

Beschallungstechnik in Mehrzweckgebäuden (II)

Volker Löwer*)

Im zweiten Teil des in Heft 3/88, S. 5, begonnenen Artikels soll auf den Bereich der Beschallungstechnik eingegangen werden, der elektroakustische Einrichtungen und Geräte benutzt. Für den Einsatz einer solchen Ela-Anlage gilt es Kriterien zu finden, nach denen diese Anlage dimensioniert werden kann (Abb. 10). Dazu muß geklärt werden, was die Anlage leisten soll. Hierbei sei vorausgesetzt, daß der Verwendungszweck des Raumes und die Arten der Veranstaltungen, für die der Raum benutzt wird, detailliert bekannt sind (siehe auch Teil I).

Einflüsse des Schallfeldes

Eine Ela-Anlage soll ja immer zur Verbesserung der Hörsamkeit eingesetzt werden, was, wie wir aus vielen Beispielen wissen, nicht immer gelingt. Wir betrachten zunächst noch einmal raumakustische Aspekte etwas genauer, die im ersten Teil schon angesprochen wurden, um die Begriffe Lautstärke und Verständlichkeit besser zu verstehen.

Für ein akustisches Ereignis (z. B. ein gesprochenes Wort) stellen wir uns vor, daß wir an einem Zuhörerplatz sitzen und die zeitliche Abfolge dessen, was akustisch auf uns zukommt, aufzeichnen (Abb. 11). Eine gewisse Zeit vergeht, bevor die direkten Schallwellen unser Ohr erreichen, da der Schall ca. 3 msec pro Meter Wegstrecke benötigt. Wenn die direkten Schallwellen unser Ohr passiert haben, vergehen noch einige 10 msec bis die ersten, frühen Reflexionen auf Umwegen unser Ohr erreichen. Solche Reflexionen können z. B. durch eine entsprechend gestaltete Decke im Bühnenbereich (s. 1. Teil) erzeugt werden. Der dritte Teil der

Schallwellen ist der Nachhall, der entsteht, wenn durch viele wiederholte Reflexionen die Schallwellen als diffuses Feld in allen möglichen Richtungen den Raum erfüllen [6].

Wie beeinflussen nun diese 3 Teile des Schallfeldes die Lautstärke und die Verständlichkeit?

Der direkte Schall, der immer zuerst unser Ohr erreicht, bestimmt die Richtung, aus der wir das Schallereignis wahrnehmen, und zum Teil auch den Lautstärkeindruck. Dies bedeutet, daß durch den Einsatz einer Ela-Anlage der Richtungseindruck verändert werden kann. Wir hören nämlich dann den Lautsprecher und nicht den Sprecher, wenn uns der Schall aus dem Lautsprecher früher erreicht als der Schall des Sprechers. Häufig sind im Raum verteilt einige Lautsprechersysteme angebracht, die den Raum „ausleuchten“ sollen. Werden solche Anordnungen ohne Signalverzögerungsgeräte betrieben, die die natürliche Laufzeit des Schalls durch

*) Dipl. Phys. Ing., Ingenieurbüro für Beschallungstechnik, 6094 Bischofsheim

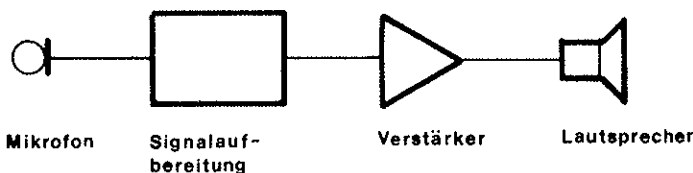


Abb. 10: Wesentliche Elemente einer Ela-Anlage, schematisch.

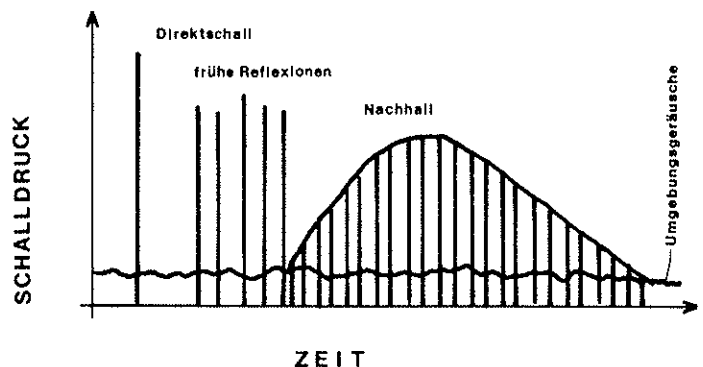


Abb. 11 (rechts): Typische zeitliche Abfolge der verschiedenen Schallfelder in einem nachhallenden Raum [6].

