

Schallanalyse eines Autokühlers mit Ventilator

Vergleichende Ortung mit Schallpegelmesser, Beamforming, Holographie und Intensitätssonde

Prof. Dr.-Ing. S. Maas, Dr.- Ir. V. Hanus, Ing.-Ind. K. Adam, Faculté des Sciences, de la Technologie et de la Communication, Université du Luxembourg

Kurzfassung

Es wurde die Schallentstehung an einem Autokühler (56 x 40 x 15 cm) mit Ventilator ($\Phi 42$ cm) in einer Labormessung am weich aufgehängtem Kühler untersucht, wobei verschiedene Verfahren zur Schallquellenortung getestet wurden. Es wird über die Messungen, deren Ergebnisse und deren Probleme berichtet, die sich aus der Luftströmung und aus dem 3-dimensionalen Messobjekt (15 cm Dicke) ergeben. Die Messung wurde durch DELPHI Powertrain Systems Luxemburg initiiert und von dort begleitet. Die Interpretation bezüglich der Schallentstehung ist nicht ganz eindeutig.

1. Schallmessungen

In dieser Untersuchung sollte die Schallentstehung sowie die Schallquellenortung mit verschiedenen Messgeräten am praktischen Beispiel eines Autokühlers mit Ventilator vergleichend durchgeführt werden (Bild 1). Dieser Kühler wurde in einem Laborraum der Universität in einem Gestell weich aufgehängt und vermessen.

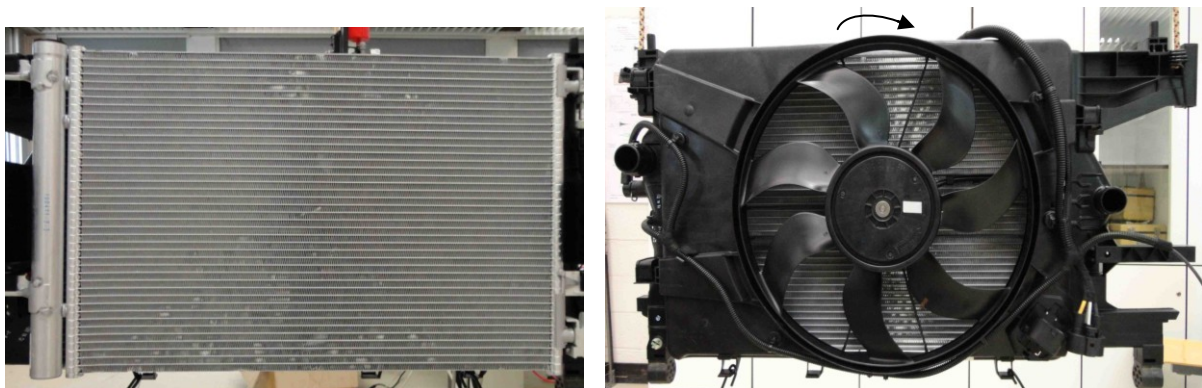


Bild 1: Saugseite (links) und Druckseite (rechts) des frei/weich aufgehängten Autokühlers

Zur Mikrofonmessung wurde das Soundlevelmeter von B&K Typ 2250 verwendet. Zur Quellenortung wurde der CAE Noise Inspector Version 3.4 benutzt, kombiniert mit einem 70 x 50 cm Messgitter bestehend aus 8x6 Kondensatormikrofonen (PCB Typ 130D20) mit Schaumstoff-Windschutz (Typ 079A07), wodurch sich ein Mikrofonabstand von 10 cm ergab (Bild 2). Die Schallintensität wurde mit dem CAE Intensity Inspector Version 2.3 und mit der MICROFLOWN PU Schallintensitätssonde gemessen [4].

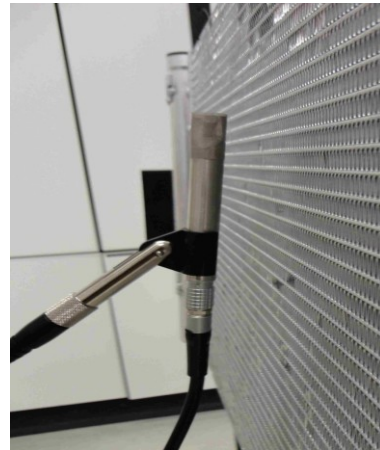
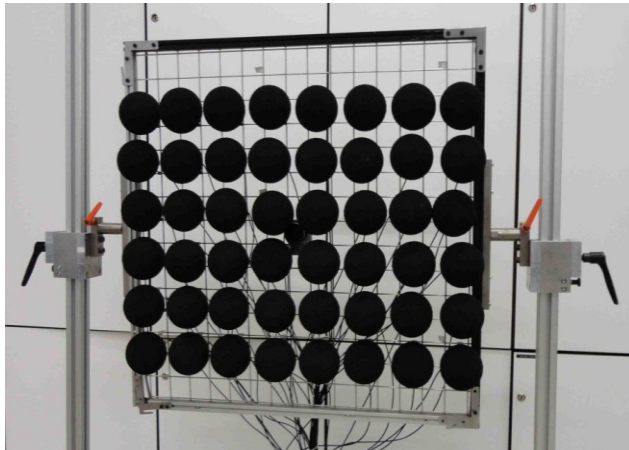


Bild 2: Mikrofonarray und Intensitätssonde

In verschiedenen Abständen in 1m-Schritten wurden an 6 Punkten die Messungen durchgeführt (Bild 3).

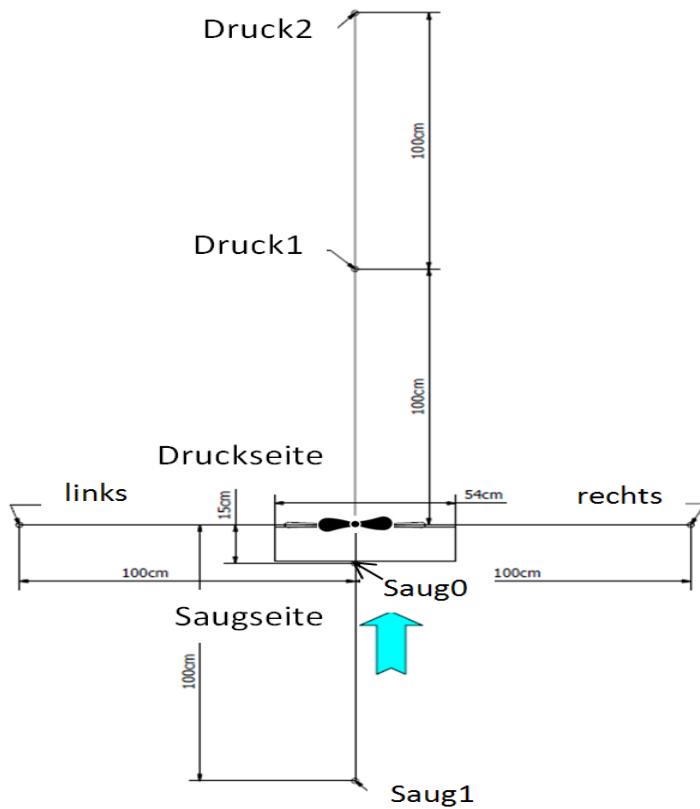


Bild 3: Messaufbau und Messpunkte; Pfeil zeigt die Strömungsrichtung.

