Besseres Verstehen im Klassenzimmer mit Lautsprecheranlage?

Die akustischen Bedingungen in Klassenräumen sind oft alles andere als ideal zum guten Verstehen – erst Recht für Kinder mit einer Hörbeeinträchtigung. Abhilfe sollen zusätzliche Lautsprecheranlagen bieten. Ob sie ihr Versprechen halten, haben Carsten Ruhe, Beratender Ingenieur für Akustik, und Ralf Malessa, Hörgeschädigtenpädagoge, mittels professioneller Messtechnik in einer Förderschule mit den Förderschwerpunkten Hören und Sprechen untersucht.

Foto: Phonak

„Gebt mir einen festen Punkt im All und ich werde die Welt aus den Angeln heben.“ (Archimedes)

Beschallungssysteme für Klassenräume werden von einem Hörhilfenhersteller unter der Bezeichnung „Dynamic SoundField“ angeboten und mit schlagkräftigen Werbeargumenten angepriesen. Einige der Argumente widersprechen akustisch-physikalischen Gesetzmäßigkeiten und werden von Fachleuten der Raumakustik und Beschallungstechnik für unmöglich gehalten. Andererseits gibt es Untersuchungen (Krieger und Tchorz 2011, Krieger 2015, Truckenmüller 2019), welche die Wirksamkeit dieser Anlagen belegen sollen, die aber durchaus mit etlichen großen Fragezeichen zu versehen sind. Die Reaktionen der Nutzer solcher Anlagen reichen von begeisterter Zustimmung bis zu strikter Ablehnung.

Um diese Widersprüche aufzuklären, haben die Autoren dieses Beitrags beschlossen, mit den bei ihnen vorhandenen messtechnischen Möglichkeiten der Sachlage auf den Grund zu gehen. Carsten Ruhe ist als Beratender Ingenieur für Akustik skeptisch (Ruhe 2013, Ruhe 2014). Ralf Malessa ist Hörgeschädigtenpädagoge sowie Nutzer von SoundField-Anlagen und begeistert von deren Wirkung. Sie haben sich vorgenommen, ein vorab festgelegtes Messprogramm ergebnisoffen gemeinsam abzuarbeiten und erst nach Vorliegen aller Daten eine Wertung vorzunehmen. Nach zwei Messdurchgängen 2019 und 2020 wurde der Hersteller um Beantwortung einiger Fragen gebeten. Die Antworten sind in den Bericht eingeflossen und haben 2021 auch zu weiteren Messungen geführt.

Messprogramm

Das Messprogramm, welches vorab zur Untersuchung der einzelnen Parameter als Gesamtablauf geplant – und während der Messungen doch wieder umgestoßen und geändert – wurde, enthielt folgende Aufgaben:

Messung der

- Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch Dynamic SoundField (SF)
- Veränderung des Schallpegels der originalen Lehrerstimme durch SF ohne Störgeräusche von dritter Seite
- Verteilung der Schallpegel der originalen und der verstärkten Lehrerstimme[1] im Klassenraum entlang gerader Ausbreitungslinien (reproduzierbar) und an den Schülerplätzen (abhängig von der jeweiligen Bestuhlung

[1] Die Messsignale lagen ausschließlich als männliche Stimmen vor, weshalb im Folgenden ausschließlich die jeweils männliche Bezeichnung verwendet wird, wohl wissend, dass in Grundschulen der Lehrerinnenanteil dominiert. Wir vermuten, dass die Messergebnisse in gleicher Weise auch auf Frauenstimmen zu übertragen sind.

im Klassenraum, deshalb nicht reproduzierbar)
- Richtcharakteristik und des Frequenzgangs des SF-Lautsprechers im Vergleich zu anderen Lautsprechern in verschiedenen Klassenräumen und im Freifeld
- Veränderung des Schallpegels der originalen Lehrerstimme bei Störgeräuschen von dritter Seite
- Vergleich zur Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch raumakustische Maßnahmen.

Sprachqualität STI

Der STI (speech transmission index, Sprachübertragungsindex) ist das Maß für die Qualität der Sprachübertragung. Die Sprachverständlichkeit wird neben Nachhall und Störgeräuschen auch von Signalveränderungen, die zwischen Schallquelle und Hörerplatz auftreten, herabgesetzt. Allgemein wird folgende qualitative Einstufung der STI-Werte vorgenommen:
- STI = 1,00 bis 0,75: Sprachverständlichkeit ausgezeichnet
- STI = 0,75 bis 0,60: Sprachverständlichkeit gut
- STI = 0,60 bis 0,45: Sprachverständlichkeit befriedigend
- STI = 0,45 bis 0,30: Sprachverständlichkeit schlecht
- STI = 0,30 bis 0,00: Sprachverständlichkeit sehr schlecht.

Der STI sollte im Regelfall in Räumen für Sprachdarbietungen größer sein als 0,6. In DIN 18041 wird STI ≥ 0,56 gefordert.

Für eine optimale Sprachverständlichkeit soll das Nutzsignal etwa 15 dB lauter sein als das Hintergrundgeräusch.

AF

Messgeräte

Als Messsignale wurden Rosa Breitbandrauschen (ein Gemisch aller Frequenzen), STI-PA-Rauschen (STI = Maß für Qualität der Sprachübertragung) sowie verschiedene Tonkonserven von männlichen Stimmen aus dem Signalgenerator MR-PRO der Firma NTi verwendet. Für deren Abstrahlung wurden zwei verschiedene Lautsprecher benutzt. Zunächst kam der Aktiv-Lautsprecher PAL-Tivoli zum Einsatz. Er hat den Vorteil, mit einem Membran-Durchmesser von etwa 50 mm etwa der Größe eines weit offenen Mundes (und auch der Größe der künstlichen Münder verschiedener Messgerätehersteller) zu entsprechen. Das ist aber mit dem Nachteil einer begrenzten Schallabstrahlung verbunden (verzerrungsfreier Schalldruckpegel in 1 m Abstand etwa L_{pA} = 60 dB). Deshalb wurde später der Aktiv-Lautsprecher NTi-TalkBox (TB) benutzt. Dessen Schallpegel ist etwa 10 dB höher, seine Membran ist aber mit 90 mm Durchmesser deutlich größer und er hat deshalb eine stärker bündelnde Abstrahlcharakteristik. Das musste bei der Positionierung des Lehrermikrofons bei den Untersuchungen entsprechend berücksichtigt werden.

Vergleichsweise wurden einige Messungen mit einem weiteren Aktiv-Lautsprecher, einem Studio-Monitor Fostex NX6301 (FX), ausgeführt. Dessen Membrandurchmesser entspricht etwa dem der TB, er kann aber bei Bedarf einen deutlich höheren Schallpegel erzeugen. Das war insbesondere bei den Messungen im Freifeld hilfreich, weil dort teilweise Störgeräusche von dritter Seite nicht vollständig auszublenden waren.

In beiden untersuchten Klassenräumen sind SF-Anlagen mit den Säulenlautsprechern Digimaster 5000 auf Dreibeinstativen aufgestellt. Innerhalb eines 65 cm hohen Bereiches sind in diesen Säulen übereinander zwölf Lautsprecher mit Membrandurchmessern von ca. 50 mm eingebaut, ähnlich denen des PAL-Messlautsprechers.

Als Messgerät standen der Audio- und Akustik-Analysator XL2 mit dem erweiterten Akustikpaket und ein ½-Zoll-Mikrofon ME2211 von NTi zur Verfügung. Diese Geräte wurden sowohl zur Messung der Nachhallzeiten in den verschiedenen Klassenräumen als auch für die Schallpegel- und STI-Messungen eingesetzt. Für die Nachhallzeitmessungen wurden sowohl ein gerichteter Lautsprecher GPS-8 von Galaxy-Audio als auch ein Dodekaeder DS3-1 von NTi verwendet.

Messräume

Die ersten beiden Messreihen erfolgten im April 2019 und Juli 2020 in Wilhelmsdorf in der Schule am Wolfsbühl, einem Bildungs- und Beratungszentrum mit den Förderschwerpunkten Hören und Sprechen. Am ersten Messtermin wurde ausschließlich in einem raumakustisch optimierten Klassenraum im Grundschulbereich gemessen (C5). Ein akustisch „richtig schlechter“ Klassenraum zum Vergleich stand damals nicht zur Verfügung. Als der zweite Messtermin stattfand, war wegen der jetzt geltenden Abstandsregeln ein ehemaliger Gymnastikraum, Blauer Saal (BS) genannt, für eine Klassenraumnutzung möbliert worden, aber dort bislang keine raumakustischen Ergänzungen vorgenommen. Im Klassenraum C5 war die ehemalige Halbkreisanordnung der Schülertische zu einer den Abstandsregeln entsprechenden „wilden Aufstellung“ umsortiert worden (siehe Grundriss, Abbildung 20). Alle Messungen fanden an Wochenenden ohne die Anwesenheit von Schülern statt. Die Maße und Ausstattungen dieser Räume zeigt Tabelle 1.