Verzögerung des Signals ersetzen, so wird ein falscher Richtungseindruck erweckt (in sehr schlimmen Fällen sogar von oben oder hinten), und die Zuhörer werden unnötigerweise auf eine vorhandene Lautsprecheranlage aufmerksam gemacht, was erfahrungsgemäß zu schlechten Kritiken führen kann. Andererseits kann die Kenntnis der Zusammenhänge ausgenutzt werden, um den natürlichen Richtungseindruck mit der Ela-Anlage zu unterstützen, z. B. indem die Lautsprecher über dem Sprecher angeordnet werden. Der direkte Schall nimmt außerdem, wie im Freifeld, mit jeder Abstandsverdopplung um 6 dB im Pegel ab (Abb. 12) [1, 5, 6].

Der zweite Teil des Schalls, die sogenannten frühen Reflexionen, tragen zum Lautstärkeindruck bei und bestimmen wesentlich, ob wir einen Raum als lebendig oder tot im akustischen Sinne beurteilen. Über die Pegel und die Ankunftszeiten dieser nützlichen Reflexionen wurde schon im ersten Teil berichtet.

Der dritte Teil wird vom Nachhallen des Raumes geliefert. Wie bereits erwähnt, ist es möglich, aus der Nachhallzeit und dem Volumen des Raumes auch den Hallradius zu bestimmen. Mit der Kenntnis dieser Größen läßt sich nun ermitteln, wie sich das Schallfeld im einzelnen aus Nachhall und direktem Schall zusammensetzt. Da das Verhältnis von direktem Schall zu Nachhall entscheidenden Einfluß auf die Sprachverständlichkeit in einem Raum hat, soll nun auf den Begriff Sprachverständlichkeit genauer eingegangen werden.

Gerade in Mehrzweckhallen sind viele Arten von Sprachübertragung notwendig (Ansprachen, Diskussionen, Durchsagen etc.), und oft wird das Argument ins Feld geführt, man brauche keine so aufwendige Technik, da man ja keine Oper hätte und nur Sprachübertragung machen wolle. Es ist zwar durchaus richtig, daß für qualitativ hochwertige Musikübertragungen ein enormer technischer Aufwand getrieben werden muß, wird jedoch bei einer Einrichtung, die der Sprachübertragung dienen soll, ein entscheidender Fehler in der Planung oder Ausführung gemacht, so leidet nicht der Kunstgenuß, sondern die übertragene Sprache ist nicht oder nur schlecht zu verstehen. Es gibt Gebäude mit und ohne Ela-Anlage, in denen zwar Musikdarbietungen ein Genuß sind, die sich aber für einen Redevortrag nicht eignen, denken wir z. B. an große Kirchenräume. Gerade bei variabler Nutzung sollte die Sprachverständlichkeit im Vordergrund stehen, da eine für hohe Sprachverständlichkeit dimensionierte Ela-Anlage durch entsprechende Auslegung des Übertragungsfrequenzganges und des Dynamikumfangs durchaus zu hochwertiger Musikübertragung eingesetzt werden kann.

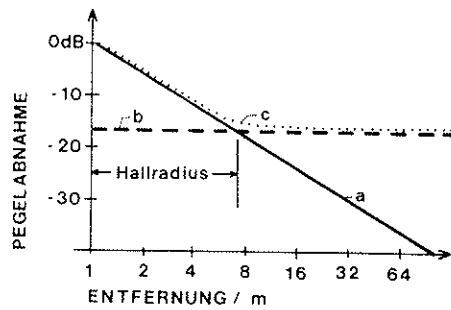


Abb. 12: Hallradius. — a) Schallpegelabnahme im freien Schallfeld; b) Nachhall im geschlossenen Raum; c) Resultierender Schallpegelverlauf von a) und b); Schallpegelabnahme in einem geschlossenen Raum in Abhängigkeit vom Abstand von der Schallquelle [5].

