

Vorwort

Elektrische Antriebe sind aus unserer heutigen Welt nicht mehr wegzudenken. Sie dringen unaufhörlich in immer mehr Lebensbereiche vor. Gleichzeitig wachsen unsere Ansprüche an die Geräuschqualität von Antrieben. Somit wird eine umfassende Geräuschkompetenz für Hersteller von Antrieben und Geräten immer wichtiger, ja sie wird sogar zu einem Wettbewerbs- und Erfolgsfaktor.

Leider ist man aber oftmals weit entfernt von einer kompetenten Lösung eines Geräuschproblems. Selbst eine qualifizierte Problembeschreibung bereitet oft schon große Schwierigkeiten oder erfolgt häufig gar nicht – stattdessen eine unspezifische Aussage wie „Wir haben ein Geräuschproblem!“. Viele Ingenieure und Techniker, die keine Akustikexperten sind, erhalten dann die Aufgabe das besagte Geräuschproblem zu lösen. Dieses Buch soll ihnen dazu eine Hilfestellung für eine effiziente und Ziel führende Vorgehensweise bei der Beseitigung schwingungstechnischer und akustischer Ärgernisse bei elektrischen Kleinantrieben bieten. Es ist aus der industriellen Praxis heraus entstanden und stellt bewusst kein Lehrbuch, sondern eher ein Praxishandbuch dar.

Bislang gibt es noch keine Literatur, die sich mit der Herangehensweise, der Analyse und der Beseitigung von Schwingungen und Geräuschen bei Kleinantrieben auseinandersetzt. Dieses Buch hat deshalb zum Ziel, Anwendern und Herstellern von elektrischen Kleinantrieben das notwendige Grundverständnis für das Thema Geräusch zu vermitteln. Die ersten Kapitel führen zunächst in das Schwingungs- und Geräuschverhalten elektrischer Kleinantriebe ein, wobei wesentliche Grundbegriffe und deren Zusammenhänge angeführt werden. Danach werden verschiedene Möglichkeiten zur Geräuschreduktion vorgestellt. Anschließend wird das notwendige Grundwissen über mechanische Schwingungen und zur Akustik vermittelt. Die weiteren Kapitel beschäftigen sich ausführlich mit der Messung von Schwingungen und Ge-

räuschen, mit der Analyse dieser Messungen sowie mit der Problematik einer serienmäßigen Geräuschprüfung. Dabei werden die gängigen Methoden anschaulich mit ihren Vor- und Nachteilen dargestellt. Den Abschluss bildet eine Reihe von Beispielen aus der industriellen Unternehmenspraxis.

Inhalt

Vorwort	7
1 Einführung zum Thema	13
1.1 Elementares zu Schwingungen, Körperschall und Luftschall	14
1.2 Wirkungswege	18
2 Schwingungs- und Geräuschursachen von Kleinstantrieben	21
2.1 Elektromagnetisch bedingte Schwingungen	22
2.1.1 Einfluss elektronischer Kommutierung	24
2.1.2 Besonderheiten bei Schrittantrieben	24
2.2 Mechanisch bedingte Schwingungsursachen in Kleinstantrieben	25
2.2.1 Schwingungen in Lagern	25
2.2.2 Schwingungen an Schleifkontakten	27
2.2.3 Schwingungen infolge Unwucht	29
2.2.4 Schwingungen bei Zahnradübertragungen	29
2.2.5 Spiel und Lose	30
3 Möglichkeiten zur Geräuschreduktion und zur Geräuschoptimierung	31
3.1 Dämmung und Dämpfung	31
3.2 Reduktion der Schallabstrahlung	32
3.3 Reduktion der Schall- und Schwingungsübertragung	33
3.4 Reduktion der Schall- und Schwingungsanregung	36

