

Versuchs- und Lehranstalt  
für Brauerei in Berlin e.V.



**VLB**  
BERLIN

*Forschungsthema:*

## Lärmreduzierung bei Getränkeabfüllanlagen



Forschungsnetzwerk  
Mittelstand

*AiF-Vorhaben-Nr.:*

16291 N

*Name der Forschungsstelle(n):*

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V. / Forschungsinstitut  
für Maschinen- und Verpackungstechnik

Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW /  
Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT)



Industrielle  
Gemeinschaftsforschung

*Kontakt:*

Dr.-Ing. Georg Wenk, wenk@vlb-berlin.org

Dr.-Ing. Tobias Voigt, tobias.voigt@wzw.tum.de

*Bewilligungszeitraum:*

1.1.2010 – 31.8.2011

# SCHLUSSBERICHT



WISSEN  
SCHAFFT  
QUALITÄT

## **Impressum**

### **Herausgeber:**

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.  
Forschungskoordination - Gerhard Andreas Schreiber  
Seestraße 13, 13353 Berlin, Deutschland

Vereinsregister-Nr.: 24043 NZ, Amtsgericht Berlin-Charlottenburg

[www.vlb-berlin.org](http://www.vlb-berlin.org)

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Alle Rechte vorbehalten, sofern nicht im Text nicht anders angegeben.

Kein Teil des Berichts darf ohne schriftliche Genehmigung des Herausgebers in irgendeiner Form reproduziert werden.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen in Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

All rights reserved (including those of translation into other languages).

No part of this book may be reproduced in any form.

# Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Nr. 1: Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V., Forschungsinstitut für Maschinen- und Verpackungstechnik (FMV), Seestraße 13, 13353 Berlin

Nr. 2: Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW, Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT), Weihenstephaner Steig 22, 85350 Freising-Weihenstephan

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur  
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben **16291 N**

**Lärmreduzierung bei Getränkeabfüllanlagen**

(Bewilligungszeitraum: 01.01.2010 - 31.08.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V., Seestraße 13, 13353 Berlin

Fst. 1: Dr.-Ing. Georg Wenk

Fst. 2: Dr.-Ing. Tobias Voigt

BERLIN, 29.12.2011

Ort, Datum

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)  
an der/den Forschungsstelle(n)

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Danksagung

Die Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) – Forschungsinstitut für Maschinen- und Verpackungstechnik (FMV) sowie die Technische Universität München – Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT) möchten sich bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF) und beim Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) für die Bewilligung und Finanzierung dieses Vorhabens bedanken.

Für die großzügige personelle und materielle Unterstützung des Forschungsvorhabens möchten wir uns besonders bei den Mitgliedern des Projektbegleitenden Ausschusses und deren, an diesem Vorhaben beteiligten Mitarbeitern bedanken:

Ralf Krieger, Badische Staatsbrauerei Rothaus AG

Prof. Dr. Josef Schrädler und Mario Schäfer, Bayerische Staatsbrauerei Weihenstephan

Bodo Böttcher und Christian Schwarzhof, Cölner Hofbräu P. Josef Früh KG

Dr. Wolfgang Probst, DataKustik GmbH

Wilhelm Kloppert, Feldschlösschen Brauerei GmbH

Ulrich Scholz, Sascha Freier, Peter Fuhrmann und Wolfgang Buchkremer, KHS GmbH

Werner Nophut, Nophut GmbH

Sebastian Jost und Herrmann Stigler, Ziemann-BMS Maschinenfabrik GmbH

Das IGF-Vorhaben 16291 N, der Forschungsvereinigung Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin e.V., Seestraße 13, 13353 Berlin, in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik der Technischen Universität München, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie



ALLIANZ  
INDUSTRIE  
FORSCHUNG

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	3
Inhaltsverzeichnis .....	4
1 Zusammenfassung der Ergebnisse .....	6
2 Zielsetzung.....	7
2.1 Ausgangssituation .....	7
2.2 Forschungsziele .....	8
3 Grundlagen .....	9
3.1 Schall.....	9
3.2 Beamforming.....	11
4 Material und Methoden .....	13
4.1 Akustische Kamera .....	13
4.2 Akustische Abschirmung mit Schnellwechsellplatte .....	14
4.3 Stativ SABA ST100 mit arretierbaren Rollen .....	16
4.4 Messwagen und Kabeltrommel mit feststehenden Buchsen .....	17
4.5 Noiseldatei Version 4.1.2.....	18
4.6 Flaschentransportstrecke.....	19
4.6.1 Die Steuerungsarchitektur der Pilotanlage .....	20
4.6.2 Vergleichbarkeit des Pilotrundläufers mit einer industriell genutzten Anlage.....	21
4.7 Schallpegelmessgerät.....	21
5 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse .....	22
5.1 Arbeitsschritt 1: Akustische Modellierung .....	22
5.1.1 AS 1.1: Erfassen potentieller Schallquellen.....	22
5.1.2 AS 1.2: Physikalische Modellierung der Schallentstehung durch Behälter.....	25
5.1.3 AS 1.3: Qualitatives Gesamtmodell einer idealisierten Getränkeabfüllanlage .....	27
5.2 Arbeitsschritt 2: Messverfahren.....	31
5.2.1 AS 2.1: Konzeption eines Messverfahrens auf Basis der akustischen Kamera .....	31
5.2.2 AS 2.2: Testmessungen und Optimierung des Messverfahrens .....	42
5.2.3 AS 2.3: Schallquellenanalyse in Abfüllanlagen .....	58
5.2.4 AS 2.4: Reproduzierbarkeitsversuche im Technikum.....	59
5.2.5 AS 2.5: Definition des Messverfahrens; Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen .....	63
5.3 Arbeitsschritt 3: Maßnahmen zur Lärmreduzierung.....	79
5.3.1 AS 3.1: Umbau und Inbetriebnahme der Technikumsanlage .....	79
5.3.2 AS 3.2: Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke.....	80
5.3.3 AS 3.3: Technische Maßnahmen – Primäre Lärmschutzmaßnahmen.....	81