Die normale Drehzahl des Ventilators beträgt 28 Hz oder 1680 1/min. Bild 4 zeigt beispielhaft im Messpunkt „Saug1“ den mit dem Soundlevelmeter gemessenen Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Drehzahl. Es sind keine ausgeprägten Resonanzeffekte feststellbar, sondern eine stetige Zunahme mit der Drehzahl.

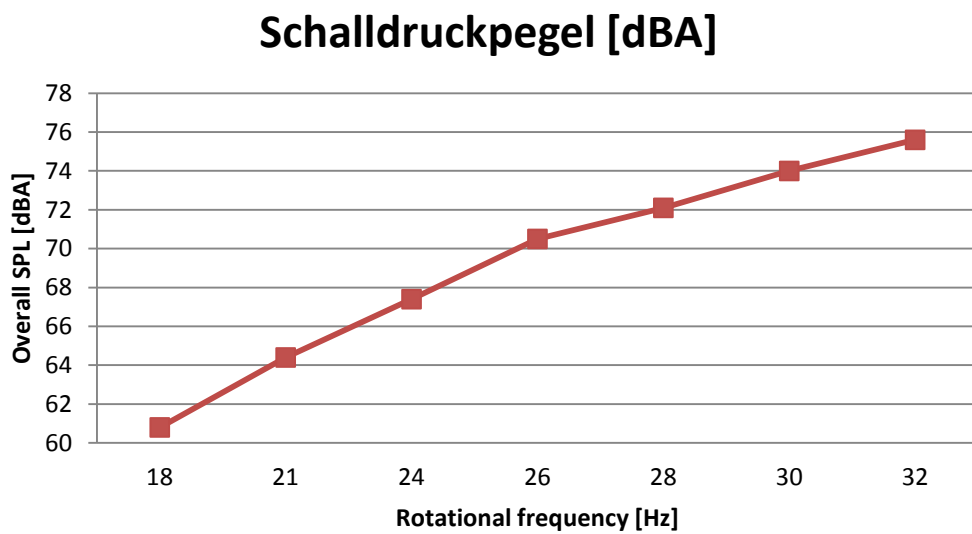


Bild 4: Schalldruckpegel über der Drehzahl des Ventilators am Messpunkt „Saug1“.

Eine Spektralanalyse (Bild 5) von Schalldruck, Schallschnelle und Intensität verdeutlicht den Einfluss der höheren Harmonischen von der Drehzahl. Der Motor hat 8 Polpaare und der Ventilator 7 Flügel und es zeigen sich fast alle Vielfachen der Drehzahl in mehr oder weniger ausgeprägter Form.

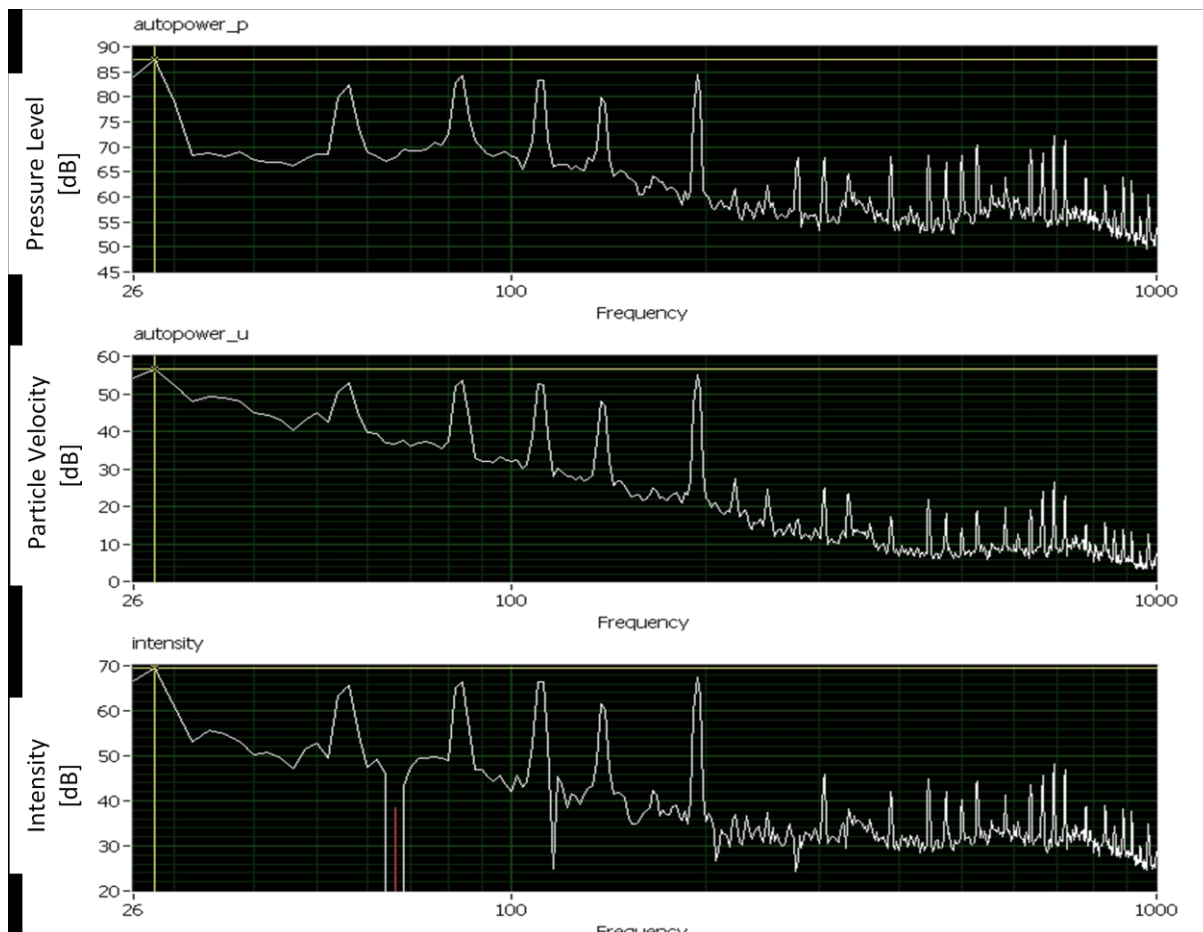


Bild 5: Spektralanalyse (Wirkleistungsdichte- oder Autopowerspektrum) des Schalldrucks, der Schallschnelle und Schallintensität bei einer Rotordrehzahl von 28 Hz am Messpunkt „Saug0“.