Die Sprachverständlichkeit

In der Geschichte der technischen Akustik wurden viele Anstrengungen unternommen, qualitative und quantitative Aussagen über Sprachverständlichkeit zu machen. Der kritische Teil der Sprachverständlichkeit, so wurde herausgefunden, liegt im sogenannten Artikulationsverlust der Konsonanten, der bei jeder Art von Übertragung auftritt. Die Konsonanten liegen hauptsächlich im Frequenzbereich von etwa 2 kHz. Wird z. B. bei der Übertragung des Wortes „Hund“ der wesentliche Konsonant „H“ undeutlich übertragen, so kann das Wort als Mund, Kund, Rund, Pfund o. ä. verstanden werden. Zahlreiche Untersuchungen führten zu den heute gebräuchlichen Begriffen STI für „Speech Transmission Index“ und % Alcons für „Articulation Loss of Consonants“. Es ist heute möglich, diese Werte mit Meßverfahren zu gewinnen, zu denen keine echten Redner und Zuhörer gebraucht werden, wie es früher der Fall war. Einige Richtwerte für STI und % Alcons [6]: Im allgemeinen wird ein STI-Wert von 0,45 = 15% Alcons als untere Grenze akzeptabler Sprachverständlichkeit angesehen. Die Faktoren, die die Sprachverständlichkeit beeinflussen, sind:

- das Verhältnis von Nutzpegel zu Störpegel (Sprache zu Umgebungsgereuschen, mindestens 25 dB)
- der Abstand von der Schallquelle (und damit das Verhältnis von Direktschall zu Nachhall)
- Reflexionen mit einem Wegunterschied von weniger als 30 cm (können auch durch mehrere Lautsprecher oder Mikrophone, die nahe beieinander aufgestellt sind, erzeugt werden)
- späte Reflexionen mit hohem Pegel (können sowohl raumakustische Ursachen haben als auch von weit voneinander aufgestellten Lautsprechersystemen herrühren).

Auslegung und Einsatz der Anlage

Für die Dimensionierung einer Ela-Anlage müssen also folgende Kenngrößen des Raumes mindestens bekannt sein:

- Die Nachhallzeit
- Der Hallradius
- Der Verlauf des Schalldruckes mit der Entfernung von der Quelle (Pegelabnahme)
- Störgeräuschpegel (Klima, Lüftung, Publikum ...)
- andere störende Einflüsse (wie Flatterecho, störende Reflexionen, raumakustische Anomalien).

Nach der Ermittlung dieser Größen kann über den Einsatz einer Ela-Anlage entschieden werden. Der Verlauf des Schalldruckes mit der Entfernung gibt an, in welcher Entfernung welche Lautstärke vorliegt und gestattet damit, die notwendige Anhebung des Lautstärkepegels durch eine Ela-Anlage zu bestimmen. Dadurch werden die Zuhörer bezüglich der Lautstärke gewissermaßen näher an die Quelle gebracht. Die alleinige Anhebung des Gesamtpegels, also Direktschall plus Nachhall, bringt die Zuhörer jedoch nur in bezug auf Lautstärke auf weiter vorn liegende Plätze. Der Anteil von Direktschall zu Nachhall verändert sich nämlich mit dem Abstand von der Quelle. Während der Direktschall mit jeder Entfernungsverdopplung um 6 dB absinkt, bleibt der Nachhall in einem nachhallenden Raum unabhängig von der Entfernung zur Schallquelle konstant (Abb. 12).

Da das Verhältnis von Direktschall zu Nachhall durch reine Lautstärkevergrößerung nicht beeinflusst werden kann, ist eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit nicht zu erwarten. Die Lautstärkevergrößerung hat den Effekt den Pegel des Nutzsinalns über den Störgeräuschpegel zu heben (Abb. 13). Alle angegebenen Zusammenhänge bzgl. der Sprachverständlichkeit gelten erst, wenn das Nutzsinal mindestens 25 dB über dem Störpegel liegt. Daraus kann jedoch der absolute Schalldruckpegel bestimmt werden, der durch die Ela-Anlage erreicht werden muß, um eine ausreichende Lautstärke des Nutzsinalns sicherzustellen.

Der Effekt, daß sich mit einer richtig konzipierten Ela-Anlage die Sprachverständlichkeit doch verbessern läßt, liegt im Bündelungsgrad, also in der Fähigkeit von Schallquellen, in eine Vorzugsrichtung abzustrahlen. Der Bündelungsgrad wird im folgenden auch mit Q bezeichnet [1, 3, 6].