5.3.4	AS 3.4: Technische Maßnahmen – Sekundäre Lärmschutzmaßnahmen; Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen.....	86
5.3.5	AS 3.5: Entwicklung der Regelungsstrategie und Algorithmierung; Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure .....	89
5.3.6	AS 3.6: Implementierung in die Technikumsanlage.....	102
5.3.7	AS 3.7: Test und Bewertung.....	103
5.4	Arbeitsschritt 4: Allgemeine Arbeiten.....	110
5.4.1	AS 4.1: Projektmanagement.....	110
5.4.2	AS 4.2: Projektbegleitender Ausschuss.....	110
5.4.3	AS 4.3: Leitfäden und Kataloge.....	110
5.4.4	AS 4.4: Berichterstattung.....	112
6	Gegenüberstellung von Zielsetzung und Ergebnissen.....	113
6.1	Zielsetzung.....	113
6.2	Ergebnisse.....	114
6.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	114
7	Nutzen der erzielten Ergebnisse.....	115
7.1	Wissenschaftlich-technischer Nutzen für KMU.....	115
7.2	Wirtschaftlicher Nutzen für KMU.....	115
7.3	Innovativer Beitrag der Ergebnisse.....	116
7.4	Industrielle Anwendungsmöglichkeiten.....	116
8	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	117
8.1	Bereits durchgeführten Transfermaßnahmen.....	117
8.2	Konkret geplante Transfermaßnahmen.....	117
8.3	Weitere Transfermaßnahmen.....	117
9	Durchführende Forschungsstellen.....	119
10	Anhang.....	120
10.1	Literaturhinweise.....	120
10.2	Abkürzungen und Symbole.....	123
10.3	Abbildungsverzeichnis.....	125
10.4	Tabellenverzeichnis.....	127
10.5	Detaildarstellung des Gesamtmodell einer idealisierten Getränkeabfüllanlage.....	128
10.6	Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen.....	129
10.7	Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke.....	165
10.7.1	Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Schalldruckpegel.....	165
10.7.2	Visualisierung der Schallentstehung beim Behälterstoß.....	166
10.8	Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen.....	168

## 1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Das vom Forschungsinstitut für Maschinen- und Verpackungstechnik (FMV) der VLB Berlin und dem Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT) der Technischen Universität München in Kooperation durchgeführte Forschungsvorhaben widmet sich der Lärmreduzierung bei Getränkeabfüllanlagen. Hierfür wurden zwei wesentliche Forschungsziele umgesetzt.

Zum Einen wurde ein neues Messverfahren auf Basis einer Akustischen Kamera entwickelt und mit diesem Schlussbericht als „Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen“ (Arbeitsschritt AS 2.5) veröffentlicht. Dieses Verfahren besitzt die folgenden Fähigkeiten:

- Ortsgenaue Lokalisierung von stationären und beweglichen Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen.
- Abschirmung gegen, beziehungsweise Ausblenden von Störgeräuschen in Abfüllanlagen.

Einen Auswahl lärmtechnischer Schwachstellen von Abfüllanlagen, die mit diesem Messverfahren identifiziert werden konnten, wurde im „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ (AS 4.3) veröffentlicht.

Das zweite Forschungsziel bestand in der Untersuchung und Optimierung bestehender sowie der Entwicklung neuer Maßnahmen zur Lärmreduzierung in Getränkeabfüllanlagen. Dieses Ziel wurde mit dem „Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure“ (Arbeitsschritte AS 3.3, AS 3.5 und AS 3.6) und den Katalogen „Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke“ (AS 3.2), „Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen“ (AS 3.3) sowie dem „Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen“ (AS 3.4) erreicht, die ebenfalls mit diesem Schlussbericht der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden.

### Fazit

Die erzielten Ergebnisse entsprechen in allen Arbeitspaketen den Zielsetzungen des Forschungsantrages. Mit Bereitstellung der beiden Leitfäden und der Kataloge, wurden alle wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Ziele dieses IGF-Vorhabens erfolgreich umgesetzt.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**



## 2 Zielsetzung

### 2.1 Ausgangssituation

Lärmschwerhörigkeit ist die häufigste Berufskrankheit in der Getränkeindustrie. Jahr für Jahr werden im Bereich der Berufsgenossenschaft Nahrungsmittel und Gaststätten mehr als 200 Verdachtsanzeigen für Lärmschwerhörigkeit gemeldet [17]. Über 50 % dieser Anzeigen stammen aus der Getränkebranche. Ursache ist die erhebliche Lärmbelastung des Personals in Getränkeabfüllanlagen. Die Anlagenbetreiber haben deshalb ein berechtigtes Interesse, die Lärmpegel in ihren Abfüllhallen zu reduzieren.