Die Aufteilung in Terzen mit anschließender Analyse der Beiträge zum Gesamtschall in Bild 6 zeigt, dass der akustisch wirksame Frequenzbereich zwischen 630 und 2000 Hz liegt, was für alle 6 untersuchten Messpunkte gilt.

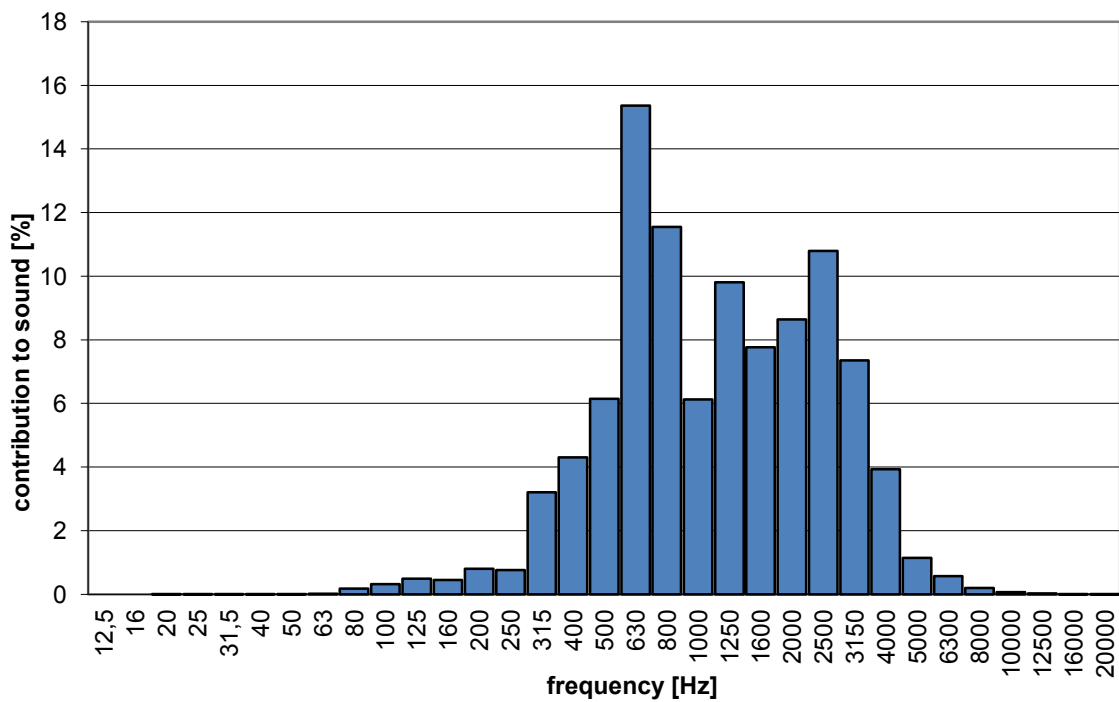
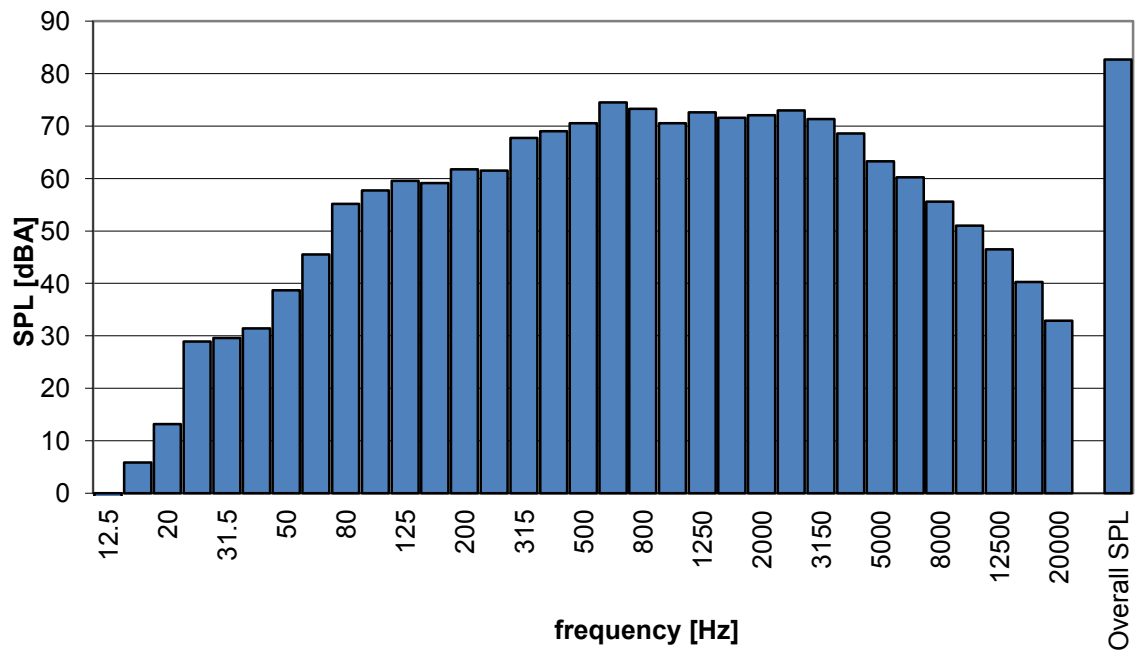


Bild 6: Terzanalyse mit Aufschlüsselung der Anteile zum Gesamtschall nach dem Pegeladditionsgesetz für den Messpunkt „Saug0“ bei einer Drehzahl von 28 Hz.

An einigen Messpunkten ist die Terz 630 dominant (Bild 6), an anderen Punkten dagegen die Terz 800 (Bild 7), was den Autoren nicht ganz verständlich ist.