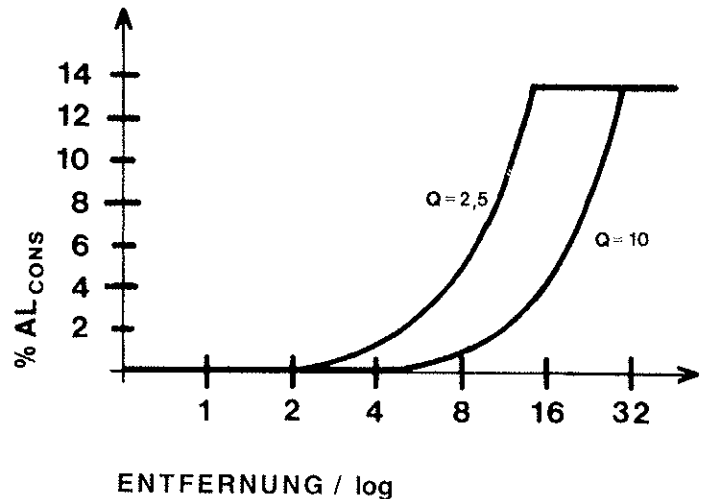
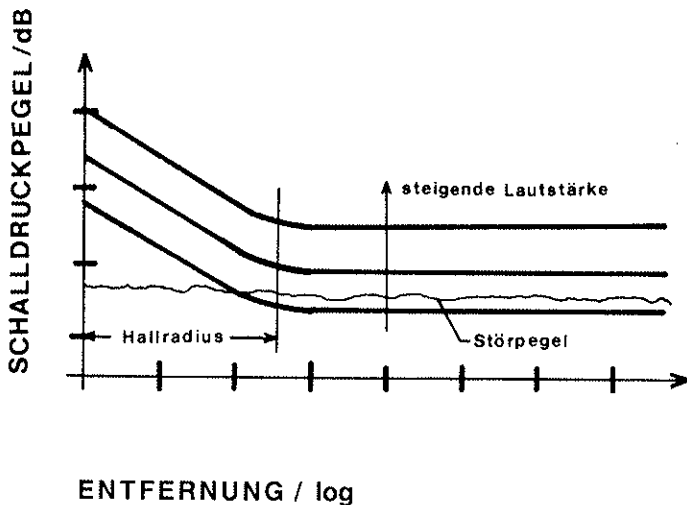


Abb. 13: Veränderung der Pegelverteilung in einem nachhallenden Raum mit steigender Lautstärke. — Abb. 14 (rechts): Gegenüberstellung des Konsonanten-Artikulationsverlustes von einem natürlichen Sprecher ($Q = 2,5$) und einem einfachen Lautsprechersystem ($Q = 10$) in Abhängigkeit von der Entfernung von der Quelle. (Raumparameter: $T_{60} = 1,5$ sec, Volumen = 2500m^3 ; $Q =$ Bündelungsgrad).

Der Bündelungsgrad

beschreibt die Verteilung des Schalldruckes im Raum, wobei die Schalldrücke auf der Hauptabstrahlachse einer Schallquelle zu denen in anderen Richtungen ins Verhältnis gesetzt werden. In der Lautsprechertechnik werden hauptsächlich 2 Techniken eingesetzt, um den Bündelungsgrad zu erhöhen: 1. die Anordnung von mehreren gleichen Lautsprechern übereinander zu einer Zeile, und 2. die Trichterlautsprecher oder Hörner. Die heute erhältlichen Hornsysteme sind in den meisten Fällen den Schallzeilen überlegen. Sie bieten im Gegensatz zu Zeilen nahezu konstante Abstrahlwinkel über große Frequenzbereiche bei hohem Bündelungsgrad.

Diese Technik wurde besonders in den USA sehr stark vorangetrieben, da dort Mehrzweckhallen mit einigen 10000 Plätzen und entsprechend großen Nach-

hallzeiten und Entfernungen keine Seltenheit sind. Die gebräuchlichen Abstrahlwinkel solcher Systeme sind typisch 90×40 , 60×40 und 40×20 Grad bei Bündelungsgraden von bis zu $Q = 50$ bei 40×20 Grad (s. a. Abb. 18).