Hierzu drängt auch die geänderte Gesetzeslage. Durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [49] vom 6. März 2007 wurden die EG-Richtlinien "Physikalische Agenten, Lärm" (2003/10/EG) [41] und „Vibrationen“ (2002/44/EG) [40] in nationales Recht umgesetzt. In der nun geltenden Verordnung werden zwei Auslösewerte für den Tages-Lärmexpositionspegel ( $L_{EX,8h}$ ) und den Spitzenschalldruckpegel ( $L_{pC,peak}$ ) neu definiert:

Untere Auslösewerte:  $L_{EX,8h} = 80 \text{ dB(A)}$       und  $L_{pC,peak} = 135 \text{ dB(C)}$

Obere Auslösewerte:  $L_{EX,8h} = 85 \text{ dB(A)}$       und  $L_{pC,peak} = 137 \text{ dB(C)}$

Werden die oberen Auslösewerte überschritten, so ist ein Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, ein Programm mit technischen und organisatorischen Maßnahmen zur Verringerung der Lärmexposition aufzulegen. Hierbei muss die Lärmemission am Entstehungsort verhindert werden. Technische Maßnahmen haben Vorrang vor organisatorischen Maßnahmen. Die dämmende Wirkung eines persönlichen Gehörschutzes wird bei der Anwendung der Auslösewerte nicht berücksichtigt.

Viele Abfüllbetriebe stehen mit ihren bestehenden Anlagen, zusammen mit dem zuliefernden Maschinenbau, vor der Aufgabe, die Lärmexpositionspegel des Bedienpersonals weiter zu reduzieren. Bei kleinen und mittleren Abfüllbetrieben werden Anlagen aus Kostengründen selten komplett ausgetauscht, sondern sukzessive erneuert. Diese Abfüllanlagen setzen sich aus neueren und älteren Maschinen häufig unterschiedlicher Hersteller zusammen. Gerade bei den älteren Maschinen entspricht die Lärmentwicklung nicht mehr dem Stand der Technik. Hinzu kommen die beengten Platzverhältnisse, wodurch notwendige Mindestabstände zwischen den Aggregaten unterschritten werden und es zur Überlagerung und Verstärkung einzelner Lärmquellen kommt. Deshalb besteht gerade bei den vielen Getränkeabfüllunternehmen kleiner und mittlerer Größe der Wunsch nach innovativen Lärmreduzierungsmaßnahmen, die bei ihren bestehenden, inhomogenen Anlagen zum Einsatz kommen können. Die Schwierigkeit liegt zunächst darin zu erkennen, wo genau der relevante Lärm bei komplexen Abfüll- und Verpackungsanlagen entsteht.

Die Bestimmung des Lärmexpositionspegels  $L_{EX,8h}$  erfolgt nach der DIN EN ISO 9612 [25], entweder als tätigkeitsbezogene Messung, berufsbildbezogene Messung oder als Ganztagesmessung. Hierzu können sowohl ortsfeste Messungen mit einem integrierenden Handschallpegelmesser nach DIN EN 61672 [23] als auch personengebundene Messungen, mit einem am Körper getragenen Personenschalldosimeter nach DIN EN 61252 [22], durchgeführt werden [19]. Die Geräuschmessung an Maschinen erfolgt nach DIN EN ISO 3744 [24] auf einfachen Hüllflächen (siehe Abbildung 1). An wenigen Messpunkten wird der Schalldruckpegel gemessen, der Mittelwert gebildet, das Messflächenmaß addiert und auf diese Weise der Schallleistungspegel bestimmt.



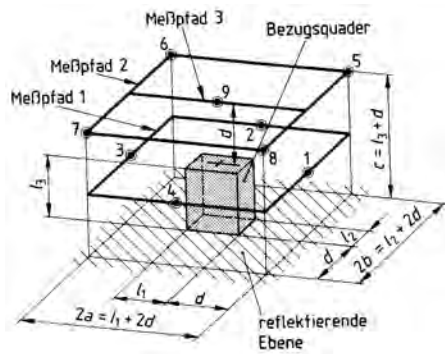


Abbildung 1: Messpfade beim Hüllflächen-Verfahren nach [24]

Die genannten Messverfahren sind geeignet, den zeitlich gemittelten Lärmexpositionspegel des Bedienpersonals zu bestimmen und die Lärmemission von kompletten Maschinen als Gesamtheit zu quantifizieren. Die quaderförmigen Hüllflächen werden allerdings der Geometrie von Maschinen in Getränkeabfüllanlagen häufig nicht gerecht. Zudem ist für zielgerichtete primäre Maßnahmen zur Reduzierung der Schallemission eine ortsgenaue Zuordnung der Lärmstehung über die Zeit notwendig. Diese ist mit den bisher eingesetzten Messverfahren nicht möglich. Auch für die räumliche Prognose der zu erwartenden Schallpegel bei der Planung von kompletten Neuanlagen ist die ortsgenaue Kenntnis von Schallmittelpunkten erforderlich. Von großen Maschinenbauunternehmen wurden bereits numerische Simulationen durchgeführt, um Lärmkataster für Abfüllhallen zu erstellen [16]. Die ungenaue Datengrundlage zu Schallquellen, Hallenabmessungen und Oberflächen verhindert aber exaktere Vorhersagen.

Da die Einzelschallquellen nur ungenau zu lokalisieren sind, werden anstelle primärer Schallschutzmaßnahmen häufig sekundäre Maßnahmen ergriffen. Diese sollen Schallausbreitung oder -reflexion im Nachhinein eindämmen.