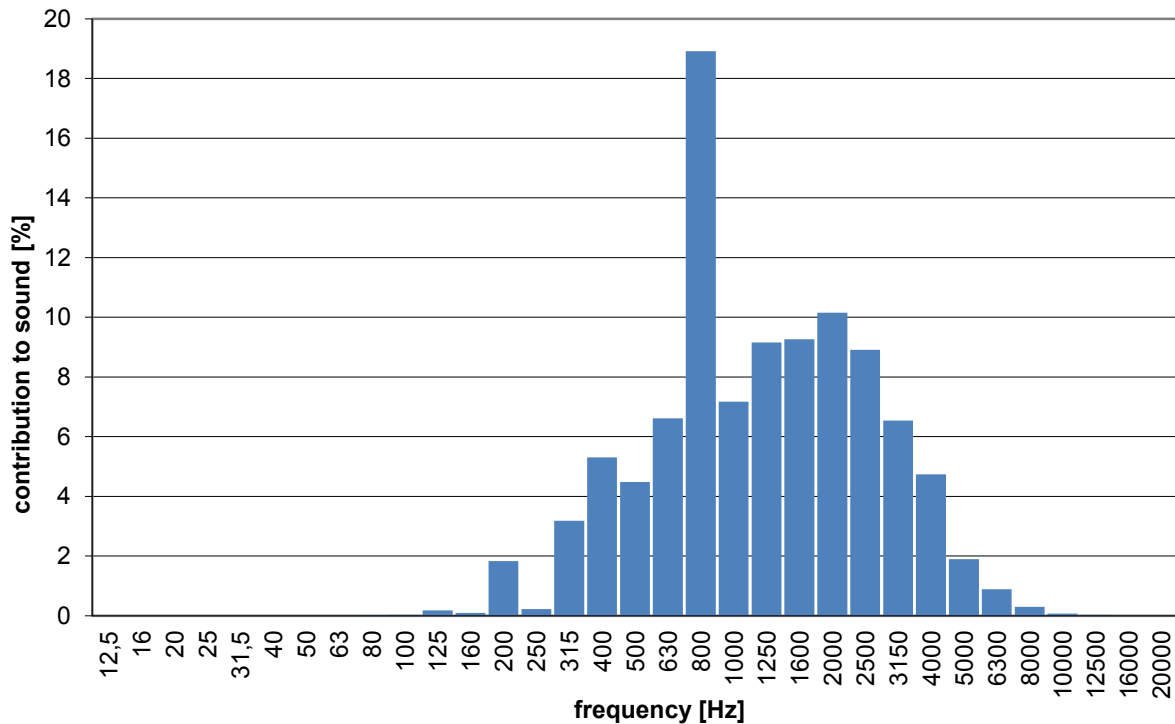


Bild 7: Aufschlüsselung der Anteile zum Gesamtschall nach dem Pegeladditionsgesetz für den Messpunkt „Druck2“.

Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die gemessenen Schalldrücke, sowie die dominante Terz.

Tabelle 1: Gemessene Schalldrücke und dominante Terz

Messpunkt (Bild 3)	Schalldruck [dBA]	Dominante Terz [Hz]
Rechts	68	800
Links	69	1000
Saug0	82	630
Saug1	72	630
Druck1	72	630
Druck2	68	800

2. Schallquellenlokalisierung

Es wurde ein Abstand der Mikrofonstirnfläche (also ohne Windschutz) im Messpunkt „Saug0“ vom Kühler von 10 cm gewählt, so dass durch den stets benutzten Windschutz der Mikrophone dieser so nah wie möglich an der Saugseite des Kühlers war (Bild 2 und Bild 14), ohne diese jedoch zu berühren. Bei der Holographie mit SONAH (Statistically Optimal Near-field Acoustical Holography) ist die räumliche Schallquellen-Auflösung allein proportional zum Mikrofon-Schallquellenabstand L , während diese beim Beamforming zusätzlich vom Gitterdurchmesser D und der Wellenlänge λ abhängt, genauer $1.22 L \lambda / D$ [1]. Dadurch ergibt sich eine deutlich bessere Auflösung bei niedrigen Frequenzen mit der Holographie im Vergleich zum Beamforming [2]. Bei den hohen Frequenzen begrenzt das räumliche SHANNON Theorem die Analyse, da die höchste erfassbare Frequenz durch mindestens 2 Mikrophone erfasst werden muss. In anderen Worten bedeutet dies, dass die Hälfte der kleinsten erfassbaren Wellenlänge $\lambda_{\min}/2$ größer als der Gitterabstand zwischen den Mikrophonen sein muss. In den hier diskutierten Versuchen betrug der Mikrofon-Gitterabstand 10 cm und daher die höchste lokalisierbare Schallquellenfrequenz ca. 1700 Hz bei dieser Arrayanordnung. Dieses Gitter war, wie bereits gesagt, auf der Saugseite des Ventilators platziert, weil auf der Druckseite die Strömungsgeräusche zu gross waren und nur das Mikrophongitter als Schallquelle abgebildet wurde.

Es wurden nun Beamforming, Holographie und Schallintensitätsmessungen durchgeführt, die nachfolgend miteinander verglichen werden.

Analysiert man beispielsweise die dominante Terz 630 nach Bild 5 (Messpunkt Saug0 nach Tab.1) mittels Beamforming, so erhält man Bild 8, was die schlechtere Auflösung dokumentiert und überdies einen Schalldruckpegel (48.7-54.7 dB) liefert, welcher sich auf einen Abstand von 1m bezieht. Tatsächlich wurden dort aber ein Gesamtpegel über alle Frequenzen von 72 dBA (Tab.1) gemessen. Der Ventilator befindet sich stets auf der Druckseite und ist von der Saugseite (=Messeite) unsichtbar. Zur Verdeutlichung wurde aber ein gespiegeltes Foto der Rückseite eingeblendet. Das Maximum im Bild ist leicht nach rechts verschoben und passt damit nicht zu den Messungen nach Tabelle 1, wobei Schallquelle und max. Pegel durchaus auf verschiedenen Seiten liegen können, wenn die Quelle gerichtet ist.

