wandeln bis zu 25 Prozent der zugeführten Energie in Licht um, müssen aber gekühlt werden, da ihre Energiedichte [ $\text{W}/\text{cm}^2$ ] ungefähr tausendmal 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 mit kleinerer Leistungsaufnahme noch gut passiv kühlen lassen, müssen Hochleistungs-LEDs aktiv gekühlt werden, wenn 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 quadratischer oder runder Bauform kombinieren lassen.

Die bei einer Junction-Temperatur, die Temperatur des Halbleiterkristalls, von 85 °C erreichbare LED Lebensdauer beträgt etwa 10.000 h und ist damit viel höher als die einer Glühbirne. Die Lebensdauerergrenze 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. L1 (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**<sup>®</sup> Lüfter erreichen bei 40 °C Umgebungstemperatur ein L1 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, so-



dass 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 (Junction) bis zur Umgebung durchdringt die Wärme Zonen mit unterschiedlichen Wärmewiderständen. Der Wärmewiderstand des Kühlkörpers ist nur ein Teil in der gesamten Kühlstrecke.

Abb. 6: Runder Lüfter mit Kühlkörper

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. Im Kapitel Zubehör sind mehrere Möglichkeiten beschrieben um 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.

## 2.2.5 Beispiel

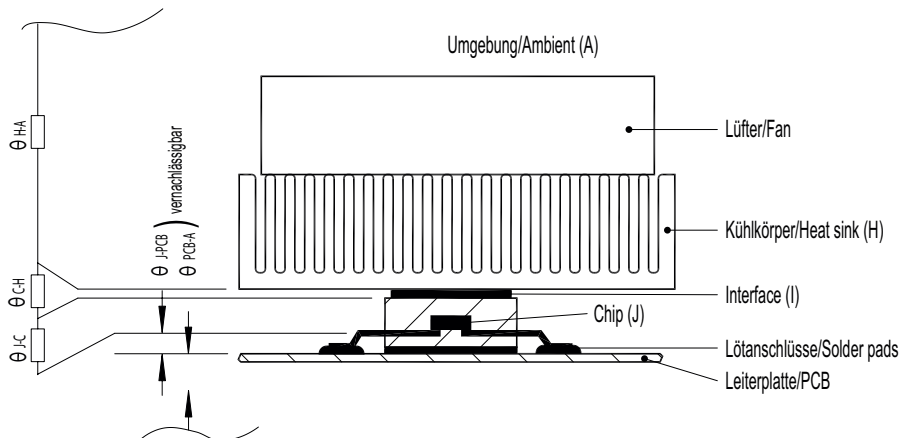


Abb. 7: Wärmeübergang Junction-Umgebung



Summe Wärmewiderstand:  $\theta = \theta_{JC} + \theta_{CH} + \theta_{HA}$

Daraus Wärmewiderstand Kühlkörper:  $\theta_{HA} = \theta - \theta_{JC} - \theta_{CH}$

Dabei sind:

$\theta_{JC}$  = 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.

$\theta_{CH}$  = Wärmewiderstand Gehäuse – Kühlkörper. Durch spaltfüllende Materialien optimierbar.

$\theta_{HA}$  = Wärmewiderstand des Kühlkörpers, der letztlich gesucht wird.

Rechenbeispiel:

Eine CPU soll gekühlt werden.

$P_{V\text{CPU}} = 18 \text{ W}$  (Angabe des Herstellers)

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

$T_{A\text{max}} = 50 \text{ °C}$  (geschätzte Maximaltemperatur im Gerät)

Das Temperaturgefälle zwischen IC-Oberfläche und Umgebung beträgt

$$\Delta T = T_{C\text{max}} - T_{A\text{max}}, \text{ also } 85 - 50 = 35 \text{ [K]}, \quad (9)$$

und der Gesamtwärmewiderstand

$$R_{\text{th}} = \Delta T / P_{V\text{CPU}}, \text{ gleich } 35/18 = 1,94 \text{ [K/W]}. \quad (10)$$

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

$$\theta_{HA} = \theta - \theta_{CH} \text{ } 1,94 - 0,2 = 1,74 \text{ [K/W]} \text{ oder kleiner sein.} \quad (11)$$

Für das Beispiel eignet sich ein HXB50E05 mit 1,5 K/W. Nicht berücksichtigt ist hier der parallel zu  $\theta$  liegende Wärmewiderstand Chip – Leiterplatte ( $\theta_{JPCB}$ ). 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 Lüfter und Zubehör

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. DC Lüfter enthalten einen Gleichstrommotor mit elektronischer Kommutierung und sind sehr sparsam im Gebrauch. Dort wo keine Gleichspannung zur Verfügung steht werden Wechselspannungslüfter eingesetzt, die jedoch wegen des schlechten Wirkungsgrades unwirtschaftlich arbeiten. Nur modernste AC Lüfter der Baureihe EC enthalten ebenfalls einen DC-Motor mit entsprechend niederem Stromverbrauch.

### 3.1 Axiallüfter

Axiallüfter enthalten ein propellerähnliches Laufrad. Die Bewegung der Luft erfolgt weitgehend axial, also parallel zur Rotorachse. Die Formgebung der Rotorschaukeln ist nicht symmetrisch. Durch eine aerodynamisch gerichtete Formgebung wird eine Optimierung in Richtung einer Förderrichtung erreicht. Die Schaufelgeometrie beeinflusst wesentliche Parameter des Lüfters wie Volumenstrom, Druck und Geräusch. Eine Drehrichtungs-/Förderrichtungsumkehr ist für den normalen Betrieb nicht vorgesehen. In manchen Applikationen wird aber eine Drehrichtungs-umkehr zur Reinigung (Entstaubung) der Ansauggeometrie verwendet.

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.

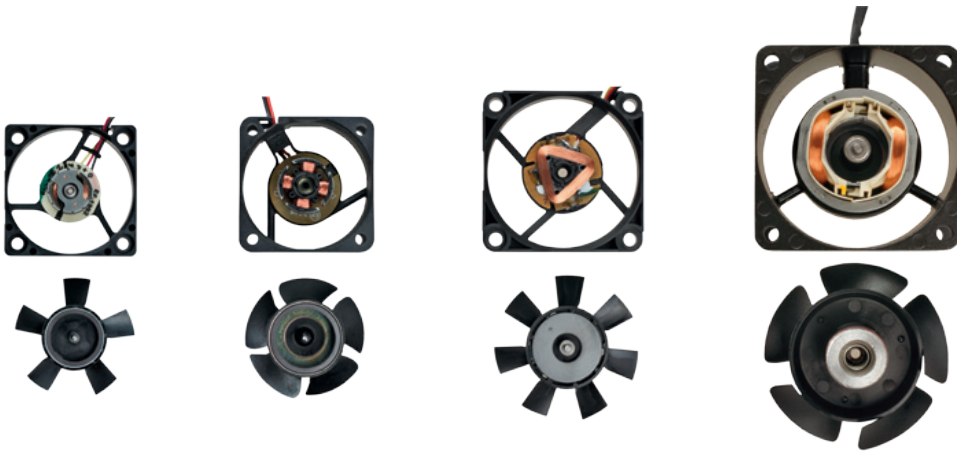


Abb. 8: In der vorliegenden Abbildung werden die wichtigsten Motorkonstruktionen gezeigt:  
v.l.n.r. DC Klauenpolmotor, DC Motor mit Statorpaket aus Blechlamellen, DC Scheibenläufermotor und AC Kurzschlussläufermotor.

Bei allen Varianten ist der Rotor des Antriebsmotors mit dem Propeller des Lüfters verbunden. Häufig findet man DC Motoren mit radialem Luftspalt. Der Stator besteht meist aus 2 x 2 Polen, die durch entsprechende Wicklungen magnetisch erregt werden. Der Rotor enthält einen Magnetring aus Kunststoff, der von einem Eisenring oder -topf umgeben ist, auf dem der Rotor sitzt. Wechselstrommotoren enthalten eine außen angeordnete Wicklung auf einem Blechpaket aus mehreren gestanzten Blechen.

Um Bauhöhe zu sparen, werden kleine, flach gebaute Lüfter mit axialem Luftspalt, mit einem scheibenförmigen Permanentmagneten und einer dreieckigen Flachspule aufgebaut. Die bei diesem Motor intern auftretenden axialen Kräfte werden zu Lagerverspannung bzw. -positionierung genutzt.

Die Wicklungen 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 bestimmte Lage ein, aus der nicht nur ein sicheres Anlaufen möglich ist, sondern auch das elektromagnetisch entstehende Drehmoment unterstützt wird. Diese Konstruktion findet sich bei allen DC Lüftermotoren. Ein über den gesamten Betriebstemperaturbereich und während der gesamten Lebensdauer reibungsarm funktionierendes Lagersystem ist sehr wichtig, damit die Lüfter nach dem Abschalten ungebremst auspendeln, um wieder sicher starten zu können.

*ECO Lüfter* sind eine Weiterentwicklung von Axiallüftern mit dem Ziel eines besseren Wirkungsgrades. Die wesentlichen Unterschiede zu den Lüftern älterer Generation sind das Statorpaket aus Blechlammellen und die wesentlich dünneren Lüfterflügel mit konstanter Wandstärke (Abbildung 9 unten).



Abb. 9: Lüfterflügel im Vergleich

*AC Lüfter* sind sehr verbreitet, obwohl der Wirkungsgrad wegen des verwendeten Rohrläufermotors oder Kurzschlussläufers ziemlich schlecht und die Leistungsaufnahme dementsprechend hoch ist. Wegen der deutlich höheren Wärmebeanspruchung werden AC Lüfter fast ausschließlich mit Alu-Druckgussrahmen angeboten und sind teuer. Lüfterflügel aus Metall sind 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 Versorgung mit AC Netzspannung 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 (ErP-Richtlinie) zwingt hier zum Umdenken: Es ist möglich, einen AC/DC Wandler in Lüftern zu integrieren, ohne dass die äußeren Abmessungen verändert werden. Diese sogenannten EC Lüfter benötigen nur rund 25%

der Betriebsleistung eines vergleichbaren AC Lüfters. Außerdem sind die meisten EC Lüfter ohne Umschalten an allen weltweit vorkommenden Netzspannungen und -Frequenzen einsetzbar. EC Lüfter sind etwas teurer als gleichwertige AC Lüfter. Für den gleichen Volumenstrom werden jedoch weniger Lüfter benötigt, was den Mehrpreis kompensiert. Darüber hinaus ergibt sich im Betrieb eine deutliche Senkung der Stromkosten. Fazit: Es profitiert der Betreiber und die Umwelt.