Was bedeutet das jedoch für die Beschallung im konkreten Fall? Die Verwendung von Lautsprechersystemen mit kontrolliertem Abstrahlverhalten und hohem Bündelungsgrad gestatten uns, die Bereiche einer Halle mit Direktschall zu versorgen, in denen das Publikum sitzt. Andere Bereiche wie Decken, Wände usw. werden nicht so stark bestrahlt. Dadurch verändern wir das Verhältnis von Direktschall zu Nachhall, was zu größerer Verständlichkeit führt.

Dazu ein Beispiel: Ein Mensch hat einen Bündelungsgrad von etwa 2,5 bei 2 kHz. In einer typischen Mehrzweckhalle mit einem Volumen von 2500m^3 und einer

Nachhallzeit von $T_{60} = 1,5$ sec ergibt sich der Hallradius zu $r_4 = 2,3$ m. Durch seine Richtwirkung ($Q = 2,5$) tritt jedoch die Gleichheit von direktem Schallpegel und Nachhallpegel erst in etwa 3,7 m Entfernung auf. Verwenden wir ein Lautsprechersystem mit einem Bündelungsgrad von 10, so tritt Gleichheit von Direktschallpegel und Nachhallpegel erst nach etwa 7,4 m auf. Die Auswirkungen auf die Sprachverständlichkeit sind in Abb. 14 dargestellt. Die Entfernung, bei welcher diese beiden Pegel gleich sind, wird kritische Entfernung genannt und hängt direkt mit Hallradius und Bündelungsgrad zusammen. Die kritische Entfernung ist sozusagen der durch die Richtwirkung der Quelle vergrößerte Hallradius (Abb. 15). (Der Hallradius ist im allgemeinen als Raumkonstante für eine Quelle mit dem Bündelungsgrad $Q = 1$ definiert) [2, 3, 5, 6].

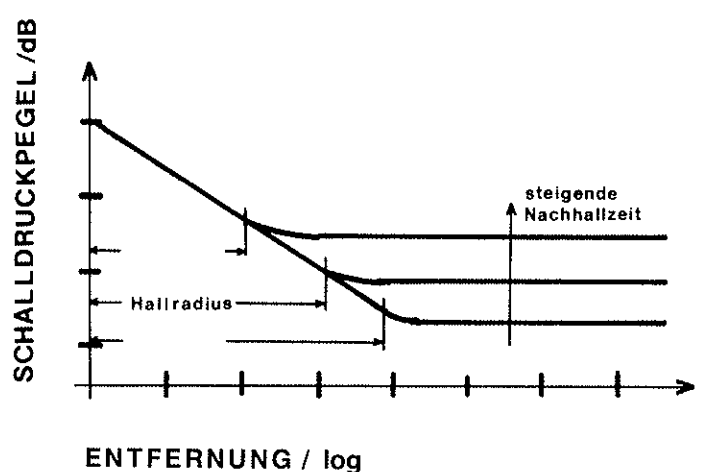
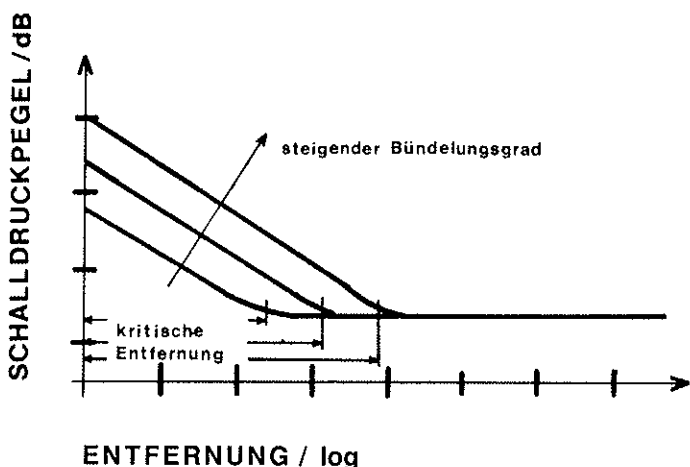


Abb. 15: Veränderung der Pegelverteilung in einem nachhallenden Raum bei steigendem Bündelungsgrad der Quelle [6].

Abb. 16: Veränderung der Pegelverteilung in einem nachhallenden Raum mit steigender Nachhallzeit [6].