## 2.2 Forschungsziele

Vor diesem Hintergrund ist das Ziel des Forschungsvorhabens die Lärmreduzierung bei Getränkeabfüllanlagen.

Hierfür soll ein neues Messverfahren auf Basis einer Akustischen Kamera entwickelt werden, das ortsgenaue und dynamische Messungen im Umfeld der Getränkeindustrie erlaubt. Mit Hilfe dieses Messverfahrens sollen lärmtechnische Schwachstellen lokalisiert, primäre und sekundäre Maßnahmen der Lärmreduktion in Abfüllanlagen untersucht, verbessert und neu entwickelt werden. Das Messverfahren soll dabei bestehenden Verfahren der Schallmessung nicht ersetzen, sondern vielmehr als bildgebendes Verfahren eine wertvolle Ergänzung vorhandener Methoden darstellen.

Parallel zum Messverfahren soll eine neue Regelungsstrategie für die Behälterförderung im Pulk entwickelt werden. Diese beinhaltet die Betrachtung der vorgeschalteten Behälterverteilungen und der nachgeschalteten Behälterzusammenführungen. Bei der Behälterförderung im Pulk führen die Stöße aufeinander treffender Behälter, in der Regel Glasflaschen, zu erheblichen Schalldrücken, die direkt als Luftschall in die Abfüllhalle gelangen [38]. Wesentliches Kriterium der neuen Regelungsstrategie werden deshalb eine Reduzierung der Zahl von Behälterzusammenstößen und das Verringern von Differenzgeschwindigkeiten der unvermeidbar aufeinander treffenden Behälter sein. Entscheidend dabei ist, dass eine deutlich wahrnehmbare Lärmreduzierung erreicht wird, ohne die Puffereffizienz der Förderstrecken und somit die Gesamteffizienz der Getränkeabfüllanlagen wesentlich zu verringern.

### 3 Grundlagen

#### 3.1 Schall

Die in diesem Abschnitt 3.1 zitierten Textpassagen stammen, wenn nicht anders angegeben, aus „Technische Akustik“ von Michael MÖSER [20].

##### Entstehung und Wahrnehmung von Schall

„Eine Schallquelle versetzt die sie umgebende Luft in kleine Schwingungen, die in Folge von Kompressibilität und Masse der Luft übertragen werden und zum Ohr des Hörers gelangen. Physikalisch finden dabei kleine Druckschwankungen  $p$  in der übertragenden Luft statt. Man bezeichnet diesen, dem atmosphärischen Ruhedruck  $p_0$  überlagerten Wechseldruck, als Schalldruck  $p$ . Er ist die wichtigste akustische Feldgröße, die naturgemäß orts- und zeitabhängig ist. Vom Sender abgestrahlt entsteht ein räumlich verteiltes Schallfeld, das zu jedem Zeitpunkt andere Momentandrücke besitzt.“

„Das an einem Ort beobachtete Schallereignis besitzt im Wesentlichen zwei Merkmale: Es zeichnet sich durch Klangfarbe und durch Lautstärke aus. Das physikalische Maß für die Schallstärke ist der Schalldruck  $p$ ; das Maß für die Farbe ist die Frequenz  $f$ , die die Anzahl der Periodendauern pro Sekunde in der Einheit Hertz (Hz) angibt.“

Der für dieses Forschungsvorhaben relevante Frequenzbereich umfasst dabei ausschließlich „den Hörbereich des menschlichen Ohres, der etwa von 16 Hz bis 16.000 Hz (kurz auch 16 kHz) reicht. Der unterhalb davon angesiedelte Infraschall spielt ... auf dem Gebiet des Luftschalls selten eine Rolle, in ihm sind vor allem die Schwingungen von Festkörpern relevant. Im über dem Hörbereich liegenden Ultraschall reichen die Anwendungen von der akustischen Modelltechnik bis hin zur medizinischen Diagnostik und zerstörungsfreien Materialprüfung. Die Grenzen des ... Hörschalls sind ... nicht scharf. Abhängig von Faktoren wie ... Lebensalter (aber auch zum Beispiel der Dauerbelastung durch Arbeitslärm oder der gewohnheitsmäßigen Beschallung mit zu lauter Musik) ist die obere Grenze individuell verschieden. Der Wert von 16 kHz bezieht sich auf einen gesunden Menschen von etwa 20 Jahren. Die obere Grenze nimmt danach um etwa 1 kHz pro Lebensdekade ab.“

„Die Lautstärkeempfindung ist ... proportional zum Logarithmus des physikalischen Reizes (hier der Schalldruck-Amplitude). Dieser durch vielfältige Untersuchungen wenigstens grob als richtig nachgewiesene Zusammenhang ist als Weber-Fechner-Gesetz bekannt. ... Tatsächlich können Menschen Schalldrücke wahrnehmen, die von ca.  $20 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$  bis etwa  $200 \text{ N/m}^2$  reichen, wobei der obere Wert grob die Schmerzgrenze bezeichnet. Es werden also etwa sieben Zehnerpotenzen vom Lautstärke-Hören überdeckt.“

„Es ist ... naheliegend, auch für das technische Maß zur Bezifferung der Schalldruck-Größe nicht den physikalischen Schalldruck selbst, sondern eine logarithmierte Größe zu verwenden. National und international wird der Schalldruckpegel  $L$  mit  $p_0 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$  als gut handhabbares, aussagekräftiges Maß verwendet.