Abb. 10: EC 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 11) einen anderen Einsatzbereich als die Axiallüfter. Aufgrund der besonderen Konstruktion des einem Mühlrad ähnlichen Laufrades, 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 doppelblutiger Ausföhrung. Solche AC Radiallüfter mit walzenförmigen Propellerflügeln werden zur Gerätebelüftung eingesetzt. Flache DC Radiallüfter hingegen werden verstärkt in der Elektronikköhlung verwendet, da sich mit dieser Bauart in Verbindung mit Köhlkörpern sehr platzsparende Aktivköhlösungen realisieren lassen. Radiallüfter mit sternförmiger Ausblasrichtung sind oft in CPU- oder Chipköhlern integriert.

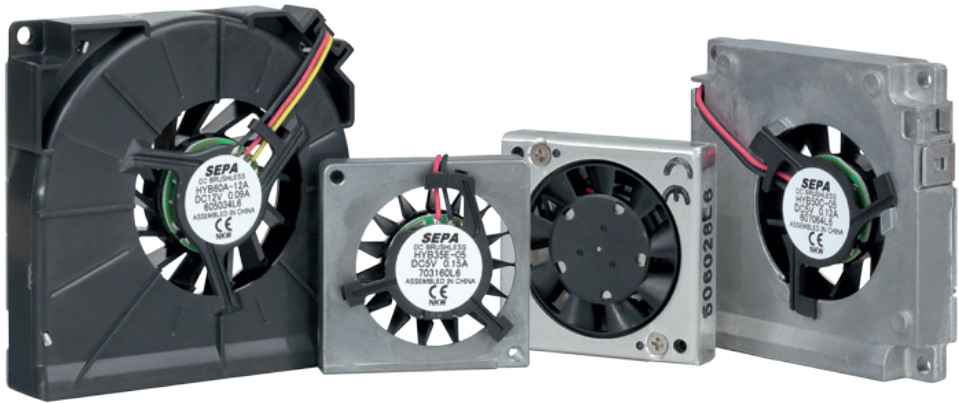


Abb. 11: Bauformen von Radiallüftern

### 3.3 Gehäuselose Lüfter

Wie oben erwähnt, benötigen Lüfter einen, den Propeller umschließenden, zylindrischen Kanal, um zu funktionieren. Beim Lüfter ohne Gehäuse (Rahmen) enthält der Stator nur Elemente zur Befestigung, während die aerodynamische Funktion 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 Bauteil integriert wird, das auch andere Funktionen erfüllt. 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.

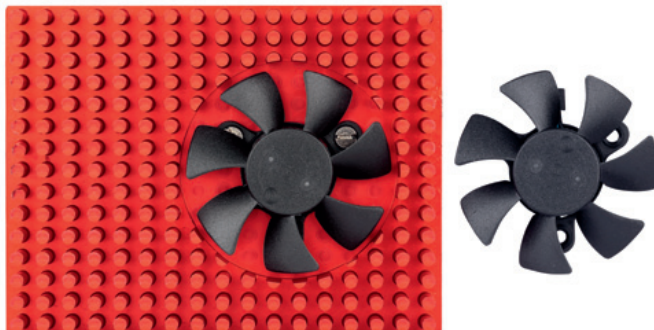


Abb. 12: Rahmenloser Lüfter, montiert und lose

### 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 Flachlüfter

Auf Leiterplatten-Steckkarten werden oft Halbleiter-Chips verbaut die aktiv gekühlt werden müssen. Die Karten in den Normgehäusen sind sehr eng bestückt, so dass wenig Höhe zur Verfügung steht. **SEPA**® bietet für diesen Anwendungsbereich sehr flache Radiallüfter (Bauhöhe ab 4 mm) an, die seitlich zum Kühlkörper montiert werden.

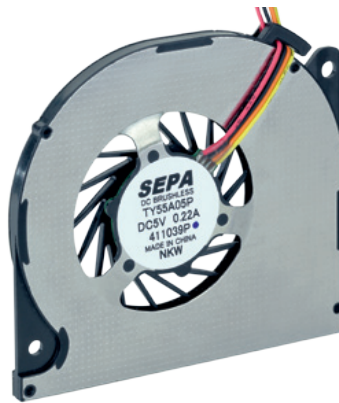


Abb. 13: Flachlüfter

### 3.6 Sonderlüfter

Als Sonderlüfter bezeichnen wir Konstruktionen von Lüftern, deren Gehäuse oder Elektronik vom Standarddesign abweichen, jedoch durchaus Einzelteile oder komplette Baugruppen aus Standardlüftern enthalten können. In der Regel werden dabei spezielle Anforderungen des Kunden an die Mechanik und Elektronik des Lüfters berücksichtigt. Sonderlüfter werden ausschließlich für eine bestimmte Applikation entwickelt und es sind eigene Werkzeuge erforderlich. Durch die hohen Anfangskosten sind Sonderlüfter nur bei hohen Fertigungsstückzahlen wirtschaftlich.

### 3.7 Chip Cooler

Vorrichtungen zur Wärmeabfuhr an relativ kleinen Halbleiterbauelementen (Hot Spots) werden Chip Cooler genannt. Diese bestehen aus einem Kühlkörper, der die Wärme über die obere Fläche des Halbleitergehäuses (Chip) aufnimmt und an die Umgebung abgibt. Mit passiven Kühlkörpern stößt man rasch an mechanische und thermische Grenzen. Sehr viel effektiver sind aktive Kühler (Kühler mit einem Lüfter ausgestattet).

Leicht machbar und preiswert sind Kühlkörper mit nadelförmigen Stiften zur Vergrößerung der Oberfläche (Kühligel®). Diese durch Pressen in nahezu beliebigen Abmessungen und Formen herstellbare Kühlkörper aus Reinaluminium haben bessere thermische Eigenschaften als gefräste Kühler. Lüfter können aufgesetzt, versenkt oder seitlich montiert werden. Neben kundenspezifischen Größen sind mehrere Standardabmessungen von 25 x 25 mm bis 50 x 50 mm verfügbar.



Abb. 14: Kühligel

### 3.8 Zubehör

Lüfter oder Kühler benötigen in der Regel ergänzende Komponenten um sie sinnvoll einsetzen zu können. Solche Komponenten werden zur Montage oder zum Schutz gegen Berührung oder Eindringen von Fremdkörpern oder Wasser benötigt. Nachstehend sind diese Zubehörteile beschrieben.



## 3.8.1 Mechanische und elektromagnetische Schutzvorrichtungen

Schutzgitter haben die Aufgabe, unbeabsichtigtes Berühren der Rotorflügel (Verletzungsgefahr!) zu verhindern. Im einfachsten Fall wird dies durch Gitter aus verchromten Stahldrähten, Edelstahl oder Kunststoffmaterial erreicht. Durch Kombinationen mit Filtermatten, Filterrahmen oder Schirmblechen erreicht man zusätzlichen Schutz gegen Staub, Spritzwasser oder EMV Strahlung.

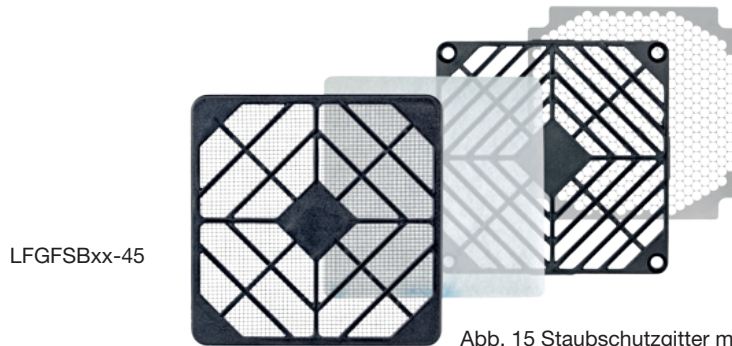


Abb. 15 Staubschutzgitter mit EMV Abschirmung

## 3.8.2 Montage- und Wärmeleitkomponenten

*Wärmeleitpasten* gewährleisten eine thermische Verbindung zwischen dem zu entwärmenden Bauteil (z.B. CPU, GPU) und dem Lüfter. Sie ist meist fett- oder silikonhaltig und mit keramischem Material oder Graphit angereicht. Neuere Wärmeleitpasten (z.B. SWP9 SEPA Silver Compound) sind silikonfrei und haben eine höhere Wärmeleitfähigkeit. Darüber hinaus sind silikonhaltige Materialien in vielen Anwendungen wegen Verschmutzungsgefahr nicht zulässig. Wärmeleitpasten sind günstig und einfach anzuwenden.



Abb. 16: Wärmeleitmaterialien

Mit *beidseitig klebenden Wärmeleitfolien* lassen sich Kühlkörper direkt auf die zu kühlenden Bauteile kleben. Diese schraubenlose 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 (nur bei Kleinspannung), einen Kunststoffkern mit graphitartigem Füllstoff oder einen Metallkern aus Aluminium, wenn keine elektrische Isolation gefordert ist. Vorteile: Für Montage und Wärmeableitung ist nur ein einziges Teil erforderlich und die Verbindung ist lösbar, wobei die Klebefolie zerstört wird. Diese Klebeverbindungen eignen sich für relativ leichte Kühlkörper und sind bei sorgfältiger Verarbeitung und absolut sauberen Oberflächen sehr sicher. Die Klebefolien werden in mehreren Standardabmessungen oder in kundenspezifischen Größen angeboten.