In dem Bemühen, einen möglichst unterrichtsnahen Zustand zu erhalten, wurde für die Messungen an den Räumen nichts verändert, weder an der Aufstellung des Mobiliars, noch an den dort vorhandenen Lautsprechern Digimaster 5000

Raum-Nummer	Klassenraum C5	Blauer Saal (BS)
Länge	ca. 7,9 m	ca. 8,3 m
Breite	ca. 6,7 m	ca.8,7 m
Höhe	2,45 m	2,42 m
Grundfläche	ca. 52,9 m^3	ca. 72,2 m^2
Volumen	ca. 130 m^3	ca. 175 m^3
Decke	Mineralfaser-Platten Ecophon Master B	Holzschalung mit Nut und Feder
Wände	massiv mit Anstrich	massiv mit Anstrich
Fassade	zwei zweiflügelige Fenster	Fensterband
Vorhänge	keine	offen
Fußboden	Kugelgarn	Stabparkett
Anzahl Sitzplätze	8 + 1	10 + 1
Ausstattung	Stahl-Tische, -Stühle, Schrank, zwei Regale, Pult, Grüntafel; Bildschirm	Stahl-Tische, -Stühle, 12 Sitzbänke, Schrankwand, E-Piano

Tabelle 1

der SF-Anlagen. Auch wurde in den Klassen nicht aufgeräumt. Die Abbildungen 1 und 2 lassen den „Wochenendzustand“ erkennen.

Das C5-Volumen entspricht mit etwa 130 m^3 der in Förderschulen typischen Größe. Das BS-Volumen von etwa 175 m^3 liegt dagegen eher in der Größenordnung von Klassenräumen allgemeiner Schulen. (Der Volumenmittelwert von 160 eigenen Messungen der vergangenen drei Jahre beträgt 204 m^3 bei einer Standardabweichung von 26 m^3).

Nachhallzeit-Messungen

Die Nachhallzeiten wurden in den unbesetzten Räumen in Anlehnung an (DIN 2008) gemessen. Die Anregung erfolgte mit Rosa Rauschen. Der Lautsprecher wurde nach dem Standardverfahren jeweils an zwei und das Mikrofon wechselweise dazu an mindestens drei unterschiedlichen Positionen im Raum aufgestellt. Insgesamt wurden mindestens sechs Sender-Mikrofon-Kombinationen verwendet. An jeder Position wurden die Abklingvorgänge von mindestens vier Anregungen ausgewertet. Die Standardabweichung liegt aufgrund der Anzahl der voneinander unabhängigen Sender-Mikrofon-Kombinationen und der Anzahl der jeweiligen Abklingvorgänge zwischen etwa $\sigma = 0{,}04$ s bei den tiefen Tönen und $\sigma = 0{,}01$ s bei den hohen. Das zeigt auch der Vergleich der C5-Messergebnisse vom April 2019 und Juli 2020 in Tabelle 2.

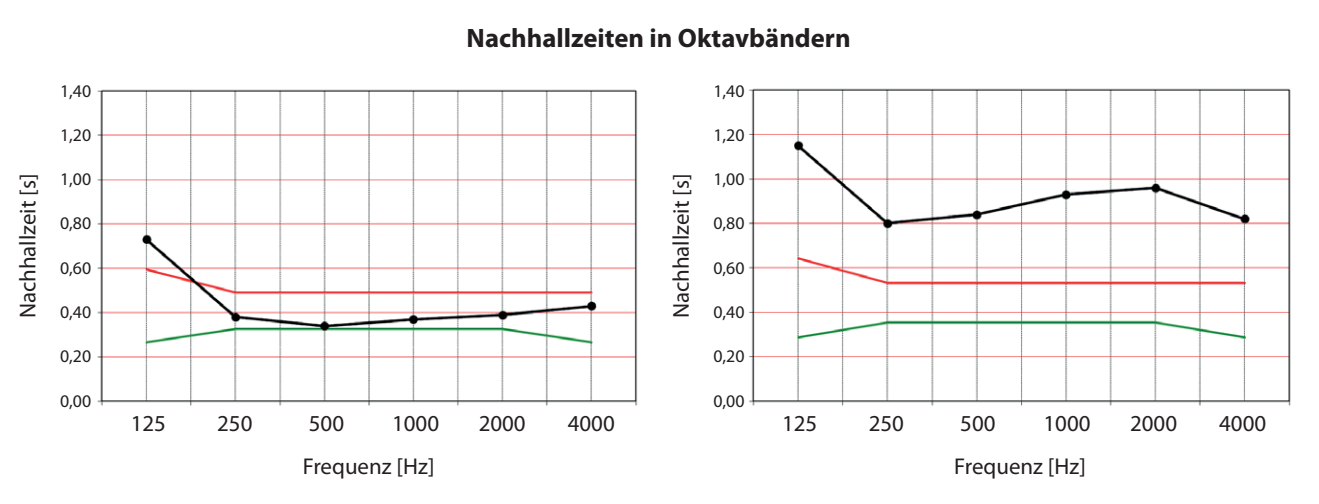
Aus den abklingenden Pegel-Zeit-Verläufen wurde im Bereich von -5 dB bis -25 dB gegenüber dem stationären Rauschsignal die Nachhallzeit nach DIN (2008) nach dem Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate elektronisch berechnet. Die arithmetisch gemittelten Ergebnisse sind für die einzelnen Oktavbänder in Tabelle 2 numerisch dargestellt. In den Abbildungen 3 und 4 ist dies jeweils die schwarz dargestellte Kurve. Der zugehörige Toleranzbereich nach DIN (2016), welcher vom Raumvolumen abhängig

Frequenz (in Hertz)	125	250	500	1000	2000	4000
Raum C5 April 2019	0,78	0,38	0,32	0,36	0,39	0,43
Raum C5 Juli 2020	0,73	0,38	0,34	0,37	0,39	0,43
Blauer Saal BS 2020	1,15	0,80	0,84	0,93	0,96	0,82

Tabelle 2: Nachhallzeiten im unbesetzten Zustand

Abbildungen: Ruhe

Abbildungen 1 und 2: Klassenraum C5, 2019 in Halbkreisaufstellung (oben) und 2020 in „wilder“ Aufstellung



Abbildungen 3 und 4: Nachhallzeiten in C5 und BS

ist, wird durch die obere rote und die untere grüne Kurve begrenzt.

Die Abbildung 5 enthält eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aller drei Nachhallzeit-Messungen. Hier ist also auch der Vergleich der Messungen vom April 2019 mit denen vom Juli 2020 im Klassenraum C5 möglich. Die Werte sind im Rahmen der Standardabweichungen identisch.

Erste STI-Messungen im April 2019

Im Anschluss an die Nachhallzeit-Messungen wurde die „originale Lehrerstimme“ in Form des PAL-Lautsprechers fast mittig vor der Tafel mit „Blickrichtung“ zu den Schülern positioniert. Der Lautsprecher bekam das Lehrermikrofon Touchscreen Mic in entsprechender Weise umgehängt, wie es sonst vom Lehrer getragen wird. Der Lautsprecher der SF-Anlage stand dagegen nahe einer Raumecke.

Bei der STI-Messung wird die Verringerung der Signalmodulation zwischen dem Ort der Schallquelle und dem des Hörers bei Oktav-Mittenfrequenzen zwischen 125 und 8000 Hz gemessen. Der „Ort der Schallquelle“ war in diesem Fall der PAL-Lautsprecher. Diese Apparatur ist so kalibriert, dass sie in 1,0 m Abstand im Freifeld einen Schalldruckpegel von L_{pA} = 60 dB erzeugt, „normale Sprechweise“ nach DIN 18041, Tabelle C.1. Das Mikrofon des Akustik-Analysators war auf einem Stativ fest aufgestellt, um Messungenauigkeiten durch leichte Bewegungen zu vermeiden. Bei allen Messungen wurde über jeweils drei Zyklen gemittelt.

Die Abbildungen 7 bis 10 zeigen jeweils als rote Kurve die Messwerte im Klassenraum C5 ohne SF-Anlage und als violette die mit SF-Unterstützung. Die Maßangaben beziehen sich auf den Abstand vom Lehrerlautsprecher. Bei geringen Abständen ist der STI ohne SF-Anlage besser als mit. Weiter nach hinten kehrt sich die Situation um. Eine Begründung dazu folgt weiter unten. Bei 6 m, kurz vor der Klassenraumrückwand, steigt der Schallpegel wieder an. In dem sehr gut gedämpften Klassenraum ist nämlich die Schallreflexion von der Wand auffällig. Auch dieser Raum ist kein „Freifeld“.