3.5	Optimierung: gezielte Beeinflussung von Schall- und Schwingungsanregungen	38
4	Mechanische Schwingungen	40
4.1	Grundsätzliches über Schwingungen	40
4.2	Eingliedriges lineares Schwingungssystem	41
4.3	Mehrgliedriges lineares Schwingungssystem	45
4.4	Mehrgliedriges Torsionsschwingungssystem	47
4.5	Schwingungen in Systemen mit verteilten Massen und Elastizitäten	49
4.6	Räumliche Verteilung von Schwingungen: Schwingungsmoden	50
4.7	Mathematisch-physikalische Betrachtung der Entkopplung von Antrieben	52
5	Grundlagen der Akustik	58
5.1	Fortleitung von Schall	58
5.2	Tastsinn und Gehör: das menschliche Hören	66
5.3	Bewertung von Hörereignissen: subjektive Kenngrößen zur Berücksichtigung des Hörempfindens	72
	5.3.1 <i>Bewertungskurven</i>	72
	5.3.2 <i>Psychoakustische Größen</i>	75
5.4	Subjektive Geräuschwahrnehmung und Geräuschbewertung	78
	5.4.1 <i>Beeinflussung der Geräuschwahrnehmung durch Individualfaktoren</i>	78
	5.4.2 <i>Externe Einflüsse und Umgebungspegel</i>	80
	5.4.3 <i>Erwartungen</i>	80
	5.4.4 <i>Sonstiges</i>	81
	5.4.5 <i>Durchführung typischer Hörversuch</i>	81
6	Messung von Geräuschen und Schwingungen	85
6.1	Luftschallmesstechnik	85
	6.1.1 <i>Mikrofone</i>	85
	6.1.2 <i>Kunstkopf</i>	88

6.1.3	Mikrofonarrays	89
6.1.4	Methodik bei der Messung von Luftschall mit Mikrofonen	90
6.2	Körperschallmesstechnik	91
6.2.1	Beschleunigungsaufnehmer	92
6.2.2	Laservibrometer	94
6.2.3	Wegsensoren	95
6.2.4	Kraftsensoren	95
6.2.5	Methodik bei der Messung von Körperschall	96
6.3	Reproduzierbares Messen	98
6.3.1	Absolutwertmessung	99
6.3.2	Vergleichende Messung	100
6.4	Messräume	102
6.4.1	Reflexionsarmer Raum	102
6.4.2	Hallraum	102
6.4.3	Sonstige Messräume und Kabinen	103
6.4.4	Produktionsumgebung	104
7	Analyse von Geräuschen und Schwingungen	106
7.1	Ziel und Zweck	106
7.2	Grundlagen der Signalanalyse	107
7.2.1	Signalverarbeitung	107
7.2.2	Filter	109
7.2.3	Fensterung	109
7.3	Grundsätzliche Methoden der Signalanalyse	110
7.3.1	Fast-Fourier-Transformation	110
7.3.2	Fast-Fourier-Transformation vs. Short-Time- Fourier-Transformation	111
7.3.3	Oktav-/Terzanalyse	112
7.3.4	Ordnungsanalyse	113
7.3.5	Wavelet-Transformation	115
7.3.6	Hüllkurvenanalyse	116
7.4	Methoden zur Geräusch- und Schwingungsanalyse	118
7.4.1	Untersuchung des stationären Betriebspunkts	118
7.4.2	Hochlaufanalyse	119

7.4.3	Eigenfrequenzanalyse	122
7.4.4	Analyse der Übertragungswege (Transferpfadanalyse)	123
7.4.5	Betriebsschwingformanalyse	123
7.4.6	Analyseverfahren im Überblick	125
8	Prüfung von Schwingungen und Geräuschen	128
8.1	Allgemeines zur Prüfung von Schwingungen und Geräuschen	128
8.2	Geräuschprüfung in der Serie	129
8.2.1	Subjektive Prüfung	131
8.2.2	Objektive Prüfung	132
8.2.3	Objektiv unterstützte subjektive Prüfung	133
8.3	Fähigkeit von Geräuschprüfungen	134
8.3.1	Reproduzierbarkeit	134
8.3.2	Kalibrierbarkeit	136
8.3.3	Beispiel eines Fähigkeitsnachweises	136
8.4	Grenzmuster und Prüfnormale für Geräuschprüfungen	139
8.5	Prüfvorschrift für eine Geräuschprüfung	141
8.6	Auswahl von Prüfmerkmalen	141
8.7	Neuronale Netze	146
8.8	Realisierung von Geräuschprüfständen	146
9	Umsetzungsbeispiele	149
9.1	Analyse einer Antriebseinheit	149
9.2	Unwuchtbeurteilung	153
9.3	Getriebeprüfung durch Prüfung des zeitlichen Verlaufs der Abtriebsdrehzahl	157
9.4	Geräuschprüfstand zur Prüfung des Getriebegeräuschs in der Großserienfertigung	158
10	Literatur	162
11	Abbildungsverzeichnis	164
12	Stichwortverzeichnis	167

1 Einführung zum Thema

Bei der Beurteilung von Antrieben aller Art und Größe stehen die Qualität der gewünschten Funktion, die Lebensdauer sowie die Anschaffungs- und Betriebskosten an erster Stelle. Nebeneffekte wie Erwärmung, Schwingungen und Geräusche sind in der Regel unerwünscht, spielen aber bei der Entscheidung für einen Antrieb eine ganz wesentliche Rolle.