Es gibt prinzipiell nur zwei andere Möglichkeiten, die Sprachverständlichkeit zu erhöhen: 1. die Nachhallzeit wird gesenkt und damit der Hallradius und die kritische Entfernung vergrößert (Abb. 16). 2. könnte der Abstand zur Schallquelle verkleinert werden, was aber hieße, entweder die Zuschauer näher an die Bühne zu setzen, oder aber für einzelne Abschnitte im Raum jeweils getrennte Lautsprechersysteme zu verwenden. Beim Einsatz vieler Lautsprechersysteme würde jedoch das Nachhallfeld im ganzen Raum eben durch die verteilten Lautsprecher wieder stärker

angeregt, und das Verhältnis von Direkt-schall zu Nachhall würde sich wieder verschlechtern. Außerdem sind umfangreiche Einrichtungen zur Signalverzögerung notwendig, die die Kosten stark erhöhen.

Festzustellen bleibt, daß die Kenntnis der raumakustischen Kenndaten die Grundlage der Dimensionierung jeder Ela-Anlage ist. Weiterhin wird klar, daß die oft verwendete Argumentation: „Wir brauchen ja nur eine Anlage für Sprachübertragung“ oft zu falscher Einschätzung der Problematik Beschallungstechnik führt.

Entfernung, geringe Deckenhöhe oder Verdeckung), werden in diesen Bereichen weitere Systeme installiert, die über Signalverzögerungsgeräte angesteuert werden, um den natürlichen Richtungseindruck zu erhalten (Abb. 19).

Verteilte Systeme, im allgemeinen als Deckenbeschallung ausgeführt, werden eingesetzt, um bei Räumen mit sehr langer Nachhallzeit und sehr geringen Deckenhöhen den Abstand Zuhörer—Lautsprecher zu verkleinern. Allerdings sind wegen der zwischen den einzelnen Lautsprechern auftretenden Kammfiltereffekte (Interferenzen) sehr viele Lautsprecher erforderlich. Für die Gewährleistung des Richtungseindruckes sind ggf. noch zusätzliche Maßnahmen zu treffen (Abb. 20). Die Entscheidung für eine bestimmte Lautsprecheranordnung wird damit zu einer sehr wichtigen Entscheidung für die Wirksamkeit einer Ela-Anlage und sollte unter Einbeziehung aller Voraussetzungen sorgfältig erwogen werden [1, 6].

Arten der Lautsprecheranordnung

Nachdem im voranstehenden Teil erläutert wurde, welche entscheidenden Einflüsse die Eigenschaften von Lautsprechersystemen auf die Sprachverständlichkeit haben, sollen nun die möglichen Anordnungen solcher Anlagen mit ihren wesentlichen Merkmalen kurz erläutert werden, da auch dies wesentlichen Einfluß auf die Übertragung hat [1, 6]. Grundsätzlich gibt es nur 3 verschiedene Arten der Lautsprecheranordnung zur Beschallung eines Raumes:

- Zentralbeschallung.
- Semi-Zentralbeschallung.
- Verteilte Anordnung.

Die erstrebenswerteste Technik ist die der Zentralbeschallung, was bedeutet, daß alle Lautsprechersysteme, im Idealfall ein einziges, in einem Punkt über der Bühne das gesamte Auditorium versorgen. Die Vorteile dieser Anordnung liegen auf der Hand: der natürliche Richtungseindruck bleibt erhalten, es sind keine aufwendigen Signalverzögerungen erforderlich, und der Installationsaufwand ist vergleichsweise gering (Abb. 17 und 18).

Bei der semi-zentralen Beschallung wird auch ein Zentralsystem installiert. Zur Versorgung von Publikumsbereichen, die damit nicht erreichbar sind (durch zu große