Eine gut wärmeleitende und mechanisch sehr sichere Verbindung zwischen Bauteil und Kühlkörper stellt der *Wärmeleitkleber* her. In der Regel bestehen Wärmeleitkleber aus zwei Komponenten. So auch der Wärmeleitkleber HERNON 746 von **SEPA**® EUROPE. Hier ist Mischen nicht erforderlich, der Kleber wird auf der einen Oberfläche aufgetragen, mit dem Aktivator wird die andere Oberfläche benetzt. Das Zusammenfügen kann bereits nach einer Minute oder erst nach Stunden erfolgen. Die Verbindung ist, je nach Hersteller, bei Raumtemperatur oder erhöhter Temperatur innerhalb von wenigen Minuten handfest, was die Weiterverarbeitung erleichtert. Die Endfestigkeit wird nach einigen Stunden, ggf. unter Wärmeeinwirkung, erreicht. Preiswerter als Klebefolien, weisen diese sparsam anzuwendenden Kleber hervorragende mechanische und thermische Eigenschaften auf. Nachteil: Kleber und Aktivator müssen aufgetragen werden und die Klebeverbindung lässt sich nicht mehr lösen. Kleber und Aktivator sind in mehreren Gebindegrößen einzeln oder komplett als Set erhältlich.

Oft sind konstruktionsbedingt oder wegen mechanischer Toleranzen auf einer Leiterplatte Luftspalte 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 Elastomer wird in Matten unterschiedlicher Dicke angeboten. Um seine optimale Wärmeleitfähigkeit zu erlangen, soll das Spaltfüllmaterial bei der Montage auf etwa 50 Prozent der Anfangsdicke zusammengedrückt werden. Es lassen sich Spalten von ca. 0,15 bis zu mehreren

Millimetern 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 bei Gap-Fillern unbedingt erforderlich.

Neben den elastischen Gap-Filler-Matten sind auch pastöse, zweikomponentige Werkstoffe erhältlich. Diese werden mittels Dosierspritze aufgetragen. Diese Paste ist nicht haftend, über einen weiten Temperaturbereich flexibel und kann verschiedene Bauteile mit unterschiedlichen Spaltmaßen zum Kühlkörper wärmeleitend überbrücken. Auch hier ist eine mechanische Befestigung des Kühlkörpers, allerdings ohne Druck, 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  $0,3 \text{ W/mK}$  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 Cu-Durchkontaktierungen. Technisch sind bis zu 400 Bohrungen pro  $\text{cm}^2$  mit einem Durchmesser von  $0,35 \text{ mm}$  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. Die Heatpipe transportiert die Wärme zum Kühlkörper und wird eingesetzt, wenn der Kühlkörper in der erforderlichen Größe nicht direkt am zu entwärmenden Bauteil Platz findet. Der Markt bietet hier eine Vielzahl an Standardprodukten an, jedoch arbeitet eine Lösung, die auf einen konkreten Anwendungsfall ausgerichtet ist, meist besser.

## 4 Förderleistung

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 17). Das Produkt aus Volumenstrom und Druckerhöhung im Arbeitspunkt ergibt die zugehörige Förderleistung  $P$  des Ventilators.

Die Druckwerte werden in Pa angegeben ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ ).

Viele Datenblätter zeigen auch  $\text{mmH}_2\text{O}$  oder  $\text{InH}_2\text{O}$ .

Umrechnung:     $1 \text{ Pa} = 0,102 \text{ mmH}_2\text{O}$        $1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9,81 \text{ Pa}$   
                    $1 \text{ Pa} = 0,00401 \text{ InH}_2\text{O}$        $1 \text{ InH}_2\text{O} = 249,2 \text{ Pa}$

Für den Volumenstrom wird in den Katalogen  $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $\text{l}/\text{min}$  oder CFM verwendet.

Umrechnungen:	$1 \text{ m}^3/\text{h} = 16,67 \text{ l}/\text{min}$	$1 \text{ l}/\text{min} = 0,06 \text{ m}^3/\text{h}$
	$1 \text{ l}/\text{s} = 3,6 \text{ m}^3/\text{h}$	$1 \text{ m}^3/\text{h} = 0,2778 \text{ l}/\text{s}$
	$1 \text{ m}^3/\text{s} = 3600 \text{ m}^3/\text{h}$	$1 \text{ m}^3/\text{s} = 60.000 \text{ l}/\text{min}$
	$1 \text{ CFM} = 1,7 \text{ m}^3/\text{h}$	$1 \text{ CFM} = 28,34 \text{ l}/\text{min}$

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

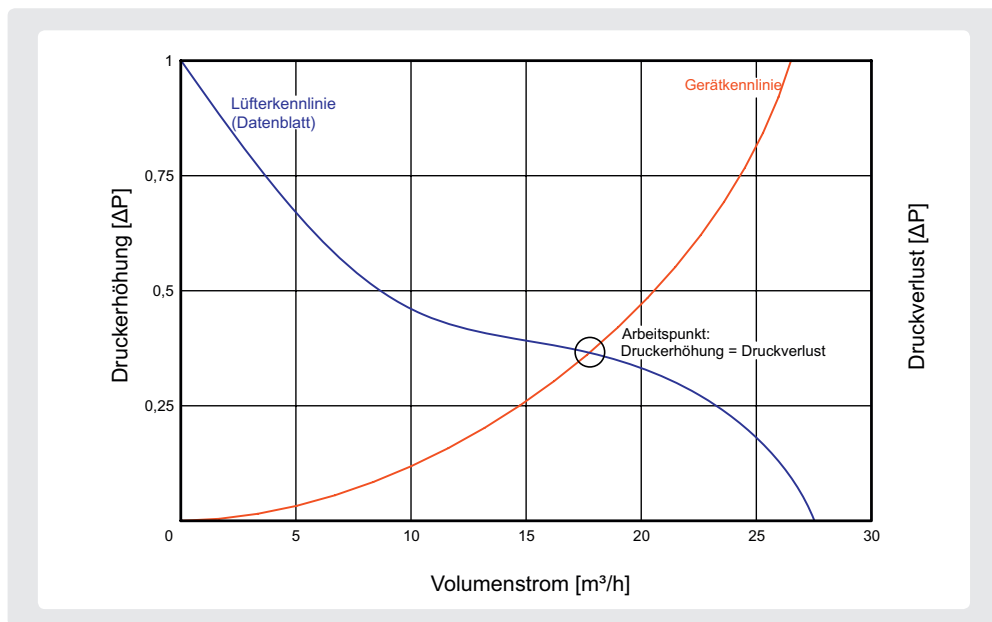


Abb. 17: Ventilator-kennlinie, Geräte-kennlinie, Arbeitspunkt

Ergebnisse bringt. Durch Verändern von Lüftergröße und Drehzahlanpassung wird rasch der optimale Lüfter ermittelt. Mit dem Diagramm in Abbildung 3 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 der Arbeitspunkt bei 20 bis 30 Prozent des Maximaldruckes angenommen werden. Dieser Bereich wird von üblichen Axiallüftern gut abgedeckt, ohne in den ungünstigen Einsatzbereich 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 Überwachung und Steuerung

### 5.1 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. Signalausgänge sind in der Regel nicht kurzschlussfest und dürfen nicht ohne Schutzwiderstand an die Betriebsspannung angeschlossen werden. Bei AC Lüftern ist sowohl die Überwachung als auch die Drehzahlbeeinflussung sehr aufwendig, manchmal sogar unmöglich. Man kann zwischen folgenden Signalarten wählen:

#### 5.1.1 Tachoausgang

Am Signalausgang (FG) stehen drehzahlproportionale rechteckähnliche Signale zur Verfügung. Bei Stillstand des Lüfters kann sich der Signalausgang bei „H“ oder „L“ einstellen. Die meisten Lüfter haben einen so genannten „Open-Collector-Ausgang“. Dieser benötigt einen Pull Up Widerstand, der mit der positiven Lüfterspannung oder auch einer anderen positiven Spannungsquelle, 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 Lüfter mit einem Signalausgang, der keinen Pull Up Widerstand benötigt. Dieses Signal schaltet zwischen etwa 1 V und Lüfterspannung minus 1,5 V und muss für einen CPU Eingang über einen Spannungsteiler geführt werden, da dieser „L“ nur erkennt, wenn die Spannung unter 0,8 V sinkt.

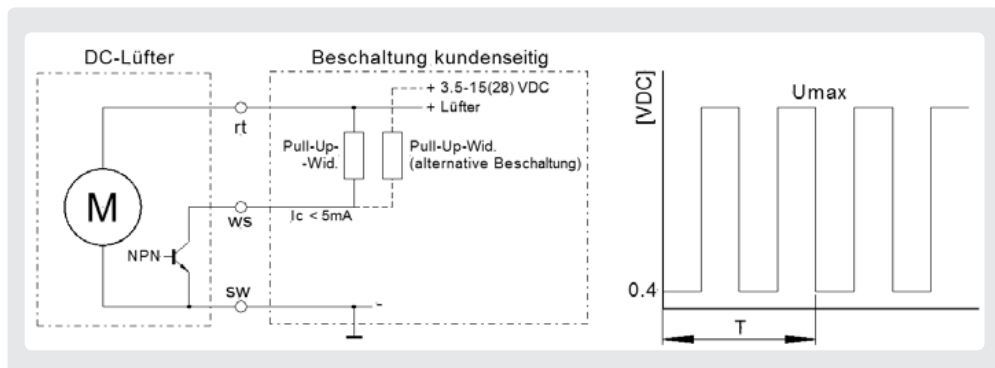


Abb.18: Tachosignal Open-Collector-Ausgang

## 34 Überwachung und Steuerung

Aus den Tachosignalen kann eine entsprechend programmierte CPU oder eine externe Schaltung grobe Abweichungen von der Nenndrehzahl des Lüfters erkennen und ein Warnsignal auslösen. In einem geschlossenen Regelkreis kann eine feste Lüfterdrehzahl, die unter der minimal möglichen Nenndrehzahl des Lüfters liegen muss, eingestellt werden.