$$\text{Formel 1:} \quad L = 20 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right) = 10 \lg \left( \frac{p}{p_0} \right)^2$$

Die Bezugsgröße  $p_0$  entspricht dabei etwa der Hörschwelle (für eine Frequenz von 1000 Hz ... ), so dass 0 dB den „gerade noch“ beziehungsweise „gerade nicht mehr“ hörbaren Schall ... bezeichnet. ... unter  $p$  (ist) der Effektivwert des Zeitverlaufes zu verstehen (englisch RMS: root mean square). Die Angabe dB (Dezibel) bedeutet keine Maßeinheit, sie soll auf die Verwendung des logarithmischen

Bildungsgesetzes hinweisen. Der Vorfaktor 20 (beziehungsweise 10) ... ist so gewählt worden, dass 1 dB etwa der Unterschiedsschwelle zwischen zwei Drücken entspricht: Wenn sich zwei Schalle um 1 dB unterscheiden, so empfindet man sie gerade noch als unterschiedlich laut.“

„Wie groß ... der Gesamtpegel von mehreren (inkohärente) Einzelquellen mit bekannten Einzelpegeln“ ist, wird nach dem „Pegeladditionsverfahren (in dem die Pegel eben gerade NICHT addiert werden) ... berechnet.

Formel 2: 
$$L_{\text{tot}} = 10 \lg \left( \sum_{i=1}^N 10^{L_i/10} \right) \quad (N = \text{Anzahl der inkohärenten Teilschalle der Teilpegel } L_i).$$

Beispielsweise geben drei gleichlaute Kraftfahrzeuge den Gesamtpegel

Formel 3: 
$$L_{\text{tot}} = 10 \lg \left( 3 \cdot 10^{L_i/10} \right) = 10 \lg 10^{L_i/10} + 10 \lg 3 = L_i + 4,8 \text{ dB} ,$$

der um 4,8 dB über dem Einzelpegel liegt (und der nicht etwa 3-mal so groß wie der Einzelpegel ist).“

Die subjektiv empfundene Lautstärke, als Empfindungsgröße des menschlichen Gehörs, ist nicht mit der objektiven Messgröße Schalldruck gleichzusetzen. Vielmehr gilt nach [44] etwa:

- Eine Erhöhung des Schallpegels um 3 dB entspricht der Verdopplung (Faktor = 2) der Schallintensität.
- Eine Erhöhung des Schallpegels um 6 dB entspricht der Verdopplung des Schalldrucks.
- Eine Erhöhung des Schallpegels um 10 dB soll der Empfindung "doppelte Lautstärke" entsprechen.

### A-Bewertung von Schalldruckpegeln

„Sehr häufig wird bei akustischen Messungen ein anderer Einzahl-Wert, der sogenannte „A-bewertete Schalldruckpegel“ angegeben. ... Das zugehörige Messverfahren (ist) in etwa (der) Empfindlichkeit des menschlichen Ohres nachbildet.“ „National und international wird mit einem frequenzbewerteten Schallpegel gearbeitet, der auf die Grundtatsachen der Ohrempfindlichkeit wenigstens in etwa Rücksicht nimmt, dabei aber noch mit vergleichsweise einfachem Aufwand bestimmt werden kann. Dieser sogenannte „A-bewertete Schallpegel“ enthält alle Frequenzanteile des Hörbereichs. Praktisch wird der dB(A)-Wert mit Hilfe des A-Filters gemessen, dessen Frequenzgang in Abbildung 2 wiedergegeben ist. Die A-Filterkurve stellt in etwa die Umkehrung der Kurve gleicher Lautstärke mit dem Pegelwert von 30 dB bei 1 kHz dar. Wie man erkennt, haben die tiefen und die sehr hohen Frequenzen einen wesentlich geringeren Anteil am dB(A)-Wert als die mittleren Frequenzen.“

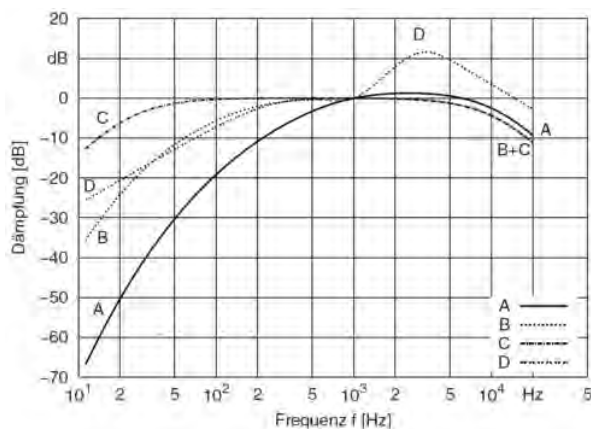


Abbildung 2: A-, B-, C- und D-Filterkurven [20]

### Intermittierende Schallquellen

„Bei gleichbleibenden, stationären Geräuschen (z.B. von einem Motor mit konstanter Drehzahl ...) ist die Feststellung des Pegels recht einfach. Wegen der Gleichförmigkeit des Geräusches genügt die Angabe des A-Pegels.“