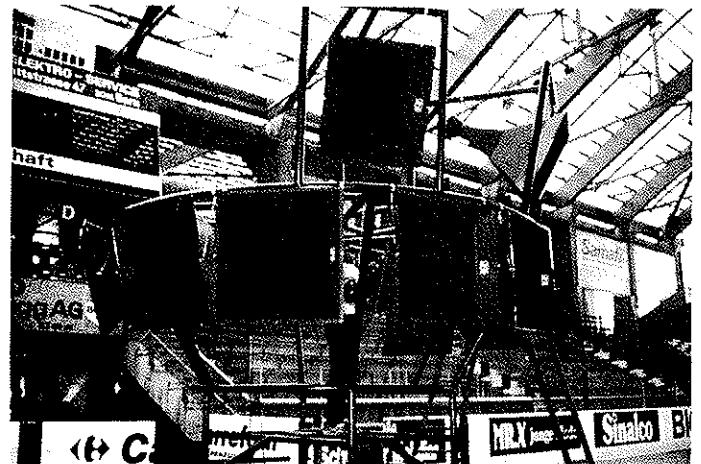
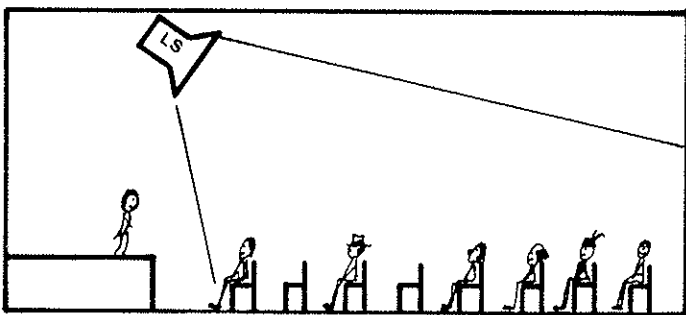


Abb. 17: Zentralbeschallung, LS = Lautsprechersysteme. — Abb. 18 (rechts): Montage eines Zentralbeschallungssystems aus Hornsystemen mit definiertem Abstrahverhalten und hohem Bündelungsgrad. Das System wurde anschließend von der Hallendecke abgehängt (Eisstadion Bern).

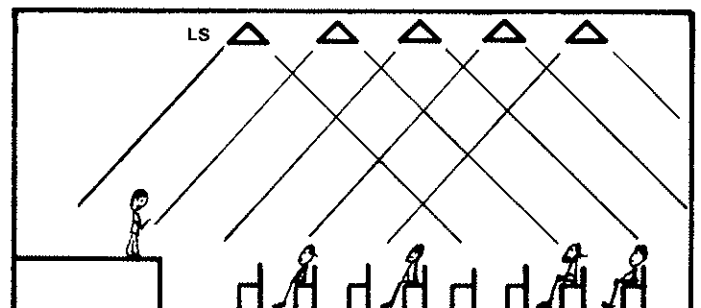
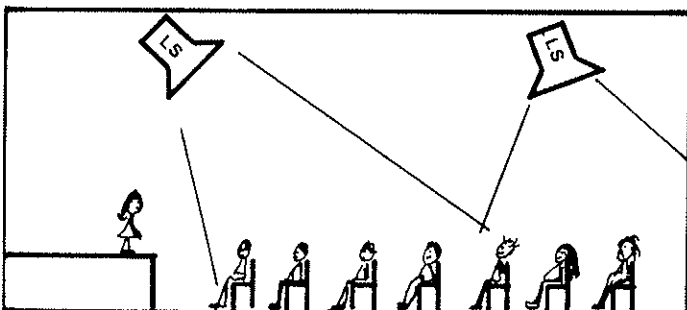


Abb. 19: Semi-Zentralbeschallung, LS = Lautsprechersysteme.

Abb. 20: Verteilte Systeme, LS = Lautsprechersysteme.

Schwierigkeiten beim Einsatz der Ela-Technik

Der Einsatz der Ela-Technik hat also durchaus sehr positive Aspekte und kann die Nutzungsmöglichkeiten eines Mehrzweckgebäudes erheblich unterstützen und erweitern. Vielfach treten jedoch bei der Benutzung von Ela-Anlagen große Schwierigkeiten auf, die meistens auf mangelhafte oder falsche Konzeption zurückzuführen sind. Oftmals wird die notwendige Verstärkung nicht erreicht, da die Anlage schon bei geringer Verstärkung Rückkopplung aufweist, ein Effekt, der erst mit dem Einsatz einer Ela-Anlage möglich ist.