### 5.1.2 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 19) des Lüfters. Dadurch wird eine einfache Überwachung der Betriebsfunktion des Lüfters ermöglicht, nicht aber die Drehzahl.

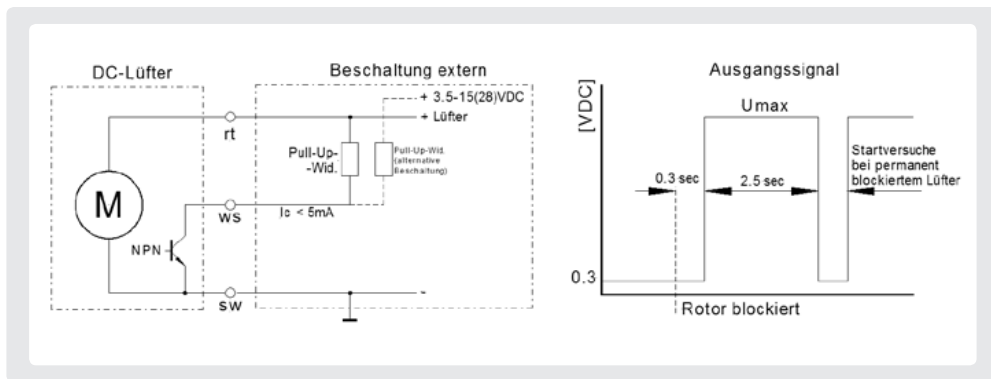


Abb. 19: Alarmsignal bei Blockierung

### 5.2 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. 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. Mit einem Sensor, beispielsweise einem NTC-Widerstand, kann die Temperatur in ein elektrisches Signal umgesetzt 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.

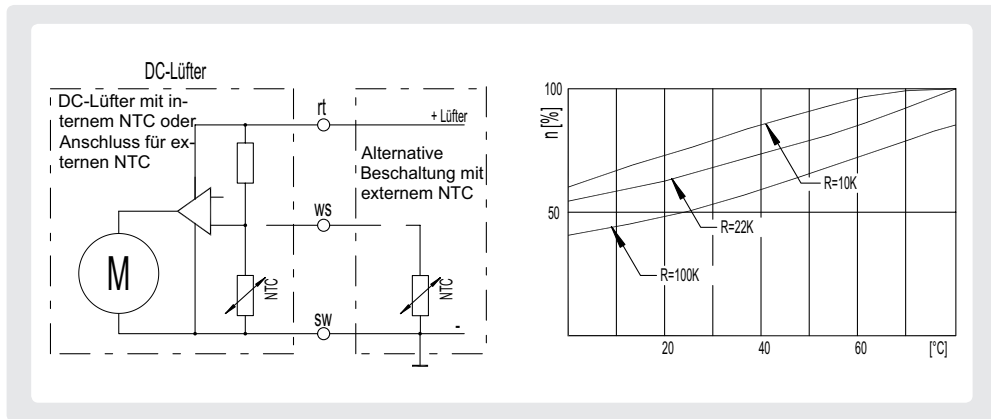


Abb. 20: Temperaturgesteuerter Lüfter

Alternativ kann am Lüfter der Anschluss für einen extern anzuschließenden NTC herausgeführt werden. Diese Lösung ist vorteilhaft, wenn an einer definierter Stelle im Gerät gemessen werden soll. Zudem besteht die Möglichkeit, die Drehzahlkennlinie in Grenzen durch den Widerstandswert des externen NTC zu beeinflussen. Außer

dem 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.

Die lineare Steuerung über die Betriebsspannung ist verlustbehaftet und nur bei kleinen Lüftern mit geringer Stromaufnahme sinnvoll. Besser ist es, die Lüfterdrehzahl über ein PWM-moduliertes Steuersignal zu steuern. Das bedeutet, dass die Betriebsspannung in ihrer Größe unverändert bleibt aber periodisch ein- und ausgeschaltet wird. Das Taktverhältnis kann zwischen 10 und 100% schwanken. Die PWM Taktfrequenz soll außerhalb des Hörbereiches gewählt werden und liegt meist um 22 kHz. Es wird ein Lüfter mit PWM Eingang benötigt. Ggf. können Standard DC Lüfter auch mit PWM-geschalteter Betriebsspannung betrieben werden, wenn das Steuersignal einen Transistor steuert, der die Betriebsspannung des Lüfters schaltet (taktet).

## 6 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. Buzzer und andere Signalgeber lassen sich abschalten und durch Lichtsignale ersetzen. Festplattenlaufwerke und Lüfter sind zur Funktion der Anlagen (derzeit) noch unersetzbar, entwickeln aber weniger unangenehmen Lärm. Es ist abzusehen, dass der elektromechanische Plattenspeicher (HDD) in nicht allzu ferner Zeit komplett durch Halbleiterspeicher sehr hoher Kapazität ersetzt werden. In vielen Bereichen werden die Festplattenspeicher durch elektronische Speichermedien ersetzt. Auf Lüfter kann jedoch, wie weiter oben erwähnt wurde, kaum verzichtet werden.

### 6.1 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.

Luftschall ist das Geräusch, das vom Lüfter direkt über die Luft ausgesendet wird und kann auftreten als:

- 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 Frequenzbewer-

tung (A-Kurve) 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 setzen, sondern entspricht einem (äußerst) geringen Schalldruck von  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Leider eignet sich der Luftschall allein kaum für die Abschätzung der Geräuschentwicklung in einem Gerät.

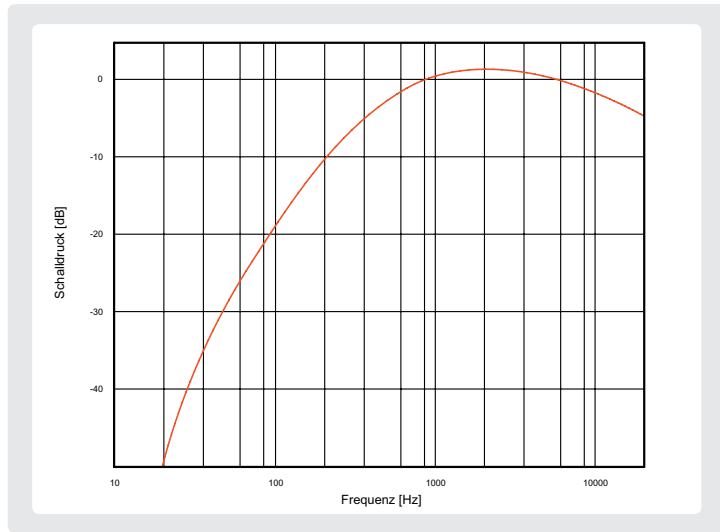


Abb. 21: A-Bewertungskurve

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

zen verstärken. Ähnlich kann eine Luftsäulenresonanz im Gehäuseinneren zufällig mit einer vom Lüfter über die Luft oder über das Gehäuse abgegebenen Frequenz übereinstimmen und verstärkt werden.

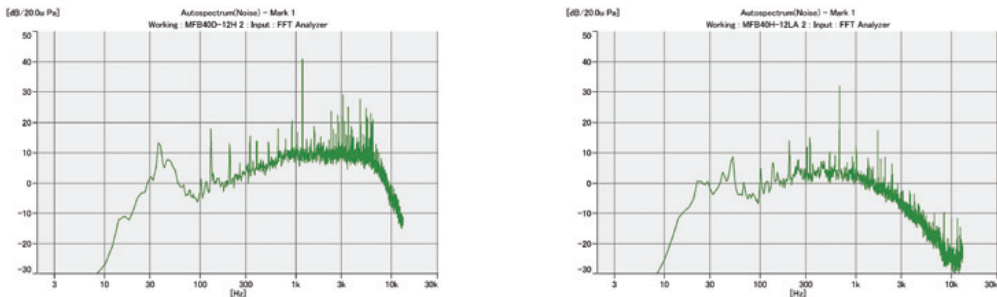


Abb. 22: Geräuschspektrum verschiedener Lüfter

Moderne Lüfterkonstruktionen der letzten Generation sind tatsächlich leiser (Abbildung 22). Eine Verbesserungen der Schaufelgeometrie steigerte auch die Luftleistung. Dadurch ist es möglich, mit niedriger 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.

## 6.2 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 eine geräuschoptimierte 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.

Fortsetzung Seite 40

- Den Volumenstrom 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 dann langsamer drehen. Bei jedem DC-Standardlüfter kann das mit einer kleinen Zusatzelektronik zu geringen Kosten erreicht werden. Die Drehzahlsteuerung erfolgt bei DC Lüftern einfach über die Betriebsspannung. Die im Datenblatt angegebene untere Spannungsgrenze ist für den sicheren Anlauf 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.

Müssen mehrere Lüfter parallel betrieben werden, soll deren Drehzahl nicht gleich sein. Entweder wählt man Lüfter unterschiedlicher Drehzahl oder sieht unterschiedliche Versorgungsspannungen (wenigstens  $\pm 5\%$ ) vor, um Schwebungsresonanzen zu vermeiden.

Moderne Gleitlagerlüfter (HYPRO und MagFix) sind messbar leiser. Aber auch **SEPA**<sup>®</sup> Kugellagerlüfter sind aufgrund ihrer High Grade Lager (höchste Qualitätsstufe) mit eingengten Toleranzen und speziell polierten Laufrillen besonders laufruhig. Zusätzlich zu dem angenehmen Geräuschverhalten können sie auch mit einer hohen Lebensdauer punkten.

Pulsweitenmodulation (PWM) ist bei entsprechend ausgestatteten Lüftern zu empfehlen. Diese haben einen Steuereingang, mit dem die Motorspulen ein- und ausgeschaltet werden können, während die Kommutierungselektronik permanent mit Spannung versorgt bleibt. Die PWM Frequenz wird meist um 22 Khz gewählt und bleibt unhörbar.