„Wie aber bemisst man intermittierende Signale, wie Sprache, Musik und Verkehrslärm? ... Es sollen die verschiedensten Geräusch-Situationen (z.B. in zwei verschiedenen Straßen) als Ganzes möglichst einfach auch quantitativ miteinander verglichen werden, und das ist anhand der Zeitverläufe gewiss sehr schwierig. Um einfache Vergleichszahlen zu bekommen müssen Mittelwerte über eine geeignete, der Geräusch-Situation angemessene Mittelungszeit gebildet werden. Am gebräuchlichsten (und einfachsten) ist der sogenannte „energie-äquivalente Dauerschallpegel“  $L_{eq}$ . Er beruht auf dem Schalldruckquadrat im (langen) zeitlichen Mittel:

$$\text{Formel 4: } L_{eq} = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} dt \right) = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \right)$$

Darin bedeutet  $p_{eff}(t)$  den Zeitverlauf des Effektivwertes und  $L(t) = 10 \lg (p_{eff}(t) / p_0)^2$  den Pegel-Zeitverlauf. Das Quadrat eines Signal-Zeitverlaufes bezeichnet man auch als „Signalenergie“, der energie-äquivalente Dauerschallpegel gibt so gesehen die mittlere Signalenergie an; daraus erklärt sich die etwas voluminöse Namensgebung. Das Schalldrucksignal kann dabei nach einem A-Filter ... gewonnen worden sein, dann handelt es sich eben um den A-bewerteten energie-äquivalenten Pegel (etc.). Je nach Bedarf und Anwendung werden unterschiedlichste Integrationszeiten  $T$  zwischen einigen Sekunden oder Minuten bis hin zu Stunden verwendet. Regelwerke (wie die TA-Lärm) definieren Grenzwerte durch den  $L_{eq}$ , der für gewisse, mehrere Stunden umfassende Bezugszeiträume bestimmt wird. So umfasst zum Beispiel der Bezugszeitraum „nachts“ meist die Zeit von 22 Uhr bis 6 Uhr, also 8 Stunden. Bei Messungen wird oft zunächst eine sehr viel kleinere Mittelungszeit benutzt, um den Einfluss von Hintergrundgeräuschen gering zu halten. Aus der Anzahl der Ereignisse wird dann auf den  $L_{eq}$ , bezogen auf eine viel längere Zeit, geschlossen. Sei beispielsweise der  $L_{eq}$  von einer S-Bahn-Strecke neben einer Straße zu überprüfen. Dann misst man zunächst den energie-äquivalenten Dauerschallpegel für eine Mittelungsdauer, die ungefähr einer einzelnen Vorbeifahrt entspricht, zum Beispiel also den auf 30 Sekunden bezogenen  $L_{eq}(30s)$ . Angenommen, die Bahn fahre (pausenlos) im 5-Minuten-Takt: dann ergibt sich der Langzeit- $L_{eq}$  (bezogen auf mehrere Stunden, zum Beispiel für die Bezugszeiträume „tags“ oder „nachts“) einfach aus

$$\text{Formel 5: } L_{eq}(lang) = L_{eq}(30s) - 10 \lg(5min/30s) = L_{eq}(30s) - 10 \text{ dB}."$$

### 3.2 Beamforming

Die Akustische Kamera bedient sich bei der Berechnung von Schallkarten der Algorithmen des Beamformings. Beamforming ist eine Methode zur Lokalisation (als Positionsbestimmung) von Quellen in Wellenfeldern (zum Beispiel Schallfeldern).

Die im Folgenden zitierten Textpassagen stammen von M. LIESEGANG [18].

Beamforming-Messungen werden zumeist im Fernfeld durchgeführt. „Die annähernd ebenen Schallwellen treffen je nach Einfallsrichtung entsprechend zeitverzögert auf die einzelnen Mikrofone. Da die Mikrofonpositionen bekannt sind, kann für jede Einfallsrichtung die Zeitverzögerung berechnet und das gemessene Signal entsprechend korrigiert werden. Durch anschließende Aufsummierung der einzelnen Signale wird der phasengleiche – aus der definierten Einfallsrichtung kommende – Signal-

anteil verstärkt, während aus anderen Richtungen einfallende Signalanteile abgeschwächt werden. Dieses „Delay and Sum“ genannte Prinzip wird in Abbildung 3 zur besseren Veranschaulichung grafisch dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung des Beamforming-Verfahrens ist in [6] zu finden.“

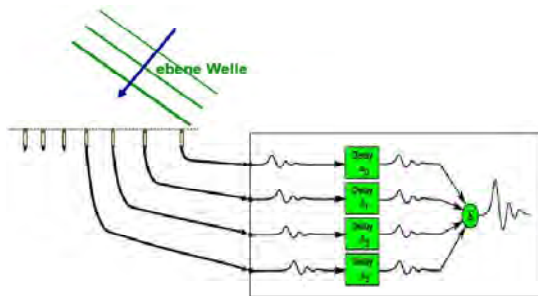


Abbildung 3: Prinzip der Richtungsanalyse eines „Delay and Sum“-Beamforming-Systems [18]

„Durch dieses Verfahren entsteht eine akustische Richtungsantenne, mit deren Hilfe ein Objekt in beliebiger Entfernung (abhängig von der gewünschten räumlichen Auflösung) vermessen werden kann. Die Richtungsempfindlichkeit (Abbildung 4) ist für die definierte Haupteinfallrichtung (Hauptkeule beziehungsweise Main lobe) am größten und zeigt je nach Mikrofonanordnung unterschiedliche, weniger empfindliche Nebenkeulen (Sidelobes). Diese Nebenkeulen erzeugen in der berechneten Schallkarte so genannte Artefakte oder Geisterquellen, d.h. es werden Schallquellen angezeigt, obwohl an dieser Stelle keine Quellen vorhanden sind. Der Pegelabstand zwischen Hauptkeule und stärkster Nebenkeule wird Maximum-Sidelobe-Level (MSL) genannt und ist ein Maß für die Ortungsqualität des Arrays. Um das MSL so weit wie möglich zu erhöhen, ist die Mikrofonanordnung des Arrays von großer Bedeutung. Bei gleichmäßiger Mikrofonanordnung (z.B. Kreuz, Gitter, Kreis) können sich Nebenkeulen aus unterschiedlichen Einfallrichtungen phasengleich überlagern und somit verstärken.“