Kleinantriebe sind meist eng in Geräte eingebaut, sodass ihre Erwärmung auch bei geringen Verlustwärmeleistungen besonders stören kann, denn die Geräte selbst bieten oft nur geringe Wärmeabfuhrmöglichkeiten. Da sie sich in der Regel auch in der Nähe von Menschen, deren Ohren und deren Tastsinn befinden, gesteht man ihnen deutlich weniger Geräusch- und Vibrationsanteile zu als größeren Antrieben.

Für große Elektromaschinen und Antriebe gibt es Vorschriften, nach denen deren Geräusche und Schwingungen gemessen und beurteilt werden sollen. Ein Kleinantrieb für sich genommen ist wegen seiner geringen Abmessungen kaum hörbar, auch seine Schwingungen werden in der Regel als nicht störend beurteilt. Er wirkt damit erst über das Gerät, in oder an das er gebaut ist, und wird zunächst meist nur in dieser Einbausituation subjektiv beurteilt. Diese subjektive Beurteilung des Geräusch- und Schwingungsverhaltens des Antriebs im Gerät muss messtechnisch quantifiziert werden. Daraus müssen Vorgaben hinsichtlich der Schwingungs- und Geräuschgrenzen für den Antrieb für sich allein abgeleitet und vereinbart werden, die bei seiner Herstellung einzuhalten sind. Die Beschreibung und die Ableitung solcher Grenzen können im Einzelfall sehr komplex werden; Prüfungsstandards wie bei großen Antrieben sind deshalb für Kleinantriebe nicht sinnvoll.

Der Hersteller von Kleinantrieben wird sich alleine schon im Interesse seines Markterfolgs darum bemühen, Ursachen von störenden Schwingungen und Geräuschen in seinem Produkt zu finden und möglichst zu beseitigen. Letztlich ist der Antrieb ja die Störquelle und das Gerät „nur der Lautspre-

cher“. In Zusammenarbeit mit dem Abnehmer seiner Antriebe muss er aber auch zu klären versuchen, wie man ein zu erwartendes bzw. bestehendes Schwingungs- oder Geräuschproblem optimal mit Blick auf das Gesamtsystem löst, in dem der Antrieb wirkt. Die Beseitigung einer störenden Schwingung oder eines Geräuschs kann auf dem Wirkungsweg vom eigentlichen Antrieb hin zum Gehör oder Tastsinn oft einfacher und auch kostengünstiger sein als die Beseitigung an der Quelle selbst. Nicht selten wird aus der Schwingungsanregung im Antrieb entlang seines Wirkungswegs aus „einer Mücke ein Elefant“, wenn gewisse Spielregeln nicht beachtet werden. Das erfordert die Analyse und Einbeziehung dieses Wirkungswegs.

Im Folgenden werden zuerst einige wichtige Begriffe im Zusammenhang mit Geräuschen und Schwingungen von Kleinantrieben erklärt. Im Anschluss werden die Wirkungswege grundsätzlich beschrieben. Danach folgen die Ursachen von Geräuschen und Schwingungen von Kleinantrieben, dazu deren Eigentümlichkeiten sowie die technischen Möglichkeiten zur Minderung.

Jedem Messen sollte die gedankliche Betrachtung des Schwingungsverhaltens des mit einem Antrieb versehenen Geräts vorangehen. Daraus abgeleitete gezielte messtechnische Untersuchungen sollten sich zur Stützung oder Falsifikation des Denkmodells anschließen; sie stehen schon aus Gründen der Effizienz hinter dem Denken. Nur aus gezielten Messungen ergeben sich klare Konsequenzen. Deshalb folgt die ausführliche Beschreibung der Schall- und Schwingungsmesstechnik verbunden mit den geeigneten Methoden erst anschließend, um von subjektiven Beurteilungen zu messtechnisch objektiven Beschreibungen mit Grenzwerten zu gelangen, die bei der Entwicklung, Herstellung, Applikation und Qualitätsprüfung von Antrieben zu beachten sind.