### 6.3 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 bei der Lüftermontage 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  $\geq 10$  Prozent Lüfterdurchmesser)
- Kompetente Hilfe bei Planung und Optimierung der Kühllösung hinzuziehen

Mechanisch und akustisch hervorragend und relativ preiswert ist die Montage der Lüfter mittels dämpfender Montagehilfen wie beispielsweise mit kundenspezifisch gefertigten Schaumstoffkörpern. 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 erfolgt einfach durch montage- und demontagefreundliches Stecken. Mit elastisch befestigten Lüftern wird nicht nur der Körperschall wesentlich gedämpft, sondern der Lüfter ist auch besser gegen Stöße geschützt.

Kleine und leichte Lüfter lassen sich mit Gumminieten (EAR440) befestigen, die durch die Montagebohrungen von Lüfter und Gerätewand gezogen werden. Wesentlich stabiler sind elastische Manschetten, die es für Lüftergrößen von 25 mm x 25 mm bis 120 mm gibt (Abb. 23).

Lüfter kleinerer Abmessungen können auch gut mit doppelseitig klebenden Schaumstoffteilen montiert werden.



Abb. 23: Lüftermanschette

Eine einfache und günstige, aber dennoch gute Entkopplung ergibt sich, wenn die Befestigungsschrauben nicht direkt an der Gehäusewand, sondern mit Hilfe von Kabeldurchführungen (Abbildung 24) montiert werden.

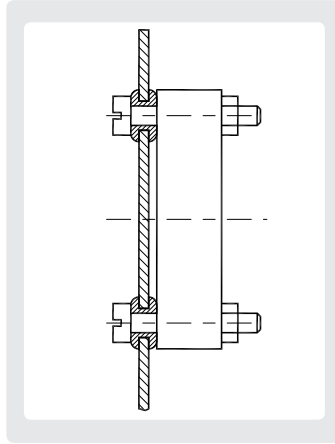


Abb. 24: Dämpfende Montagen

## 7 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.

### 7.1 Horizontale oder vertikale Durchlüftung

In elektrischen Anlagen 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 Ausblasöffnungen 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.



## 7.2 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 heiße ausgeblasene Luft des Gerätes belastet wird, da er die relativ kühle Umgebungsluft ansaugt. Dadurch erhöht sich die Lebensdauer.

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. Der Lüftermotor ist weitgehend gegen Eindringen von Staub geschützt. Hingegen können sich an den Lüfterflügeln und an der Gehäuseinnenseite im Laufe der Zeit Staub festsetzen was den Volumenstrom etwas verringert.

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.

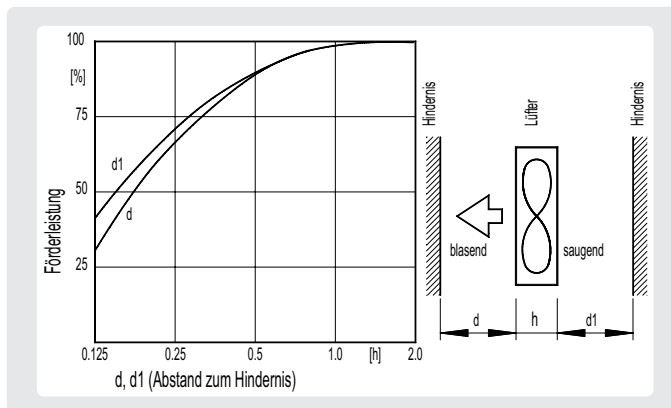


Abb.25: Saugende oder blasende Anordnung von Lüftern

### 7.3 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 Reihenanordnung sinnvoll ist.

Bei parallel 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 hintereinander (in Reihe) 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 Luftleiträd 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 hintereinander 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 % Druckverlust verursachen kann.

#### 7.4 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. Durch Simulation kann aber bereits Aufschluss über die Wirksamkeit der Belüftung erhalten oder Optimierung erarbeitet werden. Die Qualität der Simulationsaussage hängt von der Genauigkeit der zu Verfügung stehenden konstruktiven Daten ab. Steht ein fertiges Gerät (Entwicklungsmuster) zur Verfügung, kann experimentell weiter gearbeitet werden. Da ein Ventilator-messplatz selten vorhanden ist, kann durch Einbau eines Lüfters und durch Messen der Druckerhöhung oder Druckminderung im Gerät, der Arbeitspunkt auf der Lüfterkennlinie näherungsweise bestimmt werden. Noch einfacher kann durch die Messung der Temperaturerhöhung im Gerät oder an kritischen Bauteilen der Lüfter näherungsweise bestimmt werden.

Im Allgemeinen sind Lüfter für den offenen Einbau optimiert (unbehinderte Luftaustrittseite). 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. Während bei einfachen Lüftergittern aus Draht nur wenig Druckverlust entsteht, können strömungstechnisch nicht optimierte, oft im Gehäuse integrierte (gestanzte) Gitter oder Filtergitter erhebliche Verluste und Geräusche erzeugen. Die Geräuschzunahme ist bei druckseitiger Anbringung geringer, als bei saugseitiger.

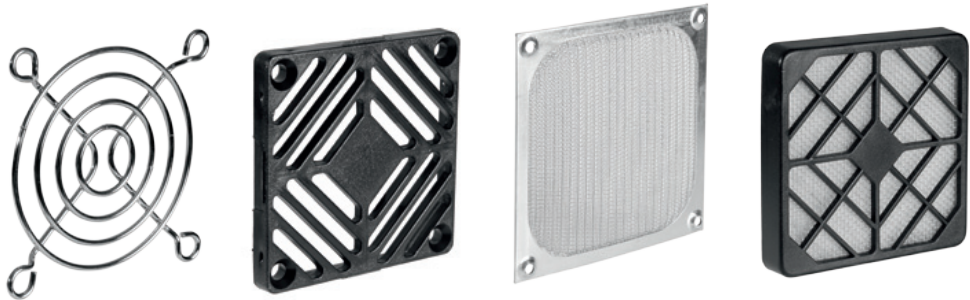


Abb.26: Schutzgitter und -filter

### 7.5 Leistungsaufnahme

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. Die Leistungskennzahl gibt an, welche Leistung pro Volumeneinheit benötigt wird, ist in den Datenblättern nicht angegeben, gewinnt aber zunehmend an Bedeutung. **SEPA**<sup>®</sup> Lüfter zeichnen sich durch einen besonders hohen Wirkungsgrad aus, wie die nachstehende Tabelle für einige Lüfter eindrucksvoll zeigt.

Größe [mm]	Modell Nr.	Spannung [VDC]	Stromaufn. [mA]	Volumenstr. [l/min]	Leistungskennz. [mW/l/min]	Bemerkungen
30x30x6,5	MFB30E12	12	40	67	7,2	
30x30x7	Wettbewerb	12	80	104	9,2	
30x30x10	MFB30G12	12	70	128	6,6	
30x30x10	Wettbewerb	12	100	130	9,2	
40x40x10	MFB40H12	12	50	172	3,5	
40x40x10	LF40J12SE22	12	30	138	2,6	ECO Fan
40x40x10	Wettbewerb	12	67	150	5,4	
60x60x15	MFB50E12	12	90	420	2,6	
60x60x15	Wettbewerb	12	100	418	2,9	
60x60x15	MFB60D12	24	60	612	2,4	
60x60x15	Wettbewerb	24	80	650	3,0	

Tabelle 2: Leistungskennzahl von **SEPA**<sup>®</sup> Lüftern und von einigen Wettbewerbslüftern

## 8 Zuverlässigkeit

Unter Zuverlässigkeit ist die Wahrscheinlichkeit zu verstehen, dass ein Produkt während einer definierten Zeitdauer unter gegebenen Einsatzbedingungen eine definierte Funktion erfüllt. Zuverlässigkeitsangaben sind daher statistische Werte. Gebräuchliche Angaben sind die Lebensdauerwahrscheinlichkeit, das heißt, die Wahrscheinlichkeit dass n Prozent der Bauteile eine bestimmte Lebensdauer erreichen. Üblich ist die Lebensdauerangabe L10, mit der eine Überlebenswahrscheinlichkeit von 90 Prozent bzw. eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 10 Prozent definiert wird. Verbreitet ist auch MTBF (IEV 191-12-09: Mean Time Between Failures), der Kehrwert der Ausfallrate FIT (1 FIT = 1 Ausfall je 10<sup>9</sup> Betriebsstunden). Bei Lüftern ist der erste Fehler mit dem Totalausfall des Produktes gleichzusetzen. Die korrekte Bezeichnung hierfür wäre MTTF (IEV 191-12-07: Mean Time To Failure), die jedoch meist nicht verwendet wird. Bei Vergleichen der Zuverlässigkeitsangaben verschiedener Hersteller muss sorgfältig geprüft werden, welche Kenngröße angegeben wird und auf welche Umgebungsbedingung (Temperatur) sich die Angabe bezieht. Wichtig ist auch, wie der Hersteller das Ende der Lebensdauer definiert: Bei **SEPA**<sup>®</sup> Lüftern ist das Lebensdauerende in Anlehnung an ISO 281 dann erreicht, wenn ein einziger Parameter die zulässige Toleranzgrenze über- oder unterschreitet.