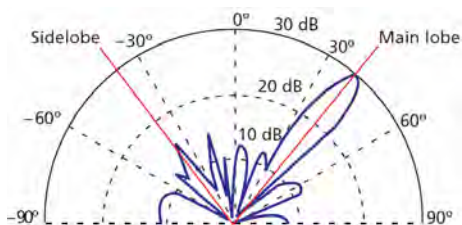


Abbildung 4: Beispiel für die Richtwirkung eines Beamforming-Arrays mit Haupt- / Nebenkeule [18]

„Die räumliche Auflösung eines Beamforming-Arrays hängt sehr stark vom Messabstand, der Mikrofonanordnung und der zu messenden Frequenz ab (vgl. [15]). Grundsätzlich liefern aktuelle Beamforming-Systeme mit einem Arraydurchmesser von 1 m ab einer Frequenz von etwa 500 Hz bis 800 Hz nutzbare Ergebnisse. Die obere Frequenzgrenze liegt in Abhängigkeit vom MSL bei bis zu 20 kHz. (Ein) ... Vorteil ... ist die problemlose Erfassung der Schallabstrahlung sehr großer Objekte (zum Beispiel kompletter Windkraftanlagen) mit einer Messung. Um die Abbildungsfehler im Randbereich der Schallkarten kleiner als 1 dB zu halten, ist der Messabstand so zu wählen, dass das zu messende Objekt innerhalb eines Array-Öffnungswinkels von 60° ( $\pm 30^\circ$  um die Array-Hauptachse) liegt. Die Richtwirkung des Systems erlaubt eine sehr genaue Schallquellenanalyse. Da die einzelnen Messmikrofone in der Regel eine omnidirektionale Empfindlichkeit besitzen, bildet sich allerdings eine identische Richtcharakteristik mit einer weiteren Hauptkeule auf der Rückseite des Arrays. Aus diesem Grund reagieren Beamforming-Systeme sehr empfindlich auf Hintergrundgeräusche. Das optimale Einsatzgebiet liegt in akustischen Freifeld- oder Halbfeldräumen, in denen durch entsprechende Wandverkleidungen und Isolationen Hintergrundgeräusche eliminiert sind.“

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Akustische Kamera

Das in diesem Forschungsvorhaben entwickelte Messverfahren basiert auf dem als „Akustische Kamera“ bezeichneten Messsystem der gfai tech GmbH. Die Akustische Kamera im Auslieferungszustand umfasst die folgenden Komponenten, mit den wesentlichen Kenndaten (laut Hersteller):

- 32 Kanal Ring-Array mit Transportkoffer [10]
  - Einsatz in Entfernungen von 0,7 m ... 5,0 m
  - USB-Kamera (bis 1280 x 960) mit Fix-Fokus-Objektiv,
  - Kartierungen von 300 Hz ... 20 kHz (50 kHz)
  - Dynamikbereich der Mikrofone: 35...130 dB, 40 Hz ... 20 kHz, -1 dB
  - Selektion auf +/- 0,5 dB bei 1 kHz
  - MicBus Mikrofonstecker
  - Durchmesser 75 cm, Gewicht ca. 5 kg
- Array-Stativ mit 3/8" Kamera-Fuß und Tasche (Manfrotto 055XPROB mit 496RC2)
- USB-Verlängerungskabel
- Datenrecorder dRec 48C192 EPP MicBus mit Transportkoffer
  - 36 Mikrofonkanäle
  - Samplingrate: 12 bis 192.000 S/s pro Kanal, 16 Bit Auflösung
  - Aufzeichnungsdauer: 1 Mio. Samples pro Kanal (5 bis 87 Sekunden)
  - Kompatibel mit allen Mikrofonarrays durch MicBus - Stecksystem
  - Integrierter programmierbarer Vorverstärker -28 dB bis 84 dB, in 7 dB-Stufen
  - Parallelport-Schnittstelle zum PC (25-Pol D-Sub Buchse)
  - Eingangsimpedanz typ. 30 kOhm (angepasst an Mikrofonimpedanzen)
  - Frequenzbereich: 30 Hz ... 20 kHz: -1dB, 80 kHz: -3dB
  - Eingangs-Dynamikbereich: 160  $\mu$ V...30 Vpp (THD < 5%)
  - Eingangsbezogenes Rauschen kleiner 10 $\mu$ V<sub>eff</sub> ~ 20 dB( $\mu$ )
  - Gleichlauffehler zwischen Kanälen typ. < 1 dB
  - Kanalübersprechen < -40 dB
  - Start/Stop gleitend triggerbar
  - Externer Triggeranschluß (TTL-Pegel)
  - Zusatzanschlüsse: Klicker, Laser
  - Internes Netzteil, 230 V~, 80 VA, Schutzart IP20