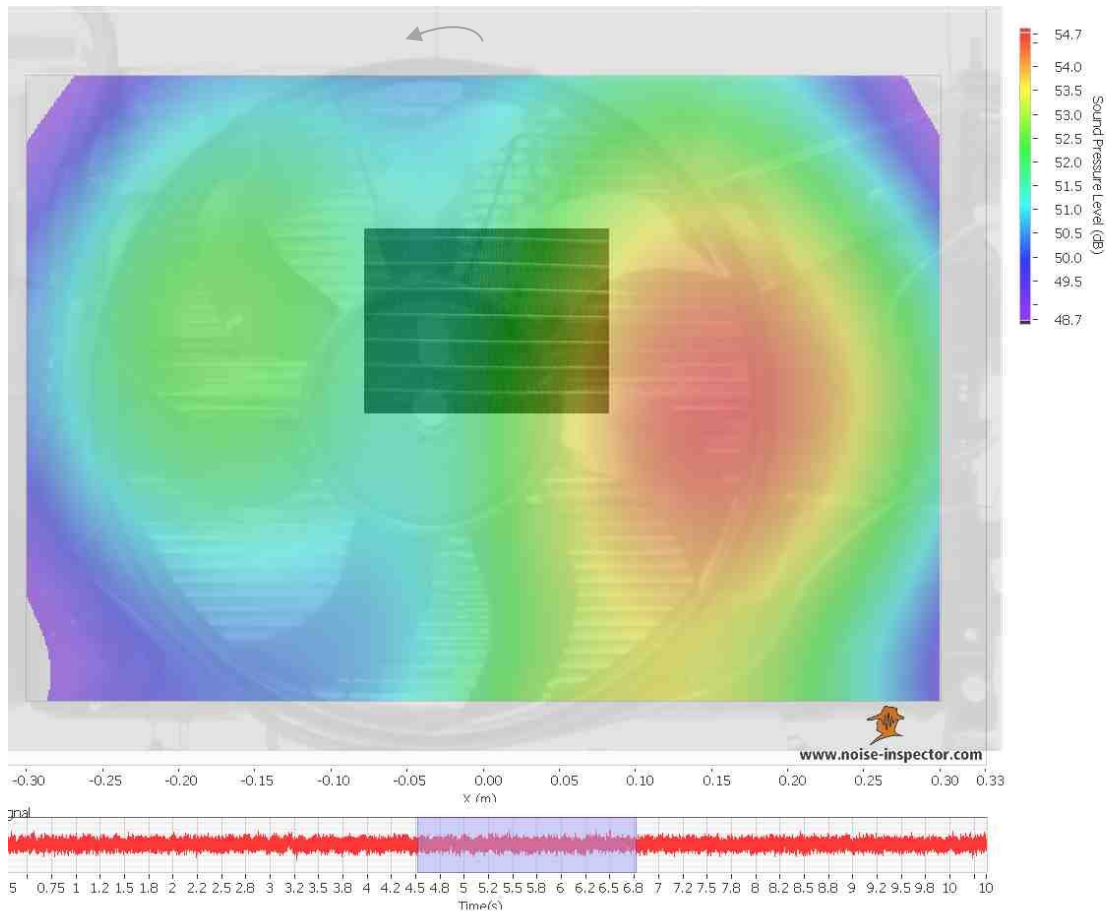


Bild 8: Beamforming Frequenzbereich 561-707 Hz (also Terz 630Hz), T=2,3 s, Messpunkt „Saug0“.

Im Nahfeldbereich ist das Beamforming aber problematisch, da von Monopolen ausgegangen wird, die sehr unterschiedliche Distanzen zu den einzelnen Mikrofonen aufweisen, was rechnerisch korrigiert wird und bei sehr kleinen Abständen zu Fehlern führen kann [4]. Deshalb wurde die Beamforming-Messung im Abstand von 1 m (Messpunkt „Saug1“) wiederholt, was die Auflösung verschlechtert und praktisch keine Quellen mehr aufzeigt, mit leichter Asymmetrie nach rechts (Bild 9). Die max. Pegel liegen dort bei 61.7 dB und passen damit gut zu den Mikrofonmessungen in diesem Messpunkt für diese Terz, die aber aus Platzgründen hier nicht gezeigt sind. Damit hat man wohl eine korrekte Messung, aber eben keine präzise Lokalisierung.

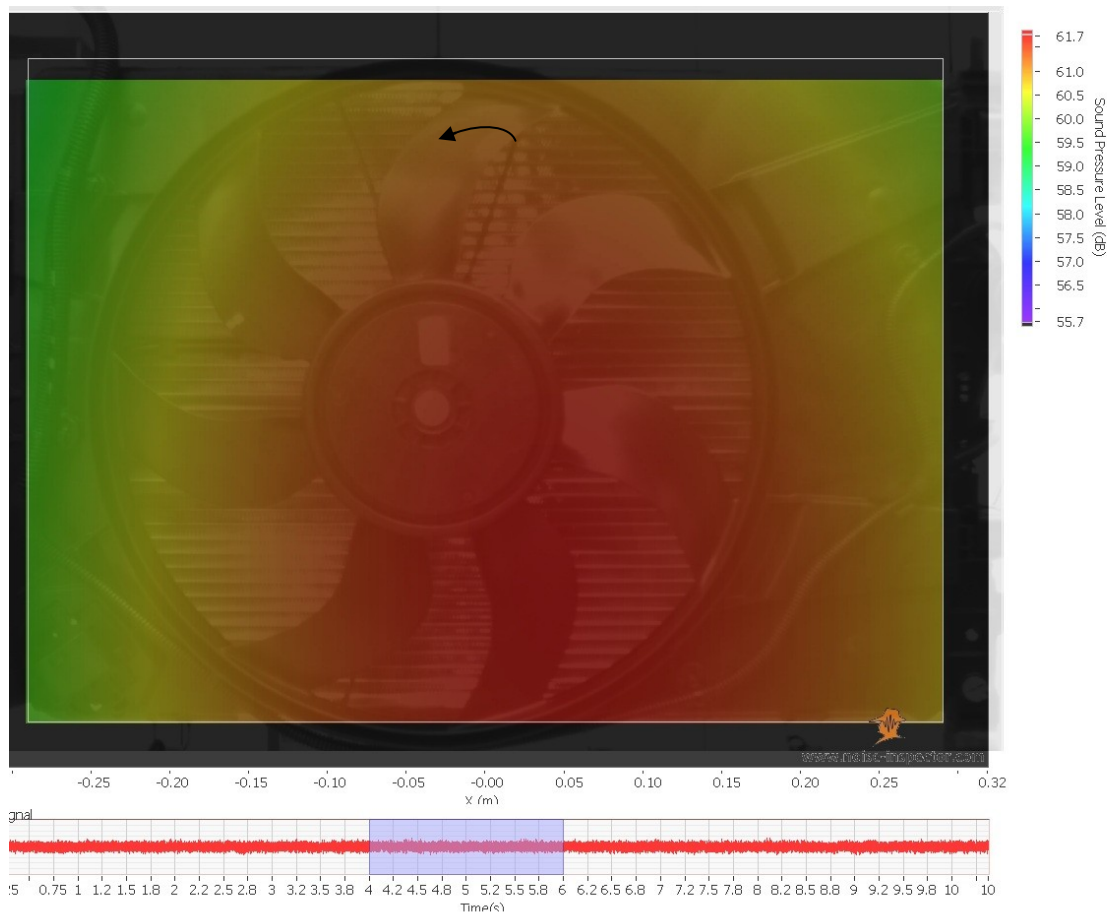


Bild 9: Beamforming Frequenzbereich 561-707 Hz (Terz 630Hz), T=2s, Messpunkt „Saug1“.