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

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

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

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

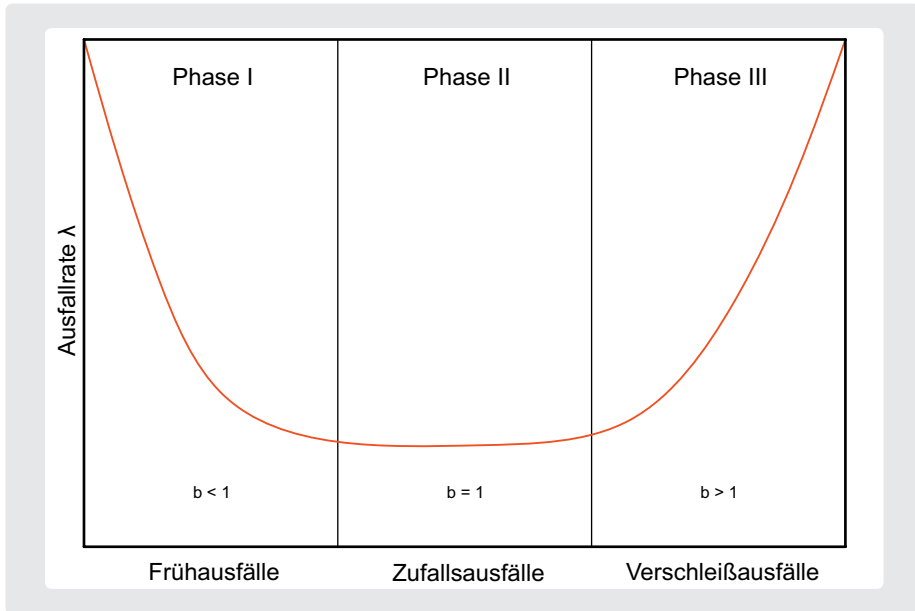


Abb. 27: Badewannenkurve

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

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

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

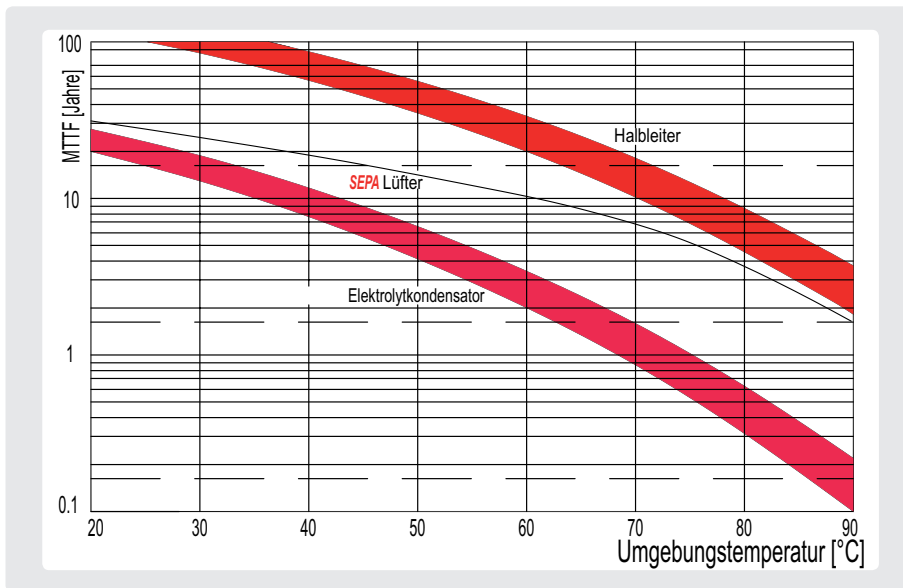


Abb. 28: Temperatureinfluss von MTBF verschiedener Bauteile

### 8.1 Das Lagersystem

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

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

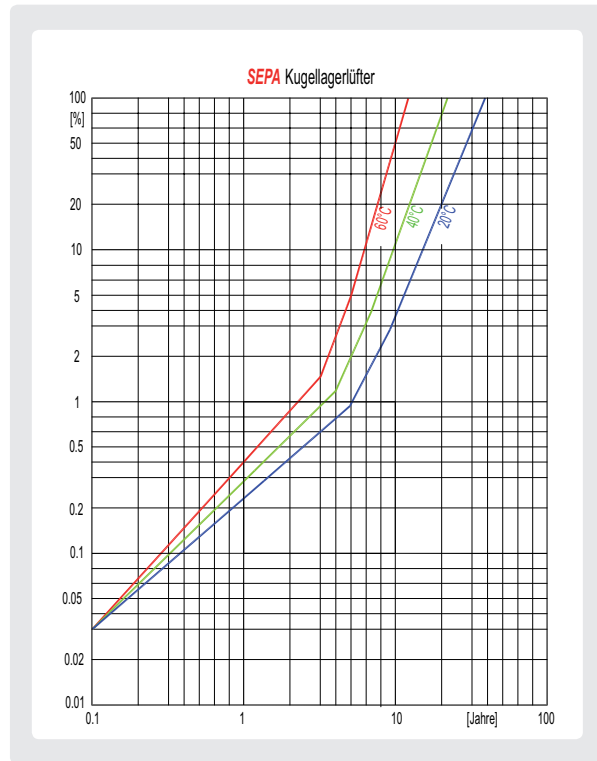


Abb. 29: Typ. Ausfallwahrscheinlichkeit von **SEPA**® Lüftern

## 8.2 Sinterlagertechnologie

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

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



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

### 8.3 Funktionsweise eines Sinterlagers

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

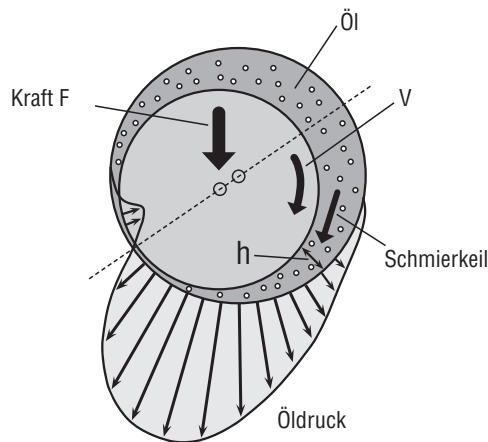


Abb. 30: Schmiermittelkeil beim Sinterlager

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

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

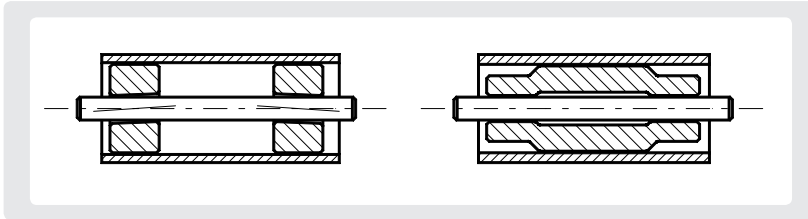


Abb. 31: Vergleich der Sinterlagersysteme  
2 Einzellager (links) – Doppellager (rechts)

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

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

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

Absolut verschleißfreie Lagerung ist auch mit magnetischer Kompensation nicht erreichbar.

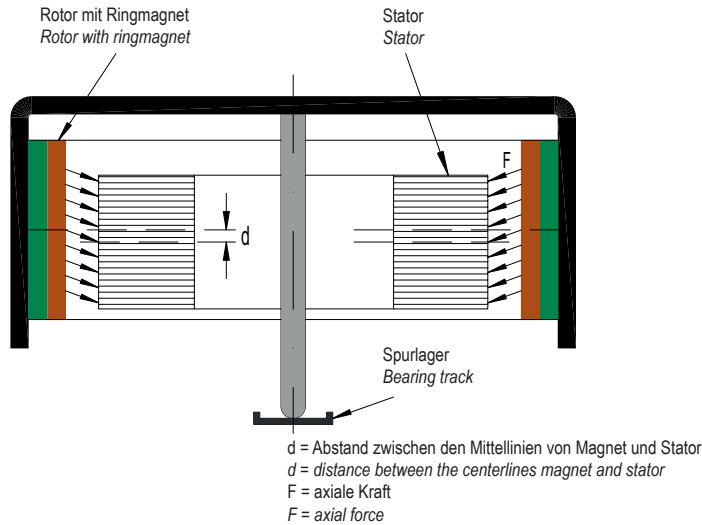


Abb. 32: MagFix Lagersystem

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

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

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

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

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

#### 8.4 Kugellagersysteme

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

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

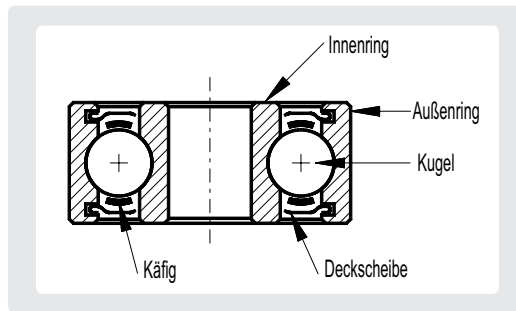


Abb. 33: Aufbau eines Rillenkugellagers ZZ

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

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

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

Gegen Schock und Vibration reagieren Kugellager empfindlicher als Sinterlager.

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

**SEPA**® Miniaturlüfter haben aufgrund der speziellen Motortechnologie besonders leichte Rotoren, die außerdem feinstgewuchtet sind und deshalb hohen Schockbeanspruchungen von 196 bis 490 m/sec<sup>2</sup> (20 bis 50 G) und Vibrationsbelastungen bis zu 34,3 m/sec<sup>2</sup> (3,5 G) widerstehen, ohne Schaden zu erleiden.

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

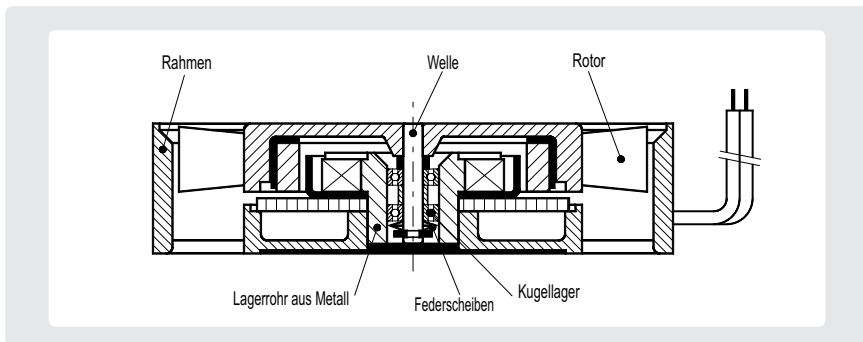


Abb. 34: Lagersystem mit Kugellager in einem modernen Miniaturlüfter von **SEPA**®

### 8.5 Sinterlager oder Kugellager?

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

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

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

*Tabelle 3: Gegenüberstellung der Lagersysteme*

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

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



Abb. 35: 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 je eine Ziffer verwendet, der die Buchstaben IP (Ingress Protection) vorangestellt sind. Bei Lüftern ist die Schutzart nur auf den Motor bezogen, Gehäuse und Propeller müssen durch Schutzgitter bei Bedarf extra gegen Berührung oder Nässe geschützt werden. Die Lager sind konstruktiv durch ein sogenanntes Labyrinth (komplex geformter Spalt zum Schutz vor Tropf- oder Spritzwasser) geschützt sowie durch Deckscheiben bei Kugellagern (Bauform ZZ). Der Motor kann durch das Labyrinth, durch eine Lackierung der elektrischen Teile, durch Vergießen der Statorwicklung oder durch Einkapselung des Stators in Kunststoff geschützt sein. Standard ist bei Lüftern Schutzgrad 20. Höhere Schutzarten sind möglich, erfordern aber besondere Maßnahmen.