Rückkopplung ist immer möglich, wenn im gleichen Raum Mikrofon und Lautsprecher betrieben werden. Auch liegt es an der Auswahl der richtigen Lautsprecher und Mikrophone für den jeweiligen Anwendungsfall sowie an ihrer Installation an den geeigneten Stellen, ob die gewünschten Verbesserungen der Hörsamkeit wirklich eintreten. Die technisch relevanten Daten der zur Beschallung nötigen Geräte, besonders die Daten der elektroakustischen Wandler (Mikrophone und Lautsprecher) bezüglich ihrer Richtwirkung, ihres Wirkungsgrades und Frequenzganges sollten mit hinreichender Genauigkeit bekannt sein. Namhafte Hersteller von professionellen Geräten unterstützen den optimalen Einsatz ihrer Produkte mit umfangreichen Datenblättern, in denen auch die Meßmethoden angegeben sind, mit denen die Daten ermittelt wurden. Ein solches Datenblatt kann z. B. für ein Lautsprechersystem durchaus 4 DIN A4-Seiten und mehr umfassen. Das Angebot ist groß, und man braucht eine aktuelle Marktübersicht, um die geeigneten Produkte zu benennen. Leider werden elektroakustische Anlagen in den Ausschreibungsunterlagen in der Bundesrepublik Deutschland nicht genügend genau spezifiziert, so daß oftmals ungeeignete Produkte den Vorzug erhalten. Der ZVEI bemüht sich allerdings zur Zeit wieder um eine Harmonisierung und weitgehende Spezifizierung auch von Ela-technischen Daten.

Bedienbarkeit macht's

Zu guter Letzt soll noch kurz die Bedienbarkeit von Ela-Anlagen erwähnt werden, die auch bei der besten Anlage über Erfolg oder Nichterfolg entscheidet. Die vielfach vorhandenen sogenannten Regieräume gestatten sehr häufig nicht den direkten Blick auf das Bühnengeschehen und schon gar nicht das Hören der Saalübertragung. Der Platz, an dem ein Mischpult aufgestellt wird, sollte sich möglichst im Zuschauerraum befinden und freie Sicht und direktes Hören der Saalübertragung ermöglichen, da nur so

genaues Regeln der Anlage sichergestellt ist. Eine fahrbare Regieeinheit, die an mehreren Stellen im Saal aufgestellt werden kann, ist dem abgeschlossenen Regieraum deutlich überlegen.

Weiterhin sollten an den möglichen Bühnenstandorten immer mehrere Mikrofonanschlüsse vorhanden sein, eventuell sogar ein Bühnenverteiler. Eine gleichmäßige Verteilung von Lautsprecher und Mikrofonanschlüssen im ganzen Saal führt in der Regel nur dazu, daß zu den Stellen, an denen oft mehrere Mikrophone benötigt werden, lange Kabel aus allen Richtungen ankommen, die echte Stolperfallen sind.

Das Bedienungspersonal sollte während der Veranstaltungen nicht mit zusätzlichen anderen Tätigkeiten belastet werden. Weiterhin sollte eine eingehende, praxisnahe Einweisung oder Schulung erfolgen, so daß beschallungstechnische Standardsituationen sicher bewältigt werden können.

Oft lohnt sich auch der Einsatz von automatischen Mischpulten, die selbsttätig die angesprochenen Mikrophone öffnen und die Lautstärke auf einem bestimmten Pegel halten, da das Bedienungspersonal dadurch stark entlastet und die Rückkopplungsgefahr vermindert wird.

Ela-Anlagen werden gerade für Mehrzweckgebäude zum Mittel der Nutzungssteigerung, da sich wegen der großen Abmessungen und der großen Nachhallzeiten sehr schnell die Grenzen dessen, was allein mit raumakustischen Mitteln an Übertragung möglich ist, auftun. Die Ela-Technik kann, bei genauer Erfassung der Voraussetzungen und der Anforderungen, die Übertragungen bezüglich Verständlichkeit und Lautstärke stark verbessern. Eine Verbesserung der Sprachverständlichkeit, wie sie mit moderner Beschallungstechnik möglich ist, ist in der gleichen Größenordnung mit raumakustischen Mitteln bei den heute üblichen Größen von Mehrzweckgebäuden nicht erreichbar; allerdings ist von entscheidender Bedeutung, daß Konzeption, Ausführung und Bedienung der elektroakustischen Einrichtungen zu jeder Zeit die notwendige Beachtung finden.

Literaturverzeichnis

- [1] Ahnert, W.; Reichardt, W.: Grundlagen der Beschallungstechnik. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1981.
- [2] Cremer, L.; Müller, H. A.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978.
- [3] Heckel, M.; Müller, H. A.: Taschenbuch der Technischen Akustik. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1975.
- [4] Hartmann, G.: Praktische Akustik, Band 2. R. Oldenbourg Verlag, München-Wien, 1968.
- [5] Veit, Ivar: Technische Akustik. Vogel Verlag, Würzburg, 1978.
- [6] Davis, Don; Davis, Carolyn: Sound System Engineering. Howard W. Sams & Co., 1987.