Wenn dieselbe Terz mittels SONAH analysiert wird, ergibt sich Bild 10. Hier wird der Schalldruck in der Berechnungsebene ermittelt, und nicht wie beim Beamforming auf 1 m Entfernung umgerechnet [4]. Der max. Schallpegel von knapp 88 dB ist etwas zu hoch. Für die fehlende A-Bewertung können bei dieser Terz knapp 2 dB abgezogen werden, aber man kommt nicht auf die 74 dBA, die in dieser Terz nach Bild 6 mit dem Mikrofon gemessen wurden. In Bild 10 ist diesmal eine leichte Asymmetrie oder Verschiebung des Maximalpunktes nach links erkennbar, was mit den Pegelmessungen nach Tabelle 1 besser übereinstimmt und für die 800 Hz Terz ebenfalls zutrifft, wie Bild 11 zeigt. Die Beamforming-Messungen in Bild 8 und 9 zeigen in 1m Entfernung das Schalldruckmaximum allerdings rechts, was möglicherweise mit gerichteten Quellen erklärbar ist oder leider auch einfach falsch, wie in Bild 13 später erläutert.

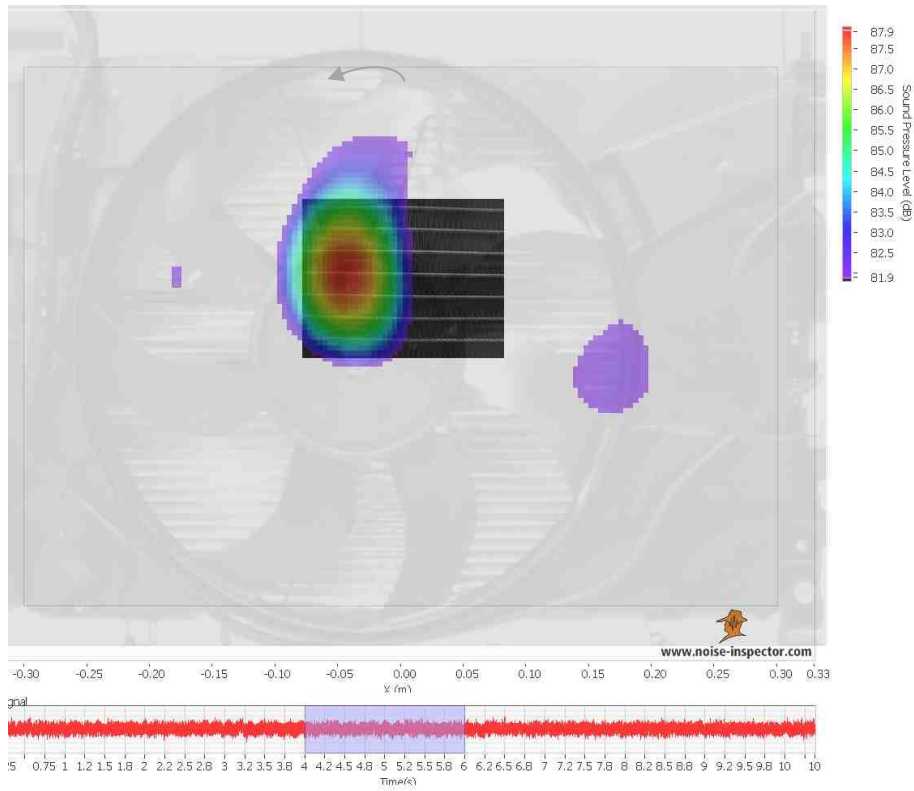


Bild 10: Holographie im Frequenzbereich 561-707 Hz (Terz 630Hz), T=2s.

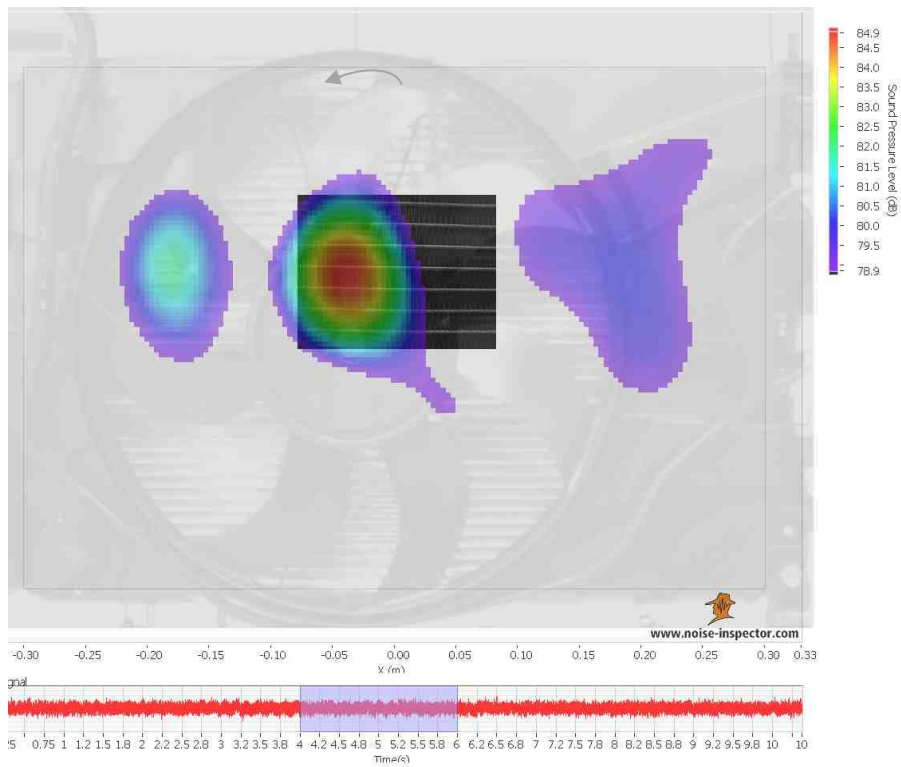


Bild 11: Holographie im Frequenzbereich 707-891 Hz (also Terz 800 Hz), T=2s.

In Bild 12 ist nun die mittels MICROFLOWN Sonde gemessene Intensität gezeigt, mit einer deutlichen Verschiebung des Zentrums nach rechts wie in Bild 8 und 9, welche aber eben nicht zu Tab. 1 und den Bildern 10-11 passt. Die gemessenen Intensitätspegel liegen zwischen 71 und 78 dB und sind damit anders als der Schalldruck, was zumindest im Fernfeld nicht so sein sollte. Möglicherweise wird die Microflown Intensitätssonde auch durch die Luftströmung des Ventilators stark beeinflusst.