### 9.1 Definition der Schutzarten

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



1. Kennziffer Schutz gegen Berührung/Fremdkörper		2. Kennziffer Schutz gegen Wasser/Nässe	
0	Kein Berührungsschutz hinsichtlich unter Spannung stehender oder sich bewogender Teile	0	Kein Wasserschutz
		1	Schutz gegen senkrecht fallendes Tropfwasser
1	Schutz gegen zufällig großflächige Berührung mit der Hand oder einem Fremdkörper $\varnothing > 50$ mm	2	Schutz gegen Tropfwasser aus senkrechter oder schräger Richtung bis $15^\circ$ zur Senkrechten
2	Schutz gegen Berührung mit den Fingern oder einem Fremdkörper $\varnothing > 12$ mm	3	Schutz gegen Sprühwasser aus beliebigen Richtungen
3	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen od. Fremdkörper $\varnothing > 2,5$ mm	4	Schutz gegen Spritzwasser aus allen Richtungen
4	Schutz gegen Berührung mit Werkzeugen oder Fremdkörper $\varnothing > 1$ 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	Vollständiger Berührungsschutz	8	Schutz beim dauernden Untertauchen

Tabelle 4: IP Schutzarten, Schutzgrad

## 9.2 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.

In der Regel handelt es sich um Sonderlüfter, die für den jeweiligen Einsatzfall speziell entwickelt werden und in einer aufwendigen Prozedur von den zuständigen Fachbehörden getestet und frei gegeben werden.

## 10 Konfektionierung und Handhabung

DC Lüfter werden üblicherweise mit Anschlusslitzen der Stärke AWG 24 bis 30 und einer vom Hersteller vorgesehenen Litzenlänge ausgestattet. Die Litzenenden sind zwecks leichter Verarbeitung abisoliert und verzinnt. In sehr vielen Fällen wird die elektrische Versorgung der Lüfter im Gerät über Stecker erfolgen. Eine Nachrüstung - Konfektionierung - mit vom Kunden festgelegten Steckern muss vorgenommen werden. Dabei wird oft auch die Litzenlänge angepasst. Sinnvollerweise werden diese kundenspezifischen Arbeiten vom Hersteller bzw. vom Lüfterlieferanten durchgeführt. Nur dieser kann die richtige Handhabung der Lüfter sicher stellen, so dass die Bauteilegarantie in vollem Umfang wirksam bleibt. Die Einbindung der Konfektionierung in den Herstellprozess ist meist billiger und rascher durchzuführen, als Konfektionierungen die der Kunde beauftragt.

Lüfter sind mechanische Präzisionskomponenten, die durch unvorsichtige Behandlung beschädigt werden können. Insbesondere bei kleinen Lüftern können die Lager durch Handhabungsfehler zerstört werden. Bei Transport, Konfektionierung und Einbau sind daher die vom Hersteller genannten Handhabungsvorschriften für Lüfter genau zu beachten:

- Immer in der Originalverpackung transportieren, nicht als „Schüttgut“
- Niemals stapeln
- Nie auf der Rotorseite ablegen
- Rotor nicht anfassen, Kippen des Propellers erzeugt durch die Hebelwirkung ganz leicht große Kräfte im Lager, die es zerstören
- Nie mit falscher (zu hoher) Betriebsspannung betreiben (die meisten Lüfter sind gegen Falschpolung geschützt)
- Alarm- oder Tachoausgang (FG) nie ohne Schutzwiderstand (Pull Up Widerstand) betreiben
- Lüfter nicht auf unebener Fläche montieren

## 11 Technischer Anhang

### 11.1 Formelsammlung

Maximaler Wärmewiderstand eines Kühlkörpers:

$$\Sigma R = \frac{T_{Cmax} + T_{amax}}{P_V}$$

$$\Sigma R = R_H + R_I$$

$\Sigma R$  = 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 Interfacefolie/Wärmeleitpaste

Volumenstrom im Gerät bei gegebener Verlustleistung:

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

$V$  = Volumenstrom [l/min],

$\Delta T$  = Temperaturdifferenz [K]

Änderung von Druck und Volumenstrom bei Drehzahländerung:

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

Änderung der Drehzahl von DC Lüftern bei Spannungsänderung:

$n$  = Drehzahl [U/min]

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

$p$  = Gesamtdruck

$U$  = Betriebsspannung [VDC]

Weibull-Gleichungen

$$R_{(t)} = e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}$$

$R(t)$  = Überlebenswahrscheinlichkeit,

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

$F(t)$  = Ausfallwahrscheinlichkeit

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

$T$  = Charakteristische Lebensdauer

$b$  = Ausfallsteilheit

$t$  = Betriebsdauer

$\lambda(t)$  = Ausfallrate

## 11.2 Begriffe und Kurzbezeichnungen

0 dB	Bezugsgröße für den Schallpegel, entspricht einem Schalldruck von $2 \cdot 10^{-5}$ 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 mit der Drehzahl 0, oder dem 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 Gerätekenlinie. (Druckerhöhung = Druckverlust)
Arrhenius-Gesetz	Die Ausfallwahrscheinlichkeit von Bauteilen steigt um den Faktor 10 je $25^\circ$ Temperaturerhöhung.
Auswuchten	Unter dynamischem Auswuchten wird die Verbesserung der Masseverteilung eines rotierenden Körpers verstanden, so dass 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 (Wuchtung auf 2 Ebenen).
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 Lebensdaueran-

	forderung 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. Bei den meisten Lüftern ist AWG24 der größte und AWG30 der kleinste 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 $\pm 10\%$ , 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 Probeauf, teilweise unter erschwerten Betriebsbedingungen.
CE	Abkürzung 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	Abkürzung für Cubic Feet per Minute. In den USA noch häufig anzutreffende Angabe des Volumenstroms von Lüftern. 1 CFM = 28 l/min (1,7 m <sup>3</sup> /h)
Chip Cooler	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 $2 \cdot 10^{-5}$ 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.
EC	Abkürzung für Electronic Commutation (elektrische Kommutierung). Die Motorwicklungen werden durch die Kommutierung immer so erregt, dass sie eine dem Rotormagnetpol entgegengesetzte magnetische Kraft generieren. Die Drehung des Rotormagneten erfordert eine ständige Änderung der Polrichtung in den Spulen, damit eine Drehwirkung entsteht. Einfach Gleichstrommotoren, z.B. Akkuschauber, enthalten einen mechanischen Kommutator (Kollektor), der jedoch hohem Verschleiß ausgesetzt ist und stark verschmutzt („Bürstenmotor“). Schalteinrichtungen sorgen im Lüftermotor für die Umpolung (Kommutierung) der Spulen.
EC Lüfter	Dieser Begriff steht für elektronisch kommutierte Netzspannungslüfter, also AC Lüfter mit DC Motoren und einem integrierten AC/DC Wandler. Diese Lüfter benötigen nur 1/4 der Leistung vergleichbarer AC Lüfter der älteren Generation.
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	Abkürzung für Fast Fourier Transform, ist ein Schmalbandfrequenzfilter, der frequenzunabhängig (in Terzbandbreiten) das Geräusch eines Prüflings darstellt. 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 Geräuscentwicklung im Gerät zu schließen.
GeräteKennlinie	Stellt den Volumenstrom in Abhängigkeit des Druckverlusts eines Gerätes dar.
Gleitlager	Zur Aufnahme und radialen Fixierung der (drehenden) Welle. Besteht bei Lüftern aus porösem (gesinterten) Material mit Langzeit-Schmierstoff-Füllung. Günstiger Lageraufbau. Sonderformen (z.B. Hyprolager) 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 er-

	zeugt in einem Magnetfeld proportional 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.
Heatpipe/Wärmerohr	Ein Wärmeübertrager, der unter Nutzung von Verdampfungswärme eines Mediums eine hohe Wärmestromdichte erlaubt, d. h. auf kleiner Querschnittsfläche können große Wärmemengen transportiert werden. Der Wärmewiderstand eines Wärmerohrs ist bei Arbeitstemperatur deutlich kleiner als der von Metallen.
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, die auf einem Halbleiterchip mehrere Hundert bis mehrere Millionen aktive (Dioden, Transistoren) und passive (R, C) elektrische Bauteile vereint.
Ingress Protection (IP)	Schutzart nach DIN, deren Zahl den Grad des Schutzes angibt.
Junction	hier: Halbleiterkristall, Sperrschicht. Aktive Zone eines Halbleiterbauelementes.
Kommutierung	Elektrisches Umschalten von Magnetspulen im Stator eines Motors, sodass beim Drehen des Rotors ständig Kräfte entstehen, die ein Drehmoment aufrecht erhalten. Die Lage der Rotormagnetpole wird durch einen internen Sensor (Hall-IC) festgestellt, der die Umschaltung über Transistoren steuert.