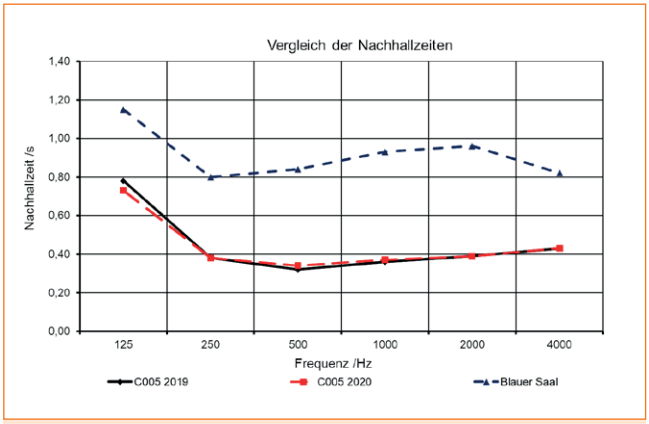


Abbildung 5: Gegenüberstellung der Nachhallzeit-Messergebnisse

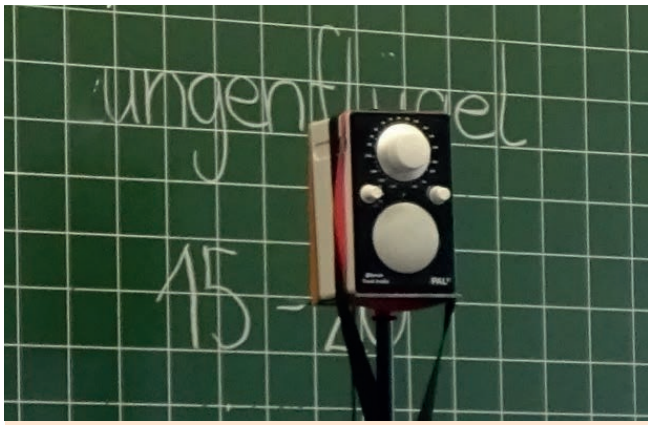
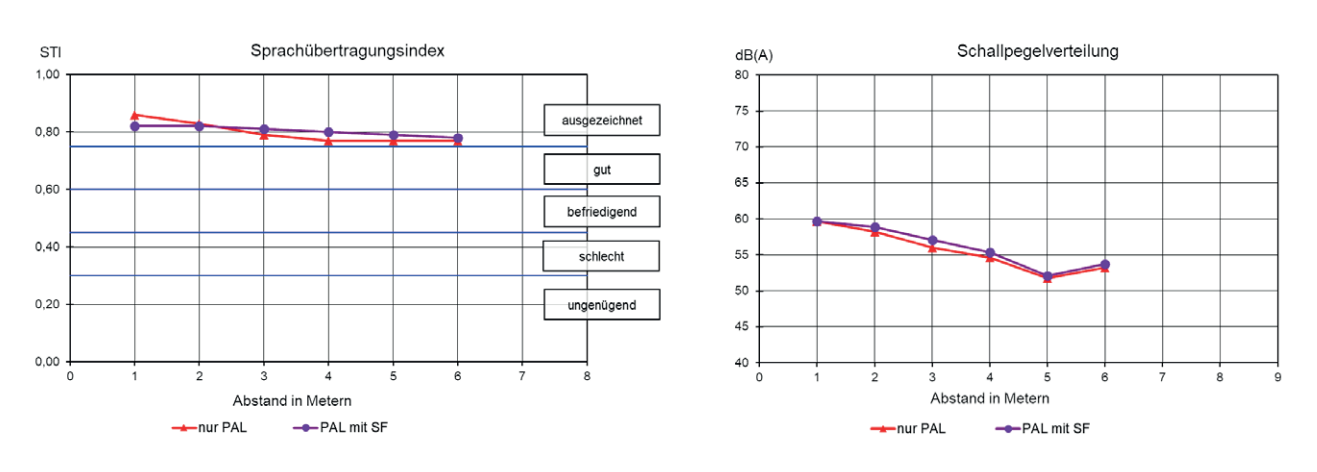
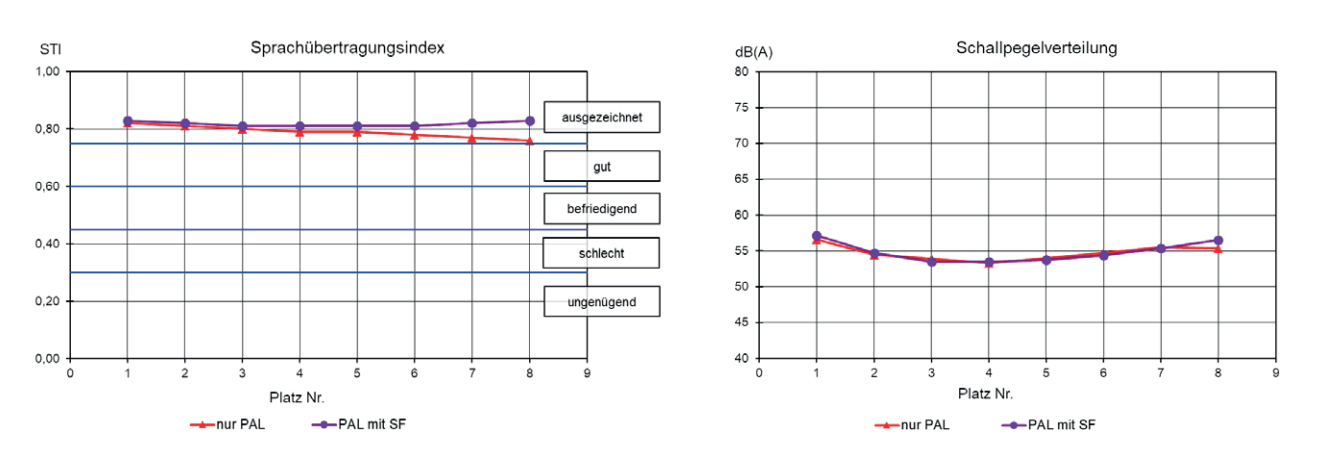


Abbildung 6: Aufstellung der „Lehrerstimme“ vor der Tafel



Abbildungen 7 und 8: STI- und Schallpegelmessungen in C5 entlang gerader Ausbreitungslinie



Abbildungen 9 und 10: STI- und Schallpegelmessungen in C5 an den Schülertischen im Halbkreis

Die Messpunkte 1 bis 8 in den Abbildungen 9 und 10 beziehen sich auf die Schülerplätze von links nach rechts, also von der Fensterzur Flurseite. Der Platz 1 hatte den geringsten Abstand zum Lehrerlautsprecher, der Platz 8 einen deutlich geringeren zum SF-Lautsprecher. Aufgrund der starken Krümmung des u-förmigen Halbkreises waren die mittleren Plätze am weitesten von beiden Lautsprechern entfernt. Das ist der Schallpegel-Verteilung in Abbildung 10 deutlich zu entnehmen.

Die Messungen mit der Lehrerstimme allein aus dem PAL-Messlautsprecher waren problemlos möglich. Nach Zuschalten des SF-Lautsprechers traten jedoch in etwa 90 % der Fälle Fehlermeldungen mit einer Anzeige von „???“ auf dem Display des Schallpegelmessers auf. Die Messwerte waren zwar in sich konsistent und passten auch zu denen ohne SF-Anlage. Irritierend waren aber die relativ geringe Verstärkung und der sehr geringe Gewinn beim Sprachübertragungsindex STI. Da der PAL-Messlautsprecher mit 60 dB(A) in 1 m Abstand an der Grenze der Verzerrungsfreiheit arbeitete, wurde zunächst vermutet, dass noch nicht hörbare Verzerrungen vorhanden seien, welche die Messqualität beeinträchtigen. Später stellte sich ein ganz anderer Effekt als maßgeblich heraus. Der Effekt war zu diesem Zeitpunkt aber noch nicht bekannt. Der „Misserfolg“ war der Anlass, zunächst einen neuen Messlautsprecher, die NTi-TalkBox (TB), zu kaufen, welcher höhere Schallpegel problemlos abstrahlen kann. Die Messungen wurden daraufhin vertagt.

Abbildung 11: Fehlermeldung bei den STI-Messungen

Vor der Fortsetzung der Messungen stellten die Autoren folgende Fragen an den SF-Hersteller Phonak:
Aus der STI-Messung an üblichen Lautsprecherbeschallungsanlagen von Räumen ist bekannt, dass man dort sämtliche dynamischen Bearbeitungen der Anlage (zum Beispiel Feedback-Destroyer) ausschalten muss, weil ansonsten die STI-Messwerte nicht richtig angezeigt werden.
1. An welcher Stelle erfolgt innerhalb der SoundField-Anlage eine dynamische Bearbeitung, wenn sich während des Messzyklus von 15 s Dauer an der Schall-Einstrahlung nichts ändert und kein Störgeräusch vorliegt?
2. Wie kann man – wenn die Messwerte tatsächlich nicht glaubhaft sein sollten – die Verbesserung der Sprachverständlichkeit durch eine SoundField-Anlage nachweisen?
Die Antworten blieben unbefriedigend. Die erste Frage blieb völlig unbeantwortet und die Antwort auf die zweite Frage lautet: The STI cannot be measured with the commercial software of the dynamic soundfield as the noise canceller will interpret the measurement signal as noise and then reduce the gain. It is also not possible to measure the STI using impulse response method as the feedback canceller uses a frequency shift. For STI measurement, devices with special software are required.
Wenn mit etablierten, den Messnormen entsprechenden Apparaturen die Verbesserungswirkung nicht belegt werden kann, muss man dann dem Hersteller einfach glauben?