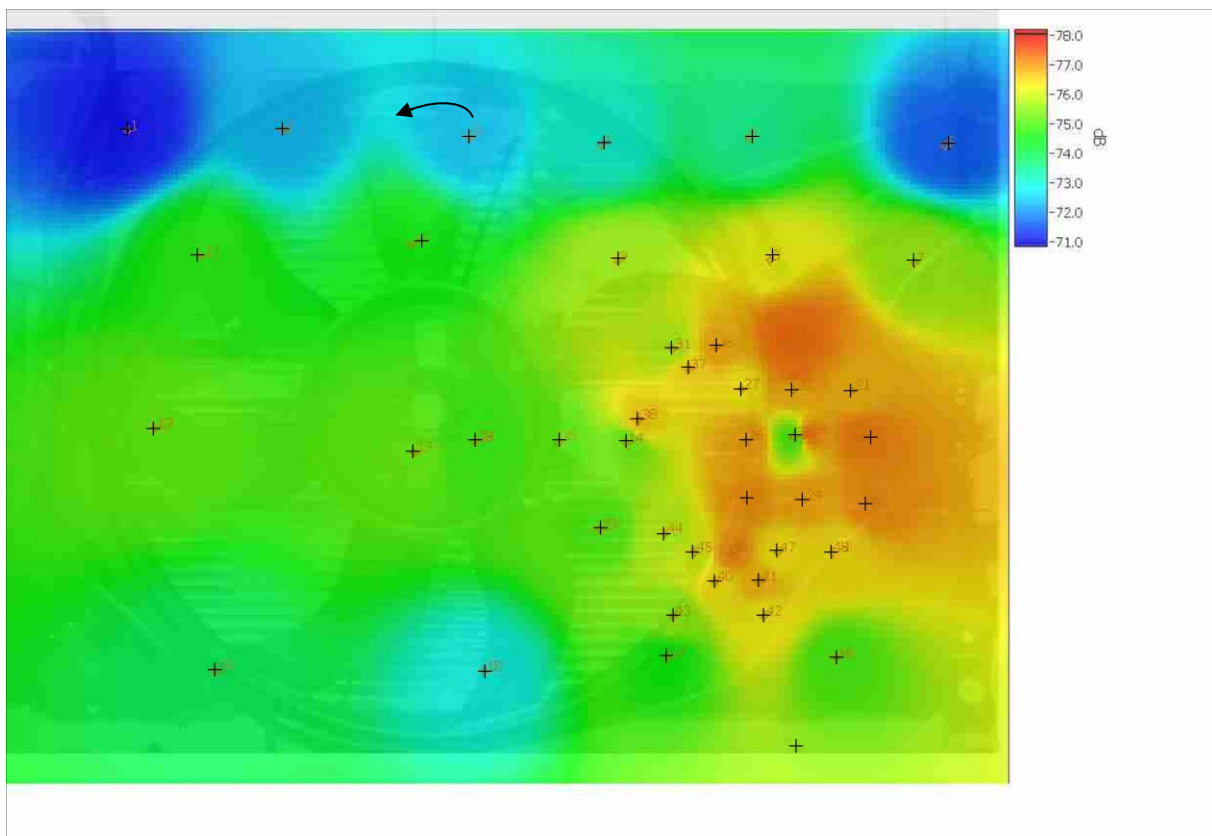


Bild 12: Intensitätsmessung (Kennzeichnung der Messpunkte +) $\Delta f=561-707$ Hz (also Terz 630Hz), $T=2s$.

Desweiteren soll der Einfluss der angenommenen Auswertedistanz auf die Schallkartierung untersucht werden (Bild 13). Tatsächlich ist der Kühler zusammen mit dem Lüfter ca. 15 cm breit und damit ein 3-dimensionales und nicht ebenes Objekt. Jede beliebige Entfernung von 8-25 cm vom Mikrofon bis zur Schallquellenebene kann daher zunächst angenommen werden. Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass der physikalische Abstand (Mikrofonstirnfläche zu Kühlerfront 10 cm) im Versuch nicht geändert wurde, sondern

lediglich in der Auswertesoftware ein anderer Wert zwischen fiktiver Quelle und Mikrofonen eingegeben wurde.

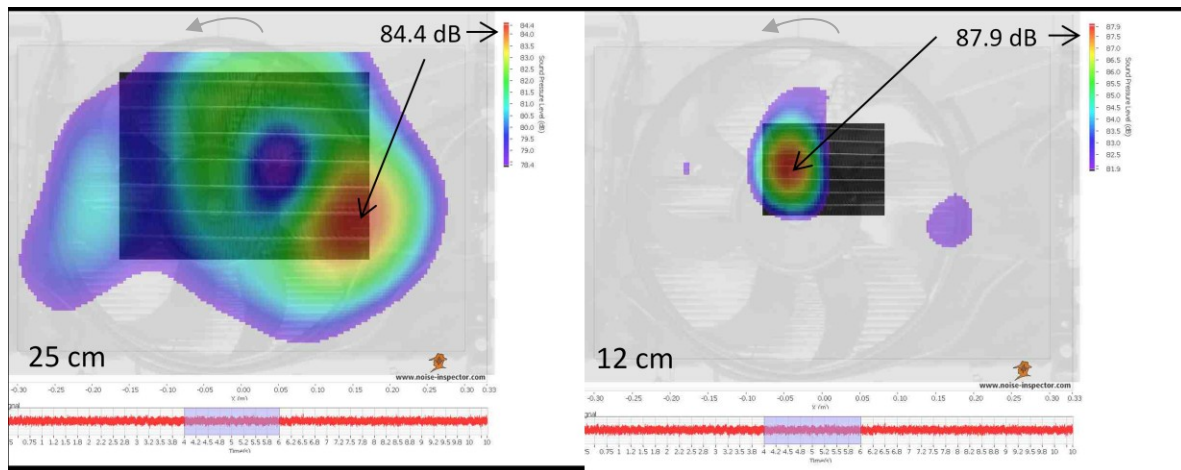


Bild 13: SONAH-Auswertung mit 2 verschiedenen angenommenen Entfernungen, Terz 630Hz.

Die max. Pegel fallen mit dem angenommenen Abstand von 87.9 dB bei 12 cm auf 84 dB bei 25 cm, aber die Lokalisierung der Quelle ist doch deutlich unterschiedlich und zwar einmal rechts und einmal links der Mitte. Geht man davon aus, dass der Lüfter hinter dem Kühler und nicht der Kühler die Hauptquelle ist, so erscheint der größere Abstand von 25 cm realistischer. Diese Annahme begründet sich durch die Dominanz der niederfrequenten Terzen in den Bildern 6 und 7, die kaum vom Kühler modifiziert werden dürften. Eine Messung ohne den Kühler, d.h. nur mit dem Ventilator allein, könnte hier eventuell Aufschluss geben, obwohl dann natürlich das Gesamtsystem verändert würde, was auch wieder neue Schwierigkeiten nach sich zieht.