Kugellager	Zur Aufnahme sowie radialen und axialen Lagefixierung der (drehenden) Welle. Mit großem Betriebstemperaturbereich und hoher Zuverlässigkeit.
L10	Lebensdauererwartung, gemittelt über eine große Stückzahl. Nach n Stunden dürfen 10% der Bauteile ausgefallen sein (90% überleben). Bei <b>SEPA</b> ® Lüftern ist der Ausfall mit dem Über- bzw. Unterschreiten des Toleranzbereichs definiert. Neben L10 kann auch L1, L2 oder L5 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 → L10 und (oder) → MTBF angegeben.
Lüfterkennlinie	Stellt den Volumenstrom eines Lüfters in Abhängigkeit von der Druckerhöhung dar.
MagFix	Gleitlagersystem mit axialer, magnetischer Positionierung der Welle im Lager. Vorteil: lageunabhängiger Einbau des Lüfters möglich.
Montagedämpfung	Montagehilfen aus Gummi, deren Eigenschaften Schock- und Vibrationsbelastung auf ungefährliche Werte für den Lüfter dämpft. Außerdem wird durch diese Montagehilfen der vom Lüfter erzeugte Körperschall um bis zu 10 dB(A) gedämpft.
Moore'sches Gesetz (Moore's Law)	Moore's Gesetz ist kein wissenschaftliches Naturgesetz, sondern eine Faustregel, die auf empirische Beobachtungen 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.
Nennndrehzahl	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	Abkürzung für Polybutylenterephthalat (auch PBTP genannt). Aufgrund des hohen Glasfaseranteils von 30% wird PBT für Gehäuse und Propeller von Lüftern eingesetzt. PBT besitzt hervorragende Eigenschaften für präzise Spritzgussteile und ist beständig gegen Schmierstoffe, schwache Säuren und Alkohole. Außerdem erfüllt es die UL Brandschutzklasse V0.
PCB	Abkürzung für Printed Circuit Board, Leiterplatte mit geätzten Leiterbahnen, ein- oder mehrlagig. Das isolierende Trägermaterial ist in verschiedenen Qualitätsstufen und Preisklassen zu finden.
PPM	Abkürzung für Parts per Million. Anzahl von Teilen aus einer Stichprobe aus einer Million Teilen.
PWM	Abkürzung für Pulsweitenmodulation. Bei Lüftern mit PWM-Eingang erhalten die Spulen die gepulste Betriebsspannung, während die übrige Elektronik ständig mit Nennspannung versorgt wird.

RoHs	Abkürzung für Restriction of Hazardous Substances. Die aktuelle EU-Richtlinie schränkt die Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe (z.B. Blei) stark ein oder verbietet sie.
Rotor	Drehender Teil eines Motors. Beim Lüfter meist auch das das Teil, das die Permanentmagnete, den Rückschluss und die Schaufeln zur Luftbewegung enthält.
RPM	Englisch für Rotation Per Minute, Umdrehungen pro Minute (U/min)
Schallmessraum	Besonders gut gegen von außen einwirkende Fremdgeräusche isolierter Messraum zur Geräuschmessung (von Lüftern). Das Grundgeräusch bei sehr 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 $196 \text{ m/s}^2$ (ca. 20 G) getestet, wobei der Prüfling keinen Schaden nehmen darf. Automotive Lüfter haben eine Schockfestigkeit bis zu $490,5 \text{ m/s}^2$ (50 G).
Sensordlüfter	Lüfter, bei dem ein integrierter NTC (Sensor) die Temperatur der angesaugten Luft misst. Hauptapplikation: Kfz-Klimaanlagen.
Spurlager	Ein Gleitlager, das eine in Spurlagerichtung vorgespannte Motorwelle axial fixiert. Das Spurlager ist bei den meisten Gleitlagerlüftern zusammen mit einer magnetischen Vorspannung wirksam. Die Berührung der Wellenkuppe mit einem ebenen Lagerteil ist nahezu punktförmig. Siehe auch → MagFix.

Stator	Feststehender Teil des Motors. Enthält beim Lüfter die magnetischen Spulen mit dem Statorblechpaket und das Lagersystem. Der äußere Teil des Stators bildet den Rahmen bzw. 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 Tachofrequenzen werden durch spezielle Tachokonstruktionen erreicht.
Temperatursteuerung	Im Lüfter eingebaute oder externe Schaltung zum Steuern der Lüfterdrehzahl in Abhängigkeit von der Temperatur an einer definierten Messstelle.
Thermal Management	Betrachtung der elektrischen und mechanischen Auswirkungen, denen das Bauteil bei thermischer Belastung ausgesetzt sein kann.
Thermal Vias	Durchkontaktierungen, die eine vertikal elektrisch und thermisch leitfähige Verbindung zwischen den Leiterbahnebenen einer Leiterplatte herstellen. Die Verbindung wird meist durch eine innen metallisierte Bohrung im Trägermaterial der Leiterplatte realisiert. Der thermische Widerstand des isolierenden Trägermaterials einer Leiterplatte kann mit einer entsprechend großen Zahl an solchen Durchkontaktierungen auf engem Raum deutlich gesenkt werden. Dadurch kann beispielsweise die Entwärmung eines auf einer Seite angebrachten Bauteils durch die Leiterplatte zu einem auf der gegenüberliegenden Seite angebrachten Kühlkörpers erfolgen.
Turbulenz	An den Flügelenden und an scharfkantigen Gebilden entsteht eine ungeordnete (chaotische) Luftströmung, die den geordneten Luftstrom behindert. Turbulenzen verschlechtern die Förderleistung eines Lüfters und erhöhen das Geräusch. Luftkanäle mit sanften Abrundungen verbessern die Turbulenzen.
Unwucht	Abweichung der Schwerpunktschwerachse zur Rotationsachse. Unwucht führt zu Radialbelastung von Lagern und damit zu erhöhtem Verschleiß und zu Geräuschentwicklung. Optimierung erfolgt durch Auswuchten.

Ventilator Kennlinie	Stellt den Volumenstrom eines Lüfters in Abhängigkeit der Druckerhöhung dar.
Verpolungsschutz	Elektrische Schutzeinrichtung (Diode) eines Lüfters gegen Falschpolung, die die Elektronik zerstören würde.
Vibration	Permanente Stöße mit gleich bleibender oder variabler Frequenz. Die Vibrationssicherheit wird mit Beschleunigung von z.B. $14,7 \text{ m/s}^2$ (1,5 G) unterschiedlicher Frequenz und Richtung geprüft. Meist wird in drei Richtungen getestet und dabei wird die Frequenz drei Mal im Bereich 10-500-10 Hz geändert.
Viskosität	Messgröße, welche die Zähigkeit (Reibungswiderstand $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$ ) eines Schmierstoffes angibt. Die Viskosität bei Schmierstoffen nimmt mit steigender Temperatur ab (dünnflüssiger).
Volumenstrom	Fördermenge eines Lüfters von Luft normaler Dichte und Temperatur in Volumen/Zeiteinheit. Angaben meist in $\text{m}^3/\text{h}$ , $\text{l}/\text{min}$ oder CFM.

## 12 Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: **SEPA**® Lüfter und Kühler

Abb. 2: Verlauf von Verlustleistung und Temperatur bei verschiedenen Betriebsarten

Abb. 3: Überschlägige Ermittlung des Volumenstroms bei gegebener Verlustleistung

Abb. 4: Forcierter Luftstrom verbessert den Wärmewiderstand

Abb. 5: Vergleich aktiver und passiver Kühlkörper

Abb. 6: Runder Lüfter mit Kühlkörper

Abb. 7: Wärmeübergang Junction-Umgebung

Abb. 8: Bauformen von Axiallüftern

Abb. 9: Lüfterflügel im Vergleich

Abb.10: EC Lüfter

Abb.11: Bauformen von Radiallüftern

Abb.12: Rahmenloser Lüfter

Abb.13: Flachlüfter

Abb.14: Kühligel

Abb.15: Staubschutzgitter mit EMV Abschirmung

Abb.16: Wärmeleitmaterialien

Abb.17: Ventilator Kennlinie, Gerätekennlinie, Arbeitspunkt

Abb.18: Tachosignal Open Kollektor Ausgang

Abb.19: Alarmsignal bei Blockierung

Abb.20: Temperaturgesteuerter Lüfter

Abb.21: A-Bewertungskurve

Abb.22: Geräuschspektrum verschiedener Lüfter

Abb.23: Lüftermanschette

Abb.24: Dämpfende Montagen

Abb.25: Saugende oder blasende Anordnung von Lüftern

Abb.26: Schutzgitter und -filter

Abb.27: Badewannenkurve

Abb.28: Temperatureinfluss von MTBF verschiedener Bauteile

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

Abb.30: Schmiermittelkeil beim Sinterlager

Abb.31: Vergleich der Sinterlagersysteme

Abb.32: MagFix Lagersystem

Abb.33: Aufbau eines Rillenkugellagers ZZ

Abb.34: Lagersystem mit Kugellager in einem modernen Lüfter von **SEPA**®

Abb.35: Verschiedene Lagersysteme

## 13 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 Wälzlagerertechnik

L. Noelle, Fischer Elektronik: Kühlkörper

Ruch-Novaplast: Novaplex™-Workshop Handbuch

Schunk Sintermetalltechnik: Sinterlager und Formteile

Heinrich Cap

# **WÄRMEMANAGEMENT**

## bei elektronischen Bauelementen

Zweite, überarbeitete Auflage

**Lüfter werden heute in vielen Applikationen nicht nur zur Kühlung, sondern in vielfältigen Aufgaben eingesetzt. Durch die ungebrochen stürmische Entwicklung in allen Bereichen der Technik war es sinnvoll, dieses Handbuch neu aufzulegen und wichtige Ergänzungen einfließen zu lassen.**



### **DER AUTOR**

Ing. (grad) Heinrich Cap, Jahrgang 1941, studierte Elektrotechnik 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 1989 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.

**SEPA® EUROPE GmbH ist der europäische Repräsentant für SEPA®-Lüfter und Inhaber des Markenzeichens SEPA®.**

ISBN 978-3-88778-549-9



9 783887 785499

[www.spurbuch.de](http://www.spurbuch.de)