Fortsetzung der STI-Messungen im Juli 2020

Der 2020 bei den Messungen anstelle der PAL-Box verwendete TalkBox-Lautsprecher hat aufgrund der deutlich größeren Membranfläche eine andere Richtcharakteristik. Dadurch entstand als erstes die Aufgabe, eine Touchscreen-Mic-Position zu ermitteln, bei der die „Lehrerstimme“ das Mikrofon vergleichbar beschallt, wie in der tatsächlichen Anwendung in der Umhängeposition. Diese Position in nur 60 mm Abstand schräg unterhalb der Lautsprecherachse erschien zunächst erstaunlich nahe. Sie lässt sich aber dadurch gut erklären, dass sich ungleichmäßige Schallfelder nahe an der Schallquelle viel krasser auswirken als in größerem Abstand. Darauf wird später im Zusammenhang mit den Lautsprecherrichtcharakteristiken noch einmal eingegangen. Die Festlegung dieser Position konnte nicht durch Messwerte unterstützt werden, weil der PAL-Lautsprecher als Vergleich zu diesem Zeitpunkt nicht zur Verfügung stand. Stattdessen musste ein direkter Hörvergleich mit der Umhängesituation durch den langjährigen Nutzer der SF-Anlage ausreichen.

Abbildung 12: Positionierung des Touchscreen Mic vor dem Messlautsprecher TB

Auch hier baten die Autoren Phonak um Antworten auf folgende Fragen: Die Position, welche wir für eine ausreichend laute Abstrahlung aus der SoundField-Anlage wählen mussten, hat uns irritiert. Wir haben sie dann aber hingenommen, um überhaupt mit unseren Messungen voranzukommen.
1. Haben wir hier aufgrund der Richtcharakteristik der drei an der Frontseite angebrachten Mikrofone möglicherweise einen Bereich minimaler Empfindlichkeit erwischt?
2. Gibt es eine grafische Darstellung der Richtcharakteristik für diese Mikrofonanordnung?
3. Haben Sie Kenntnisse über die Höhe des Schallpegels an der üblichen Umhängeposition im Verhältnis zu dem Schallpegel in 1 m Abstand vor dem Sprecher?
Dazu gab es die (ausweichende) Antwort: The speech signal must be generated by a manikin such as Bruel & Kjare 4128C or Kemar to mimic the human voice directivity and the effect of the chest. The microphone must be placed on the chest at 20 cm from the mouth. The speech level must be 65 dB(A) at 1 m.
Diese Antwort ist typisch für Mitarbeiter einer Firma, in welcher Geld nebensächlich ist. Dann kann man sich eine Messausrüstung leisten, welche für Ingenieurbüros unerschwinglich ist. Man könnte sich aber durchaus mit Ersatzpositionen sinnvoll behelfen, wenn die obigen Fragen auch nur ansatzweise beantwortet worden wären.

Die neuen Abstandsregelungen für den Präsenzunterricht führten 2020 zu dem glücklichen Umstand, dass ein zweiter Raum mit einer deutlich ungünstigeren raumakustischen Situation für die Schallmessungen zur Verfügung stand. Damit verdoppelte sich zwar der Messaufwand, aber es ergab sich ein vorher nicht geahnter Erkenntnisgewinn. Bei den Messungen entlang gerader Ausbreitungslinien sind die Ergebnisse aus den beiden Räumen C5 und BS entsprechend den Abbildungen 14 bis 17 recht gut miteinander vergleichbar. Die Abbildung 13 mit einem Ausschnitt des BS zeigt die Aufstellung der TB vor der Zugangstür während der Messungen auf geraden Ausbreitungslinien. Bei den Messungen in Bezug auf die Sitzplätze der Schüler stand die TB weiter links zur Tafel.

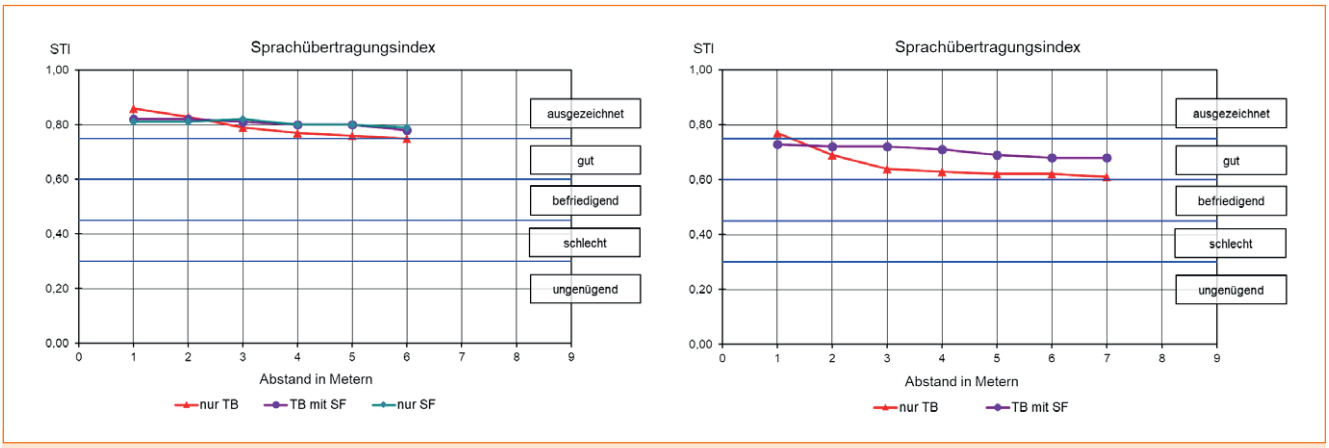
Im Klassenraum C5 wurde auch untersucht, welcher STI erreicht werden kann, wenn ausschließlich der Lautsprecher der SF-Anlage den Schall abstrahlt. Dazu wurde

Abbildung 13: Klassenraum BS, 2020 in „wilder“ Aufstellung

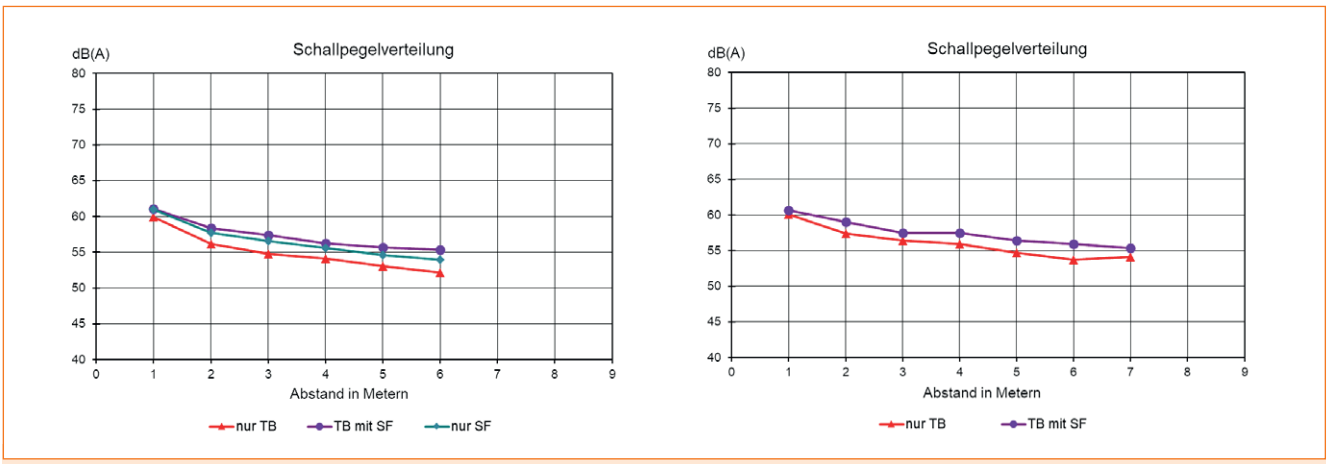
der Lehrer(-lautsprecher) mitsamt Touchscreen Mic nach draußen auf den Flur geschickt und er musste dort „reden“. Die auf diese Weise gewonnenen Messwerte sind in den Abbildungen 14 und 16 als dritte, türkisfarbene Kurve eingezeichnet.

Abbildung 16 lässt deutlich erkennen, dass der Lautsprecher der SF-Anlage zwar mit einem etwas höheren Pegel beginnt, dann aber etwa derselben Pegelabnahme unterliegt wie die TB als Lehrerstimmen-Nachbildung. Die vom Hersteller behauptete geringere Pegelabnahme ist nicht nachweisbar.