1.1 Elementares zu Schwingungen, Körperschall und Luftschall

Schwingungen sind periodische Zustandsänderungen. Eine Schwingung beschreibt man durch ihre Periodendauer oder *Frequenz* und den zeitlichen Höchstwert des Zustands (**Amplitude**). Es gibt viele Arten von Schwingungen, von denen im Folgenden nur die mit räumlich periodischen Bewegungs-

zuständen betrachtet werden (**mechanische Schwingungen**). Solche Bewegungen können von periodisch wechselnden Kräften erzeugt werden, etwa im Kurbeltrieb (**Zwangsangeregung**); sie können aber auch aufgrund eines selbsttätigen Austauschs von Energie zwischen verschiedenartigen Energiespeichern, etwa Elastizitäten (Speicher für Verformungsenergie) und trägen Massen (Speicher für kinetische Energie), von selbst entstehen, wenn diese Speicher irgendwie mit Energie geladen werden (z. B. Schaukel, Glocke, Saite, Pfeife). Eine solche über die Energiespeicher gesteuerte Schwingung nennt man **Eigenschwingung**. Ihre Frequenz (**Eigenfrequenz**) ist oft nur durch die Eigenschaften der Energiespeicher festgelegt, nicht durch die darin gespeicherte Energie. Wegen der infolge unvermeidlicher **Dämpfung** (z. B. Energieverbrauch bei Formänderung in Stoffen) „verloren“ gehender Energie lässt sich eine Eigenschwingung ohne fortgesetzte passende Energiezufuhr nicht aufrechterhalten. Neben einer geeigneten Energiezufuhr durch passende Zwangsangeregung kann auch ein zeitlich konstantes Leistungsangebot mittels der Eigenschaften eines Schwingungssystems zu selbstgesteuerten, also selbsterregten Eigenschwingungen führen (z. B. Reibschwingungen, Pfeifen usw.).

Zu jeder Eigenschwingung gehört außer ihrem zeitlichen Ablauf stets eine bestimmte örtliche Verteilung der Schwingungsausschläge (**Eigenform**), deren Ausbildung nur dann möglich ist, wenn am schwingungsfähigen System keine störenden Kräfte über Befestigungen wirken können. Eine Eigenform kann zu gleicher Zeit überall gleiche Bewegungsausschläge aufweisen; dann hat sie den Modus (**Mode**) $r = 0$. Dies entspricht beispielsweise einer Rüttelbewegung eines ideal starren Körpers.

Ist eine Eigenform dadurch gekennzeichnet, dass zum gleichen Zeitpunkt an zwei Stellen größte, aber gegensinnige Schwingungsausschlags-Amplituden auftreten (**Schwingungsbauch**) und an zwei dazwischenliegenden Stellen Bewegungsruhe herrscht (**Schwingungsknoten**), dann hat sie den Modus $r = 1$. Wie sich Behinderungen durch die Befestigung auswirken, sei am Beispiel der Biegeschwingung des Rotors eines Motors angedeutet: an den Lagerstellen sind radiale Schwingbewegungen zumindest behindert. Dennoch kann er radial schwingen, wobei an zwei gegenüberliegenden Stellen des Rotorumfangs die Radialbewegung entgegengesetzt maximal, um 90° dagegen versetzt gleich Null ist. In Umfangsrichtung beurteilt ist das der Mo-

das $r = 1$, in axialer Richtung gesehen aber zunächst nicht, weil man nur einen Schwingungsbauch zwischen den Lagern erkennt. Die Lager behindern die freie Ausbildung von $r = 1$, und deshalb treten radiale Wechselkräfte (Rüttelkräfte) in den Lagern auf. Ohne Behinderung durch die Lager würde der Rotor an seinen Enden gegensinnig zu seiner Mitte schwingen und es würden sich dazwischen zwei Knoten ausbilden. Bringt man die Lager an den Knotenstellen an und lässt die äußeren Wellenenden frei schwingen, so ist die freie Rotor-Biegeschwingung nicht gestört. Genau gesehen stellt sich aber auch mit behindernden Lagern $r = 1$ ein; denn die Lagerung mit ihrer Elastizität und Masse braucht dazu nur in das Schwingungssystem mit einbezogen zu werden. Die zugehörige Biege-Eigenfrequenz ist natürlich verschieden von der des nicht gelagerten Rotors.