Zur Untersuchung des Einflusses der Auswertzeit wurden verschiedene Intervalllängen T zur Auswertung der Terz 630 Hz (561-707 Hz) gewählt. Bei der numerischen Fouriertransformation ist der diskrete Frequenzlinienabstand $\Delta f = 1/T$, d.h. definiert durch das Zeitintervall T . Wenn letzteres sehr kurz wird, so wird Δf groß und es liegen nur wenige Punkte in der untersuchten Terz und das Ergebnis wird entsprechend unsicher, wie das nachfolgende Bild 14 zeigt. Ab etwa $T=50$ ms (also $\Delta f = 20$ Hz) haben wir 7 Frequenzstützpunkte in dieser Terz und erhalten ein stabiles Ergebnis, was den Pegel und die Lokalisierung angeht.

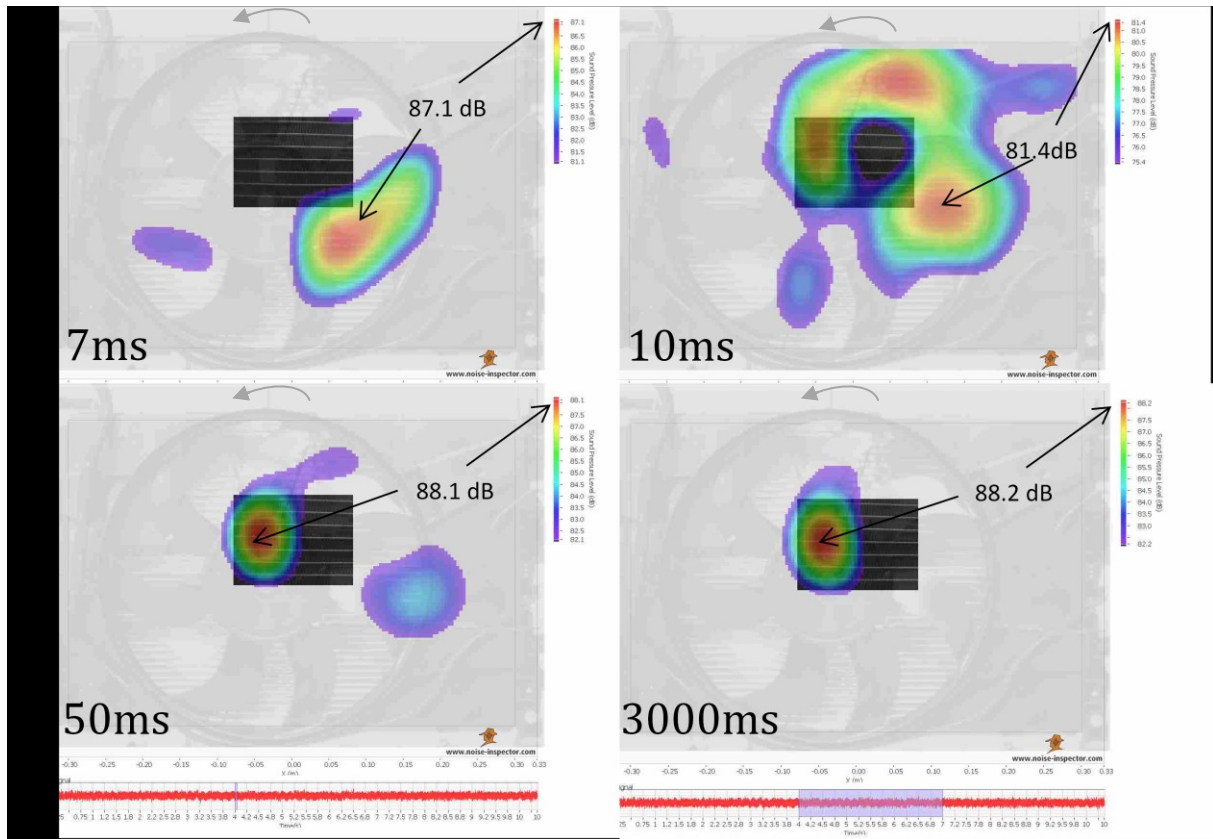


Bild 14: SONAH-Auswertung mit verschiedenen Zeitintervalllängen, Terz 630Hz.

Zum Abschluss wurde das System künstlich zu Testzwecken verändert, indem ein Segment von ca. 30° Öffnungswinkel zwischen Ventilator und Kühler mit Pappkarton abgeklebt wurde, wie in Bild 15 zu erkennen ist, was aber leider mit keiner der vorgestellten Methoden feststellbar war.



Bild 15: Abklebung eines Segmentes mit Pappkarton zu Testzwecken

Zusammenfassung

Ein Autokühler mit Ventilator wurde schalltechnisch mit Schallpegelmessern, Beamforming, Nahfeldholographie und Intensitätssonde untersucht. Der Schall entsteht natürlich am und durch den Lüfter und wird durch den Kühler verstärkt. Die Mikrofonmessungen bei verschiedenen Drehzahlen zeigen, dass es keine Resonanzeffekte gibt, sondern eine breitbandige Anregung durch die höheren Harmonischen der Drehzahl im akustisch relevanten Bereich. Der Luftstrom des Ventilators erlaubt nur Nahfeldmessungen von der Saugseite, nicht von der Druckseite, weil dort die Luftgeschwindigkeiten und Strömungsgeräusche an den Mikrofonen und durch die Mikrophone zu hoch sind. Zusätzlich handelt es sich beim untersuchten Objekt um eine räumliche und nicht nur ebene Schallentstehung, so dass letztlich keine eindeutige ebene Lokalisierung möglich war. Das Schallzentrum scheint rechts zu liegen, weil Beamforming und Intensitätssonde dies so wiedergeben und die Holographie mit richtiger Entfernungsangabe dies bestätigt. Trotzdem ist die Auflösung nicht ausreichend, um eine genaue Identifikation der Schallquellen durchzuführen.

Literatur:

- [1] Hald J., Combined NAH and Beamforming Using the same array; Brüel & Kjaer Technical Review No.1 2005
- [2] J.J. Christensen and J. Hald, "Beamforming", Brüel&Kjær Technical Review, 2004
- [3] Archive of the Berlin Beamforming Conference (BeBeC) www.bebec.eu
- [4] CAE-Engineering, www.cae-systems.de