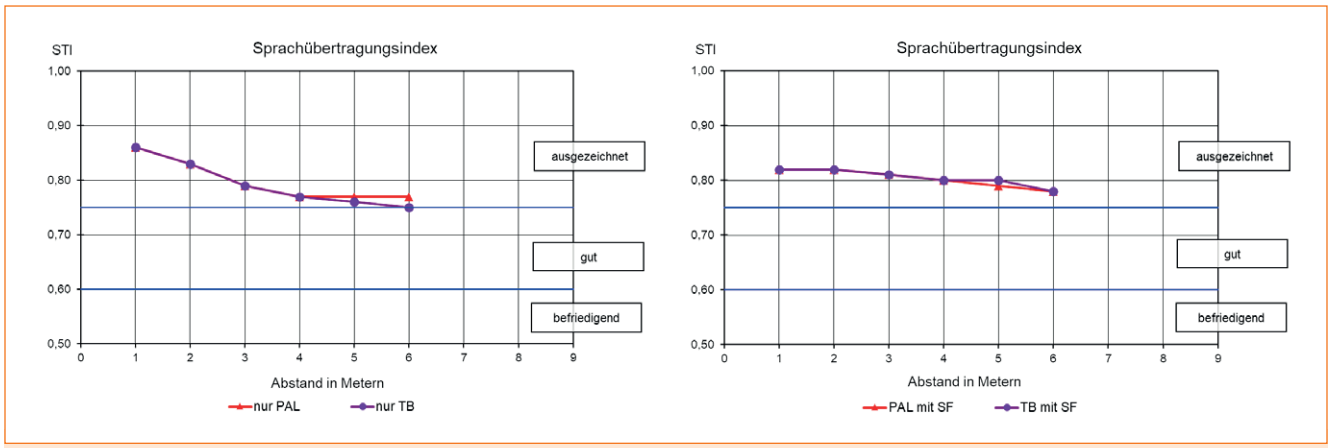
In den Abbildungen 18 und 19 sind die STI-Messwerte von 2019 mit dem PAL-Lautsprecher und von 2020 mit der TB einerseits ohne und andererseits mit SF gegenübergestellt. Mit den unterschiedlichen Lautsprechern wurden bei den beiden Messungen auf gerader Ausbreitungslinie fast identische Werte ermittelt, obwohl die Tische (als Reflexionsflächen auf dem Ausbreitungsweg) unterschiedlich gestanden haben. Zur besseren Erkennbarkeit sind die Diagramme gegenüber den vorherigen Abbildungen gestreckt (die untere Hälfte fehlt).



Abbildungen 14 und 15: Sprachübertragungsindex STI in C5 und BS, Messungen entlang gerader Ausbreitungslinien



Abbildungen 16 und 17: Schallpegelverteilung in C5 und BS, Messungen entlang gerader Ausbreitungslinien



Abbildungen 18 und 19: Vergleich PAL 2019 mit TB 2020 ohne (oben) und mit (unten) SF-Anlage

Daraus lässt sich ableiten, dass nicht der 2019 verwendete PAL-Lautsprecher zu den Fehlermeldungen geführt haben kann, die auch 2020 unter Verwendung der TB in gleicher Weise wieder vom Messgerät angezeigt wurden. Sie treten vermutlich vielmehr dadurch auf, dass die SF-Anlage während der Dauer jedes Mess-Zyklus von 15 s (in während der Messungen nicht nachvollziehbarer Weise) dynamische Veränderungen am abgestrahlten Signal vornimmt („Dynamic“-SoundField).

Um überhaupt zu Ergebnissen zu gelangen wurde entschieden, auch sämtliche mit „???“ angezeigten Werte in die Auswertungen einzubeziehen. Sie passten auch im jeweiligen Kurvenverlauf zu den weiteren, nicht als fehlerbehaftet markierten Messwerten.

Der Erkenntnisgewinn durch den zweiten Klassenraum BS wird dadurch beeinträchtigt, dass jetzt in beiden Räumen keine regelmäßigen Tischanordnungen mehr gegeben sind, sondern „wilde“ Positionierungen. Das macht die Messdiagramme in den Abbildungen 19 bis 22 deutlich schwerer lesbar. Während der Messungen wurden die Plätze zwar nummeriert, um bei jeder Messreihe die identischen Positionen abzuarbeiten. In den Diagrammen sind die Messwerte aber in Abhängigkeit des Abstands von der TB (Lehrerstimme) aufgetragen.

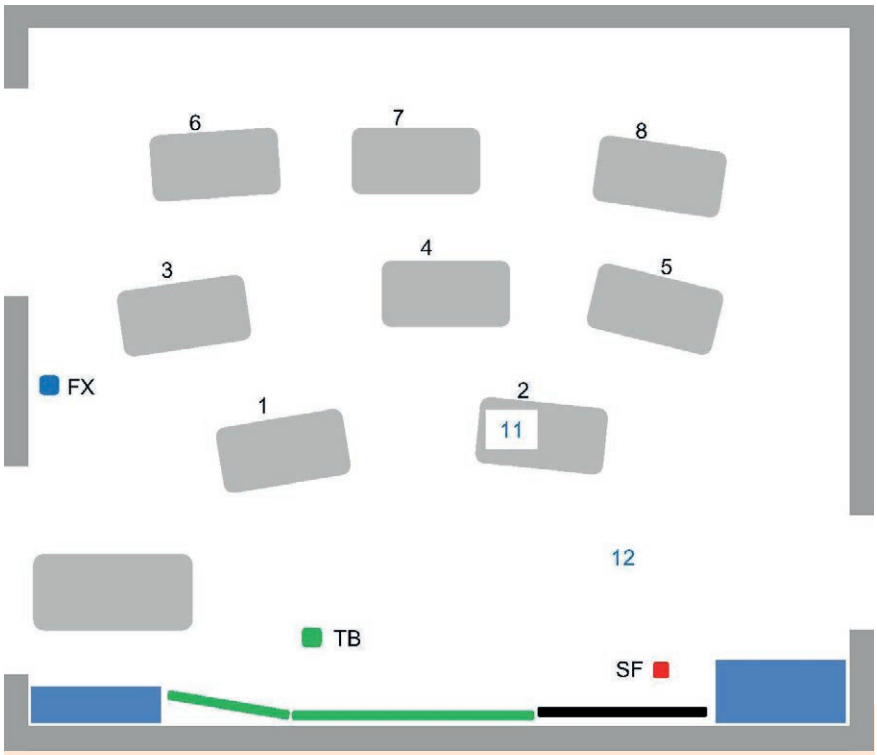
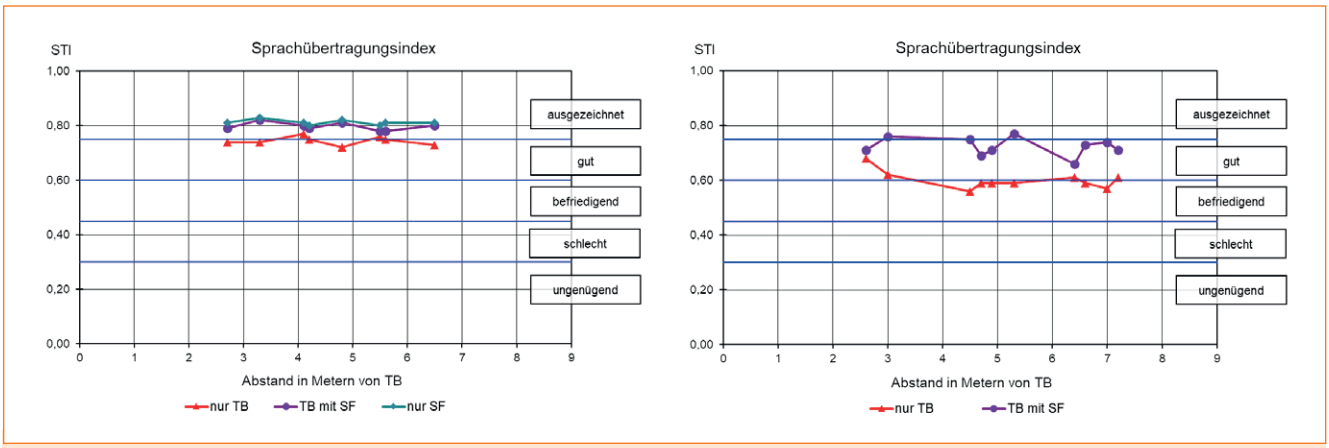


Abbildung 20: Grundriss Klassenraum C5 mit Lautsprecher- und Messpositionen

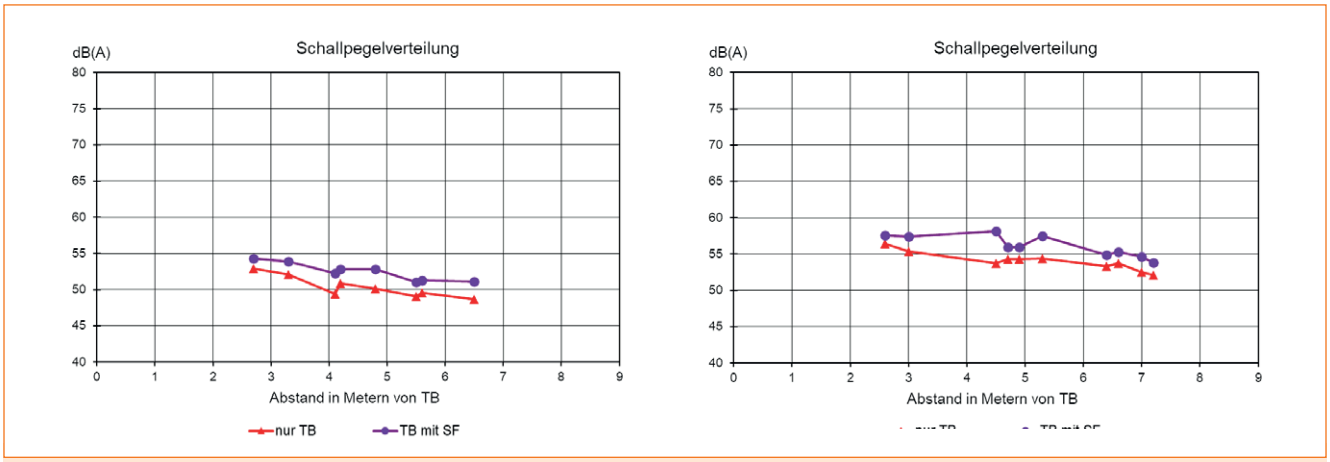
Den Abbildungen 22 und 24 kann deutlich entnommen werden, wie stark einige Schülerplätze durch die beiden im Raum BS vorhandenen Pfeiler abgeschirmt und benachteiligt werden. Die Messergebnisse passen so gut zu den räumlichen Verhältnissen, dass die oben (zunächst) vermuteten fehlerhaften Messungen sehr unwahrscheinlich sind.