Die Oval-Verformung eines rohrförmigen Blechpakets ist durch den Modus $r = 2$ gekennzeichnet (zwei Vollwellen entlang dem Umfang, vier Bäuche, vier Knoten usw.). Bäuche und Knoten können sich zeitabhängig örtlich verschieben, das Verformungsbild, also der Modus, bleibt dabei erhalten (siehe auch Kapitel 4.6, S. 50 f.).

Eine Anordnung mit mehr als zwei Speichermöglichkeiten für verschiedene Energieformen (z. B. potenzielle und kinetische Energie) ist zu mehreren Eigenschwingungen mit zugehörigen verschiedenen Eigenfrequenzen und den jeweiligen Eigenformen fähig, also mit mehreren Schwingungsbäuchen und -knoten, die sich im Zeitverlauf und in der räumlichen Verteilung überlagern.

In der Technik treffen Zwangsanregung und Eigenschwingungsfähigkeit meist zusammen. Wirkt eine Zwangsanregung auf ein eigenschwingungsfähiges System, so schwingt dieses auf Dauer im Takt der Zwangsanregung, vorübergehend aber auch mit seinen Eigenfrequenzen, sofern die Zwangsanregung nicht genau am Schwingungsknoten der zugehörigen Eigenform angreift. Sind Zwangsanregungsfrequenz und Eigenfrequenz gleich, so spricht man von **Resonanz**, bei der die zugehörigen Eigenformbewegungen sehr groß werden können, wenn die Dämpfung klein ist. Ist die Eigenfrequenz kleiner als die Anregungsfrequenz, so liegt **Tiefabstimmung** vor, im umgekehrten Fall spricht man von **Hochabstimmung**. Weil technische Anordnungen im Allgemeinen mehrere Eigenfrequenzen (und Eigenformen) aufweisen und auch die Zwangsanregung mehrere Frequenzen enthalten

kann, kommen oft sowohl Tief- als auch Hochabstimmung vor. Die Abstimmung kann bei der Wirkung von Zwangsanregungen eine wesentliche Rolle spielen.

Eine große Rolle spielt auch der Angriffspunkt der Zwangsanregung oder ihre räumliche Verteilung! Greift sie punktförmig nur am Schwingungsknoten einer Eigenform an, dann tritt (zumindest theoretisch) auch bei Gleichheit der zu dieser Eigenform gehörigen Eigenfrequenz und der Zwangsanregungsfrequenz keine Resonanz auf. Ganz allgemein gilt: **Für das Auftreten von Resonanz ist Gleichheit sowohl der Frequenzen als auch der Moden von Eigenform und Zwangsanregungsverteilung erforderlich.** Bei außerhalb des Eigenformknotens angreifender punktueller Zwangserregung ist zu bedenken, dass eine solche Punktanregung sich aus Anregungsanteilen mit theoretisch unendlich vielen Moden zusammensetzt, sodass sich mit irgendeinem dieser Anteile eine Resonanz ergeben kann.

Schwingungen von und in festen und flüssigen Stoffen nennt man **Körperschall**, in Flüssigkeiten auch **Fluidschall**. Der Mensch erfasst solchen Körperschall mit seinem Tastsinn. Schwingungen von und in Gasen (Luft) bezeichnet man als **Luftschall**. Er wird vom Gehör wahrgenommen, bei sehr niedriger Frequenz und großen Amplituden auch mit dem Tastsinn.

Während Körperschall mittels der Elastizität von festen Stoffen weitergeleitet wird, wird Luftschall bzw. Fluidschall durch die Kompressibilität von Gasen bzw. Flüssigkeiten übertragen; die Verluste bei Formänderung von Körpern (Werkstoffdämpfung) und Luftreibung schwächen die Weiterleitung entlang dem Fortleitungsweg.

Das Gehör hat einen großen Wahrnehmungsbereich über etwa sechs Zehnerpotenzen der Amplitude der Schwingung zwischen der (unteren) **Wahrnehmungsschwelle (Hörschwelle)** und der **Schmerzgrenze** und über einen großen Frequenzbereich mit stark frequenzabhängiger Empfindlichkeit. Hinzu kommen eigenartige, auch individuelle Bewertungen von Frequenzgemischen (**Spektrum**) und zeitlichen Veränderungen von Geräuschen, weiterhin der **Stereo-Effekt** der zwei Ohren sowie sich überlagernde individuelle psychische Effekte. Die Wirkung von Luftschall auf den Menschen lässt sich deshalb messtechnisch nur unvollständig abbilden (siehe auch Kapitel 5, S. 72).