In den Abbildungen 14 und 15 war oben zu erkennen, dass im stärker gedämpften Raum C5 die STI-Verbesserung durch die SF-Anlage deutlich geringer ausgefallen ist, als in dem halligeren Raum BS. Das lässt sich gut dadurch begründen, dass ein bereits sehr guter STI auch mit viel Aufwand nicht mehr zu verbessern ist, ein schlechter STI dagegen bereits mit geringem Aufwand deutlich.

In Abbildung 25 sind die Messwerte des Raums BS ohne und mit SF („nicht so gut“ und „besser“) denen des Raumes C5 („ausgezeichnet“) gegenübergestellt. Hieraus kann



Abbildungen 21 und 22: Sprachübertragungsindex STI in C5 und BS, Messungen an den Schülerplätzen



Abbildungen 23 und 24: Schallpegelverteilung in C5 und BS, Messungen an den Schülerplätzen

man sehr deutlich die Lehre ziehen, dass es sinnvoller ist, das zur Verfügung stehende Geld in eine raumakustische Verbesserung zu investieren als in eine technische Anlage. Raumakustische Ausstattungen halten gut und gern 30 Jahre, technische Anlagen sind aber vielfach nach fünf Jahren defekt oder veraltet.

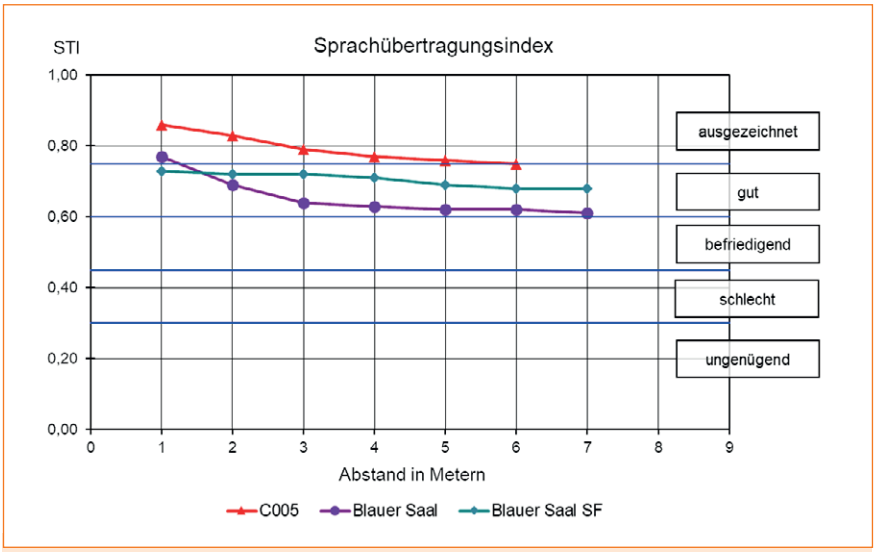


Abbildung 25: STI-Vergleich Raum C5 ohne SF sowie Raum BS ohne und mit SF

Schallausbreitung im Raum und im Freifeld

Vom Hersteller der SF-Systeme wird behauptet, bei einzelnen Lautsprechern (Punktquellen) würde der Schallpegel je Verdoppelung des Abstands um 6 dB abnehmen (siehe z. B. Truckenmüller 2019, dort Abbildung 1). Dagegen soll mit dem Linienstrahler von etwa 0,65 m aktiver Länge eine Pegelminderung um lediglich 3 dB je Abstandsverdoppelung (double distance, DD) erreicht werden (Truckenmüller 2019, dort Abbildung 2). Beide Aussagen werden von Fachleuten der Raumakustik und der Beschallungstechnik stark bezweifelt.

Abbildungen 26 und 27: Aufstellung der Lautsprecher im (Halb-)Freifeld auf dem Schulsportplatz

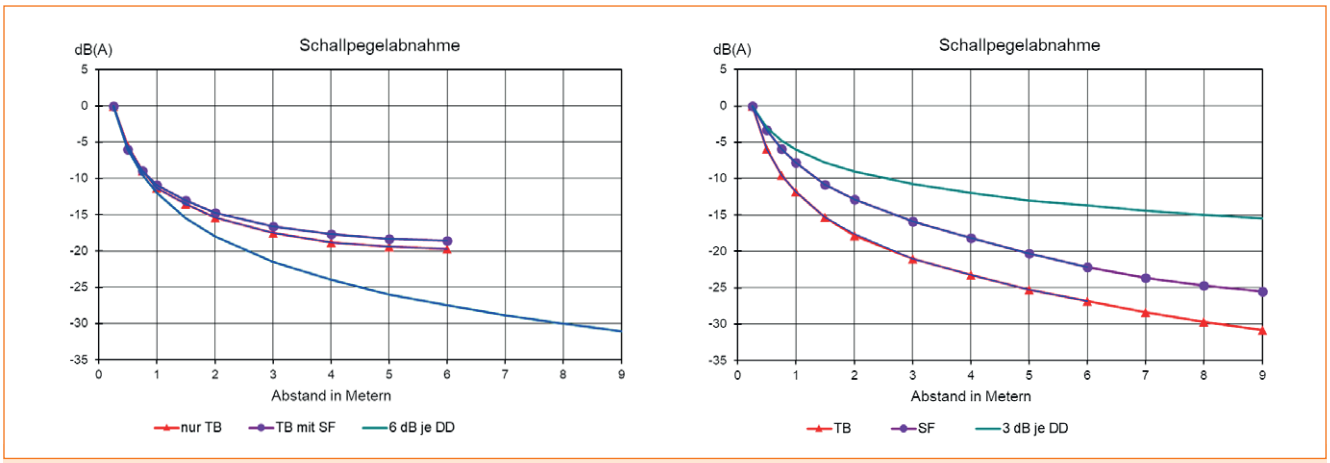
Aus diesem Grunde erfolgten im Klassenraum C5 Schallpegelmessungen entlang gerader Ausbreitungslinien, bei denen die NTi-Talk-Box (TB) allein und auch in Kombination mit dem Linienstrahler Digimaster 5000 der SF mit Rosa Rauschen gespeist wurden. Auch hier beziehen sich für einen einfachen Vergleich alle Abstände wieder auf den Lehrermund, dargestellt durch die TB. Der Lautsprecher der SF blieb an seiner Position in der Nähe einer Raumecke und strahlte von dort bei der zweiten Messung ergänzend in den Raum. Bei diesen Messungen ging es um die Frage, ob in einer realen Anwendungssituation im Klassenraum tatsächlich für die Lehrerstimme eine so starke Pegelminderung eintritt, wie sie in den Veröffentlichungen des Herstellers behauptet wird und ob eine Ergänzung durch die SF-Anlage das vollständig ausgleichen kann. Die Messsituation ist Abbildung 2 zu entnehmen.

Weiterhin war von Interesse, ob Lautsprecher von nur 0,65 m Länge über die Tiefe eines Klassenraums tatsächlich als solch ein Linienstrahler mit einer Pegelminderung um nur 3 dB/DD wirkt oder ab welchem Abstand sich die Pegelminderung der einer Punktschallquelle wieder annähert. Auch das ist im Hinblick auf die Unterstützung der Klassenraumsituation durch den Lautsprecher einer SF-Anlage von großem Interesse. Hierzu erfolgten Messungen im echten Freifeld, nämlich auf dem Sportplatz der Schule am Wolfsbühl. Die Aufstellung der Lautsprecher und des Messmikrofons zeigen die Abbildungen 26 und 27. (Genau genommen handelt es sich hier um ein Halbfreifeld, nämlich ein Freifeld in der oberen Hemisphäre über einem schallharten Boden.)

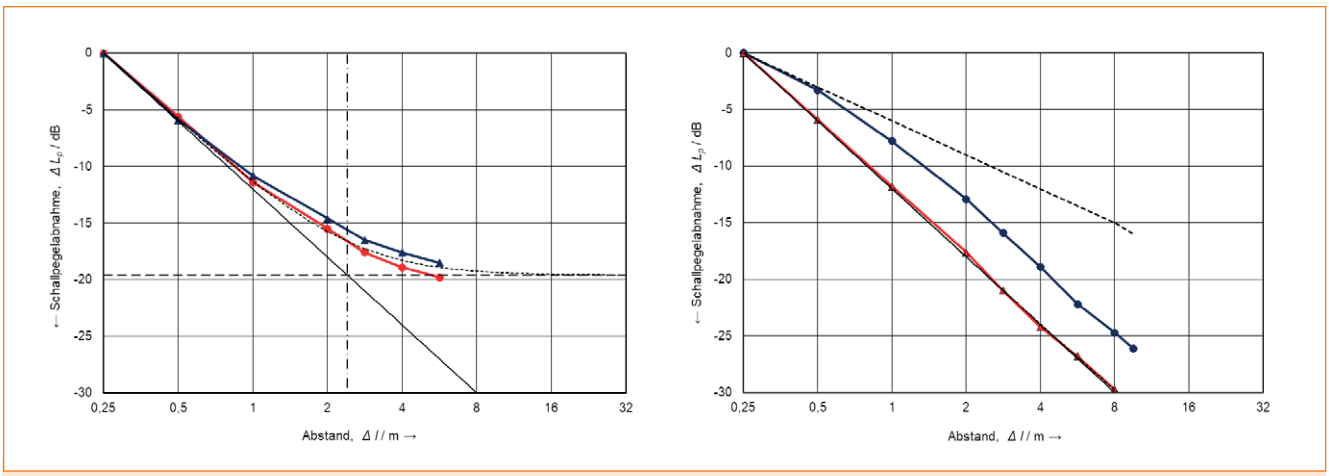
Das akustische Zentrum der SF-Lautsprechersäule und der TB waren ebenso wie das Mikrofon des Schallpegelmessers auf 1,5 m Höhe und (nacheinander) jeweils genau über einem vorab markierten „Fadenkreuz“ positioniert. Alle Messungen im Freifeld erfolgten in 0,25 m, 0,50 m, 0,75 m, 1,00 m, 1,50 m, 2,0 m … 10,0 m Abstand.

Zum Vergleich mit den obigen Darstellungen der Pegelabnahme in den Klassenräumen im Zusammenhang mit den STI-Messungen werden die messtechnisch ermittelten abstands-abhängigen Pegelminderungen zunächst in gleichartigen Diagrammen mit einem linearen Metermaßstab dargestellt (Abbildungen 28 und 29). Für die optisch einfache Überprüfung der Aussagen zu den Pegelminderungen je Verdoppelung des Abstands ist es dagegen praktischer, die Abstände in einem logarithmischen Maßstab darzustellen (Abbildungen 30 und 31). Dann werden nämlich real jeweils doppelte Abstände (0,5-1-2-4-8) mit gleichen relativen Entfernungen gezeichnet (0,5/1 = 1/2 = 2/4 = 4/8). Deshalb gibt es sowohl für die Messungen im Klassenraum C5 als auch für die im Freifeld jeweils zwei Diagramme. Im Klassenraum C5 waren keine größeren Abstände als 6 m möglich, im Freifeld konnte bis 10 m Abstand gemessen werden.

Die Abbildungen 28 und 29 einerseits sowie die Abbildungen 30 und 31 andererseits zeigen jeweils die identischen Messergebnisse. Wie bereits oben erläutert, dienen die linearen Darstellungen im Wesentlichen dem Vergleich mit den Messungen der Schallpegelverläufe anlässlich der STI-Messungen. Für eine sachgerechte Beurteilung sind aber die Darstellungen im logarithmischen Maßstab aussagekräftiger. Eine grafische Darstellung ähnlich der Abbildung 28 mit linearem Entfernungsmaßstab war früher auch in den Unterlagen des SF-Herstellers zu finden, siehe z. B. Abbildung 32. Dort wurde behauptet, die Lehrerstimme nehme im Klassenraum wie im Freifeld ab (unterste Kurve in Abbildung 28). Tatsächlich ist die Schallpegelab-



Abbildungen 28 und 29: Schallpegelabnahmen im Klassenraum C5 (links) und im Freifeld (rechts), linearer Maßstab



Abbildungen 30 und 31: Schallpegelabnahmen im Klassenraum C5 (oben) und im Freifeld (unten), logarithmischer Maßstab

nahme aber deutlich geringer (rote Kurve in Abbildung 28) und die Schallpegelanhebung durch die SF-Anlage ist im Klassenraum marginal (blaue Kurve). Seit einiger Zeit veröffentlich der Hersteller das Diagramm nicht mehr.

Die Abbildungen 28 und 30 für die Messungen innerhalb des Klassenraums C5 zeigen als rote Kurve die Messwerte bei Schallabstrahlung von der Punktschallquelle (TB). Anders als zum Beispiel in Truckenmüller (2019) behauptet, stellt sich im Klassenraum keine Schallpegelabnahme mit 6 dB/DD ein. Das ist allenfalls bis etwa 1 m Abstand der Fall, denn auch der gut gedämpfte Klassenraum C5 mit einer Nachhallzeit von knapp 0,4 s ist kein reflexionsfreier (schalltoter) Raum. Die immer noch vorhandenen Schallreflexionen von den Begrenzungsflächen sorgen für eine Pegelanhebung, welche recht genau dem Verlauf entspricht, der aus Raumvolumen und Nachhallzeit auch theoretisch abzuleiten ist. Dieser theoretische Verlauf ist in Abbildung 30 als punktierte Ausgleichskurve zwischen der mit 6 dB/DD von oben links nach rechts

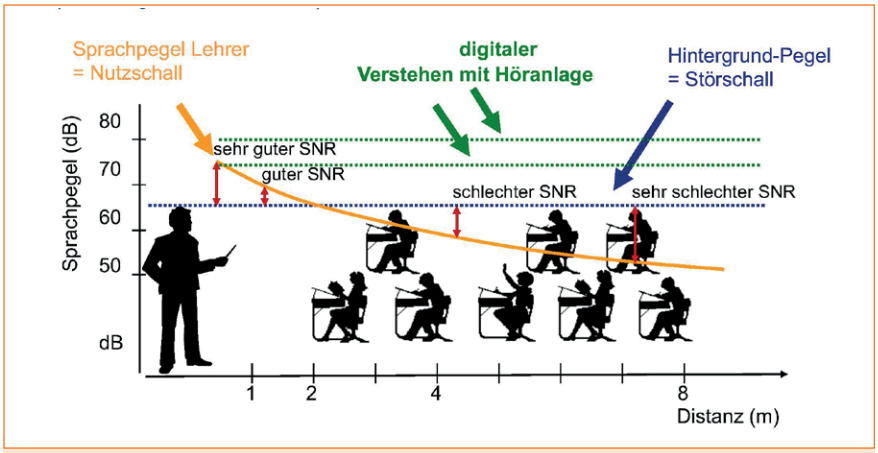


Abbildung 32: Ehemalige Darstellung des SF-Herstellers zur behaupteten Schallpegelabnahme in einem typischen Klassenraum.

unten fallenden Freifeldgeraden und der bei etwa -20 dB verlaufenden horizontalen Hallfeldgeraden eingetragen. Zwischen 3 m und 6 m ist der Verlauf der roten Messwertkurve sogar noch etwas steiler als der theoretische Verlauf. Dennoch liegt er bei weitem nicht in der behaupteten Größe von 6 dB/DD. Der Vorteil der logarithmischen Darstellung in Abbildung 30 gegenüber 28 ist insbesondere bei der Freifeldgeraden zu erkennen. Diese ist nämlich dort (und nur dort) auch tatsächlich eine Gerade, nicht aber bei der linearen Abstandsdarstellung, wie sie sonst in den typischen populären Veröffentlichungen gern abgebildet wird.

Enttäuschend ist der Gewinn an Schallpegel durch das Zuschalten des Linienlautsprechers der SF-Anlage. Im Nahbereich des Sprechers sind kaum Pegelanhebungen vorhanden (dort überwiegt die Lehrerstimme) und an den hintersten Messpunkten beträgt der Zuwachs lediglich 2 dB. Der Hersteller vergleicht in seinen Prospekten gern den Schallpegel der SF-Lautsprechersäule im Klassenraum mit dem Schallpegel der Lehrerstimme im Freifeld. Das ist unseriös, denn auch die Lehrerstimme nimmt im Klassenraum weit weniger ab als im Freien. Auf diesen Umstand wurde oben schon ausführlich eingegangen. Die so „diagnostizierte“ Verbesserung durch die SF-Anlage stammt nämlich nicht vom Lautsprecher, sondern von der Klassenraumakustik, die eben nicht der des Freifelds entspricht.

In den Veröffentlichungen des SF-Anlagen-Herstellers heißt es zur Richtcharakteristik der Lautsprechersäule: Dieses Design hat den Effekt, dass die Lautsprecherreihe den Klang vorwiegend im horizontalen Bereich, mit einer guten horizontalen Streuung aber einer niedrigen vertikalen Streuung, ausstrahlt. Der vertikale Streuwinkel des Hauptklangfeldes bei 500 Hz beträgt +/–25° und bei 2000 Hz nicht mehr als +/–7°. Eine Aussage, um wieviel dB der Schallpegel in diesem Winkelbereich geringer sein soll als in der Bezugsachse (z. B. -3 dB oder -10 dB), ist in den zugänglichen Unterlagen des Herstellers ebenso wenig zu finden wie die übliche grafische Darstellung der Lautsprecherrichtcharakteristik in einem Polardiagramm.