1.2 Wirkungswege

Der **Wirkungsweg** ist die Übertragungstrecke vom Schwingungserzeuger zum Gehör oder zum Tastsinn. Er geht von der Schwingungsquelle als Körperschall bis zur Oberfläche der Quelle (hier der Antrieb), von dort als Körperschall über die Befestigung in das angetriebene Gerät und weiter als Körperschall an dessen Gehäuseaußenfläche. Parallel dazu entsteht an der Oberfläche des Antriebs auch Luftschall, der im Gerät auf dessen Gehäuseinnenseite trifft und von dort als zusätzlicher Körperschall durch die Gehäusewand an die Außenfläche weitergeleitet wird. Hat das Gehäuse Öffnungen, so dringt der „innere“ Luftschall auch direkt nach außen und addiert sich zu dem Luftschall, der von der schwingenden Gehäuseoberfläche selbst nach außen und nach innen hin erzeugt wird. Der Tastsinn erfasst die Schwingungen der Gehäuseoberfläche und gegebenenfalls auch die von ihr an eine Auflage oder Befestigung weitergeleiteten Vibrationen. Der Luftschall gelangt an das Gehör.

Wie einflussreich dabei die Eigenschaften des Körperschallwegs (Verteilung von Massen und Elastizitäten) bis zur Luftschall erregenden Oberfläche sind, zeigt der Vergleich der Geräuschentwicklung eines Kleinantriebs im eingebauten (hellblaues Spektrum) und im nicht eingebauten (dunkelblaues Spektrum) Zustand (Abb. 1.1): Der nicht eingebaute Antrieb ist schon wegen seiner kleineren Oberfläche und deren Schwingungsverteilung fast immer deutlich leiser.

Der von ihm direkt abgegebene Luftschall ist deshalb gering und wird weitgehend akustisch kurzgeschlossen, weil seine Abmessungen klein sind im Vergleich zu den Wellenlängen der Schallschwingungen. Dass man ihn trotzdem oft noch hören kann, hat seine Ursache in dem schon erwähnten großen Empfindlichkeitsbereich des Gehörs. Man hört dann aber nur die hochfrequenten Geräuschanteile, denn diese schließen sich akustisch etwas weniger kurz als die tieffrequenten Geräuschanteile, für die das Gehör zudem eine geringere Empfindlichkeit aufweist. Das ist mit ein Grund dafür, dass sich die Geräuscheindrücke von einem nicht eingebauten und von einem eingebauten Antrieb meist deutlich unterscheiden. Ein anderer Grund ist der, dass die Befestigung des Antriebs im Gerät nur die an der Befestigungsstelle auftretenden Körperschallschwingungen weiterleitet. Die Befestigungsart spielt daher schwingungstechnisch und akustisch eine sehr große Rolle!

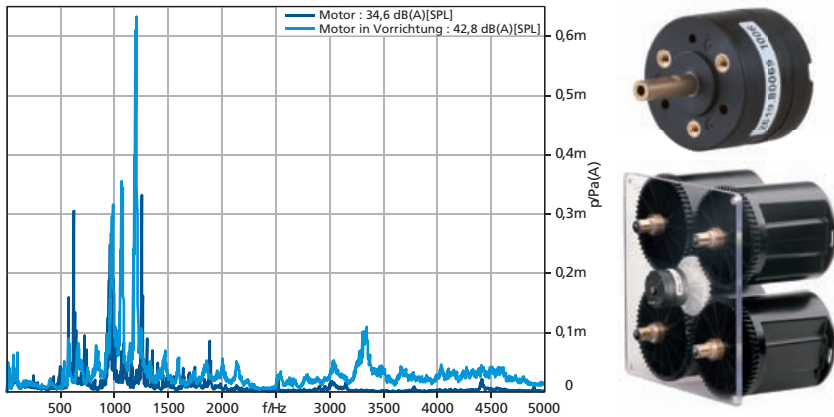


Abb. 1.1: Einfluss der Einbausituation auf das Geräuschabstrahlverhalten

Im Beispiel nach Abbildung 1.1 ist der Antrieb ohne jegliche Entkopplung direkt auf einer Plexiglasplatte befestigt. Als Befestigungsort wurde die Mitte der Plexiglasplatte gewählt, was denkbar schlecht ist. Hier befindet sich der Schwingungsbauch des ersten Eigenschwingungsmodus mit der zugehörigen niedrigsten Eigenfrequenz der Plexiglasplatte. Die Einspeisung einer Schwingung an dieser Stelle hat also maximale Wirkung und erzeugt die denkbar stärkste Geräuschabstrahlung – die ja gar nicht gewünscht ist.

Der Wirkungsweg zum Tastsinn hin beschränkt sich auf die Schwingungsübertragung über Körperschall zur berührten Oberfläche hin. Luftschall- und Körperschallweg wirken oft gemeinsam; ein alltägliches Beispiel ist der Elektrorasierer, dessen Antriebsvibrationen sowohl an der Wange als auch am Ohr wahrgenommen werden. Maßnahmen zur Minderung von störendem Luftschall (Geräusch, Lärm) sind in der Regel am wirksamsten, wenn sie an der Geräuschquelle und/oder am Körperschallweg angreifen, bei letzterem besonders im Befestigungsbereich des Antriebs.

Luftschall entsteht auch bei zeitlich veränderlichen Strömungsbedingungen in Ventilatoren, Sirenen usw., die zu lokalen Luftdruckschwankungen führen. Um ihn zu verringern, muss ein Ventilator so konstruiert werden, dass die Luftströmung vor allem vor, in und soweit möglich auch hinter ihm ho-

mogen und zeitlich konstant ist. Von schwingenden Oberflächen verursachter Luftschall lässt sich durch Verkleinern der Schwingungsauslässe an der Körperoberfläche, durch Verkleinern der Oberfläche und durch örtlich verschiedene Zeit-Phasen-Lage der Oberflächenschwingungen (Eigenformverteilung und damit akustischer Kurzschluss) mindern. Ein solcher Kurzschluss ist auch durch Öffnungen in Gehäusen möglich. Schwingende Lochbleche sind deshalb im Vergleich zu Vollblechen leise.

Bei der Konstruktion eines Lautsprechers geht man genau umgekehrt vor. Die im Magnetfeld schwingende Spule ist klein (Abb. 1.2) und kann deshalb selbst, ähnlich einem Kleinantrieb, nur wenig Luftschall erzeugen. Da aber möglichst viel Luftschall entstehen soll, wird die Spule möglichst steif an einer Lautsprechermembran befestigt. Damit diese an allen Stellen ihrer Oberfläche möglichst gleichphasig schwingt, wird sie leicht und in sich steif ausgeführt, ist deshalb nicht eben, sondern kegelig/konkav und nur am Außenrand weichelastisch befestigt. Zur Vermeidung von akustischem Kurzschluss zwischen Vorder- und Rückseite der Membran wird der Lautsprecher in eine größere Wand (Schallwand) oder in ein Gehäuse eingebaut.

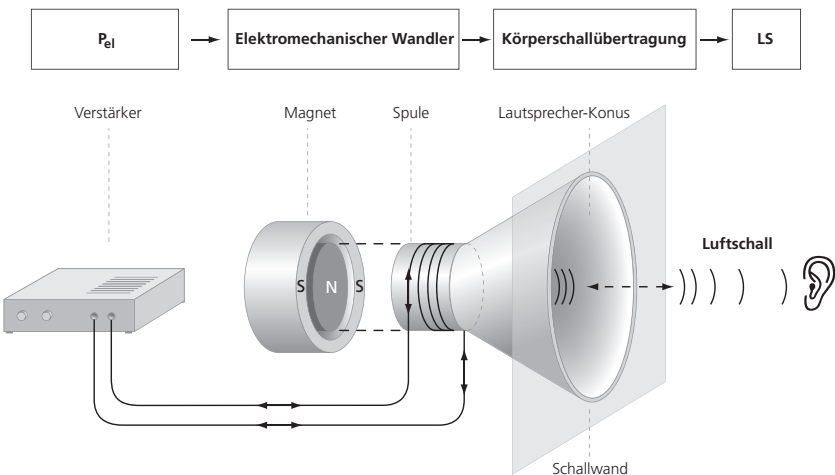


Abb. 1.2: Wirkungsweise bei der Geräusentstehung in einem Lautsprecher