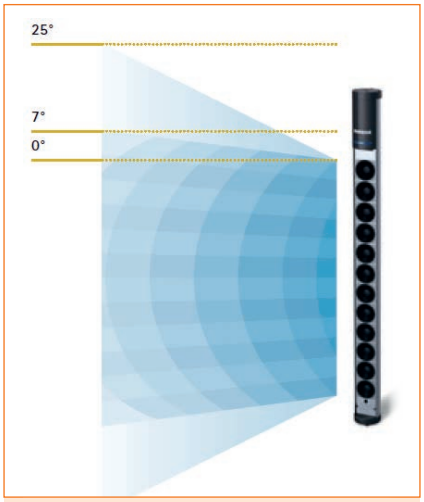


Abbildung 33: Darstellung der Schallabstrahlung der Lautsprechersäule im Herstellerprospekt

Auch bei den vergleichsweise ausgeführten Schallpegelmessungen im Freifeld ist das Diagramm mit logarithmischer Abstandsdarstellung in Abbildung 31 aussagekräftiger als die Abbildung 29 mit linearem Maßstab. Die rote Messwert-Linie für die Punktschallquelle (TB) folgt haargenau der Freifeldgeraden mit -6 dB/DD. Hier stimmt also die Physik wieder, weil tatsächlich ein „echtes Freifeld“ vorliegt. Bei Schallabstrahlung von der Linienschallquelle der SF-Anlage ergibt sich nur zwischen 0,25 m und 0,5 m ein Pegelabfall mit -3 dB/DD. Danach beginnen die Messwerte aber deutlich stärker zu fallen als die vergleichsweise punktiert dargestellte -3 dB/DD-Bezugsgerade. Spätestens ab 2 m Abstand ist auch hier wieder ein Pegelabfall von -6 dB/DD vorhanden, also ein Kurvenverlauf parallel zu dem der Punktschallquelle.

Dieses Ergebnis ist (zumindest für Fachleute der Raumakustik und Beschallungstechnik) nicht verwunderlich. Man verwendet die Faustformel, dass sich eine Linienschallquelle ab dem dreifachen Abstand ihrer Längenausdehnung wieder wie eine Punktschallquelle verhält. Dieser Zusammenhang gilt übrigens nicht nur für Beschallungsanlagen, sondern zum Beispiel auch beim Geräusch-Immissionsschutz für kurze sichtbare (und hörbare) Abschnitte von langen Verkehrswegen.

Mit der Feststellung, dass der Linienstrahler der SF-Anlage sich spätestens ab 2 m Abstand wieder wie eine Punktschallquelle verhält und deshalb auch entsprechend wenig Schallpegel nach hinten strahlen kann, ist dann auch der enttäuschend geringe Pegelgewinn im Klassenraum gemäß den Abbildungen 28 und 30 erklärbar. Hinzu kommt noch, dass der Linienstrahler bei der hier festgestellten geringen Bündelungswirkung ähnlich viel diffusen Schall in den Klassenraum strahlt wie auch der Sprecher selbst oder eine andere Punktschallquelle. Damit wird dann wiederum verständlich, dass auch der Gewinn im STI relativ gering bleibt (deutlich geringer als die vollmundige Herstelleraussage).

Weitere Schallmessungen

Auch zum Frequenzgang, zum maximal erreichbaren Schallpegel und zur Richtcharakteristik der SF-Lautsprechersäule sowie zum dynamischen Verhalten beim Vorliegen von Störgeräuschen fanden Messungen statt. Aus Platzgründen wird hier nicht im Einzelnen darauf eingegangen. Die Ergebnisse sind aber weiter unten aufgeführt.

Fazit

Die Autoren haben (mit gegenseitiger „Überwachung“ und langen Diskussionen) in den Jahren 2019 bis 2021 versucht, ergebnisoffen die Wirkungsweise der SF-Anlage zu ergründen und – soweit möglich – auch zu belegen. Auch wurden – mit nur mäßigem Erfolg – vom Hersteller ergänzende Auskünfte und Hinweise angefragt, die dann – soweit

verwertbar – in das weitere Messprogramm einflossen. Schlussendlich führten die Untersuchungen zu folgenden Ergebnissen:

- Gegenüber der Lehrerstimme allein ist die durch die SF-Anlage messtechnisch nachgewiesene Verstärkung mit nur 2 dB gering.
- Auch die Verbesserung der Sprachverständlichkeit konnte nur in geringem Umfang nachgewiesen werden (bei schlechter Klassenraumakustik etwas mehr als bei guter).
- Die SF-Lautsprechersäule verhält sich nur bis etwas mehr als 1 m Abstand wie ein Linienstrahler, aber spätestens ab 2 m wie eine Punktschallquelle.
- Die vom Hersteller beschriebene Pegelanhebung im Klassenraum beruht im Wesentlichen auf dem (falschen) Vergleich mit der Lehrerstimme im Freifeld.
- Die SF-Lautsprechersäule allein (bei Anwendung zur Raumbeschallung) hat einen recht „verbogenen“ und für Beschallungsaufgaben unbefriedigenden Frequenzgang. Offenbar hat das Mikrofon eine entsprechende „Vorverzerrung“, mit der bei Sprachübertragung ein Ausgleich stattfindet.
- Für eine echte Raumbeschallung ist die akustische Leistung der SF-Lautsprechersäule (auch bei Vollaussteuerung) zu klein und unbefriedigend. Nach dem subjektiven Höreindruck klang der Lautsprecher unsauber und keinesfalls präsent.
- Eine dynamische Nachregelung bei Einwirkung von Störgeräuschen („Dynamic“ SoundField) war überhaupt nicht nachweisbar.

Die interessanteste Erkenntnis, welche die Autoren bei all ihren Messungen gewinnen konnten, lässt sich nach Abbildung 25 wie folgt zusammenfassen:
In raumakustisch ungünstigen Klassenräumen mit langer Nachhallzeit ergibt sich durch den Einsatz einer SF-Anlage eine gewisse Verbesserung der Sprachverständlichkeit. Dort wird aber mit SF-Anlage kein so guter Wert erreicht, wie in einem Klassenraum mit kurzer Nachhallzeit, aber ohne SF-Anlage! Die mehrfach in Gutachten gelesene Feststellung „Die Nachhallzeit im Klassenraum ist zu lang und die Raumakustik ungünstig, deshalb sollte eine SF-Anlage zum Einsatz kommen“ verkennt diese Zusammenhänge. Tatsächlich ist es viel sinnvoller, das zur Verfügung stehende Geld in eine raumakustische Verbesserung zu investieren, als in eine technische Anlage.

Eine gute Raumakustik ist vollumfänglich barrierefrei, denn sie ermöglicht die Raumnutzung für Personen mit Hörbeeinträchtigung

- in allgemein üblicher Weise
- ohne Erschwernis und
- ohne fremde Hilfe.

Das soll eine SF-Anlage mal nachmachen.

Carsten Ruhe,
Beratender Ingenieur für Akustik,
und Ralf Malessa,
Hörgeschädigtenpädagoge

Anmerkung: Die Endbearbeitung musste der Erstautor alleine vornehmen, weil der Zweitautor sich auf einer längeren Reise befindet und nicht erreichbar ist. Dennoch sollten die Ausführungen auch seine Zustimmung finden.

Carsten Ruhe hat bereits Lautsprecheranlagen anderer Hersteller messtechnisch überprüft. Die mit der SF-Anlage vergleichbaren Ergebnisse wurden in „Spektrum Hören“ 4/2013 veröffentlicht.

Hinweise zur akustischen Gestaltung von Klassenräumen gibt es

- *auf der Internetseite https://t1p.de/Klassenraumakustik*
- *im DSB-Ratgeber „Hörgeschädigte Kinder in Regelschulen“ (https://t1p.de/DSB-Klassenraumakustik)*
- *inklusive Kostenaufstellung an einem Beispiel in „Spektrum Hören“* 3/2018, Seite 9ff.

Literatur

DIN (2008) DIN EN ISO 3382-2:2008-09 Akustik, Messung von Parametern der Raumakustik, Nachhallzeit in gewöhnlichen Räumen

DIN (2016) DIN 18041:2016-03 Hörsamkeit in Räumen, Anforderungen, Empfehlungen und Hinweise zur Raumausstattung

Krieger F und Tchorz J (2011) Studie zum Praxisnutzen von SoundField-Systemen in Klassenräumen, Hörakustik 9

Krieger F (2015) SoundField-Systeme – Möglichkeiten der akustischen Verbesserung von Schulräumen und der pädagogische Nutzen in Grundschulklassen in: Marion Hermann-Röttgen und Gero Kerig: besser hören – besser zuhören – besser lernen 2015

Ruhe C (2013) Manches Beschallungssystem bleibt besser ausgeschaltet, Spektrum Hören 4

Ruhe C (2014) Echter Zusatznutzen oder reine Geldverschwendung? Freifeld-Beschallungsanlagen im Test, Hörakustik 2

Truckenmüller E (2019) Wenn Ohren und Kopf Danke sagen, Hörakustik 2