- Einsatz-Temperaturbereich 0 °C ... 40 °C, konvektionsbelüftet
- Gewicht ca. 7 kg
- EPP-Datenkabel (25-Pol D-Sub Stecker)
- Kalibriertester (Klicker) mit Kabel
- 5 m Rollmaßband
- Mess-PC Lenovo ThinkPad T61p, 2GB RAM mit EPP-Interface-Modul und Windows XP Betriebssystem
- Noiselimage, Version 4.1.2 mit Bedienungsanleitung [11]

## 4.2 Akustische Abschirmung mit Schnellwechselplatte

Die Innenstruktur der im Rahmen von Arbeitsschritt AS 2 entwickelten Abschirmung besteht aus einem verschraubten Aluminiumgerüst, welches die Dämmplatten verbindet und der akustischen Abschirmung ihre Stabilität verleiht. Das Innengerüst wird durch zwei weitere U-Profilstreben auf der Rückseite der akustischen Abschirmung verstärkt. Abbildung 5 zeigt das innere Aluminiumgerüst, das bereits mit den horizontalen Dämmplatten der Rückseite verschraubt wurde (links), und die U-Profilstreben auf der Rückseite (rechts).



Abbildung 5: Inneres Aluminiumgerüst (links) und U-Profilstreben auf der Rückseite (rechts)

Die Vorderseite der Abschirmung wird aus drei vertikal an das innere Aluminiumgerüst geschraubten Dämmplatten gebildet. Um ein Einreißen der empfindlichen Dämmplatten beim Festschrauben auf dem Gerüst zu verhindern, werden großflächige, runde Kunststoffplatten als Unterlegscheiben verwendet (siehe Abbildung 6).



Abbildung 6: Vorderseite der akustischen Abschirmung (links) und Unterlegscheiben (rechts)

Bei den Dämmmatten handelt es sich um das Produkt „pinta WAFFEL DÄMM“ der pinta acoustic GmbH. Aufgrund seiner in den Melaminharzschaumstoff einkaschierten Schwerschicht kann dieses Material außer zur Schalldämpfung auch zur Schalldämmung eingesetzt werden [37]. Abbildung 7 zeigt die doppellagigen Dämmmatten der akustischen Abschirmung von der Seite. Die beiden dunklen Schwerschichten sind im anthrazitfarbenen Schaumstoff gut zu erkennen.

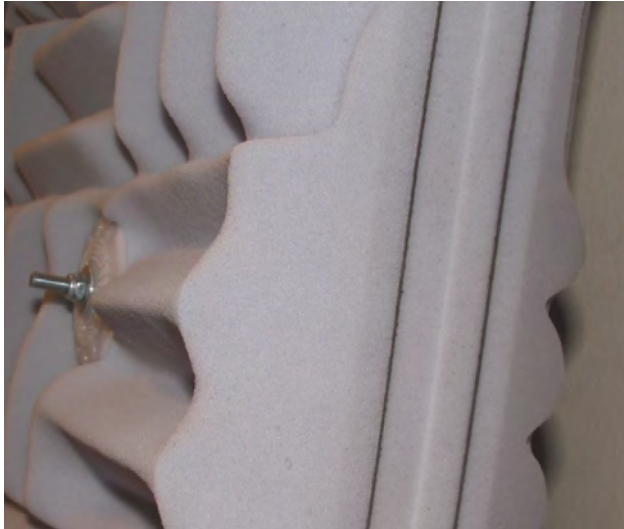
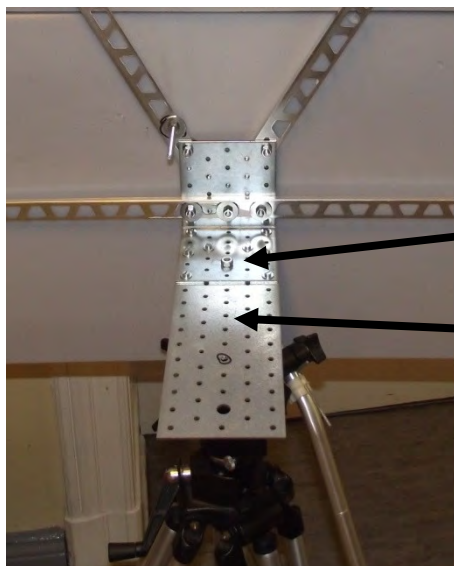


Abbildung 7: Vorder- und Rückseite der akustischen Abschirmung

Das Gerüst der Abschirmung ist mit der kurzen Seite einer L-Profil-Platte verschraubt (siehe Abbildung 8). An der Unterseite des L-Profiles wurde die Schnellwechselplatte eines Kamerastativs der Marke SABA ST100 angebracht, um die Abschirmung auf dem Stativ zu befestigen (siehe auch Abschnitt 4.3).



Verschraubung der Schnellwechselplatte

L-Profil-Platte (lange Seite)

Abbildung 8: L-Profil mit Schnellwechselplatte

Die Akustische Kamera wird, wie in Abbildung 9 gezeigt, mit der langen Seite des L-Profiles verschraubt. Der Abstand des Ring-Arrays kann dabei entlang des L-Profiles verändert werden (gestrichelte Linie). Zur Erhöhung der Stabilität und zur Wahrung eines gleichbleibenden Abstandes zwischen Akustischer Kamera und Abschirmung, wird der obere Abstandhalter des Ring-Arrays mit der Abschirmung über eine Steckverbindung mit dem Gerüst der Abschirmung verbunden (siehe Kreis in Abbildung 10).



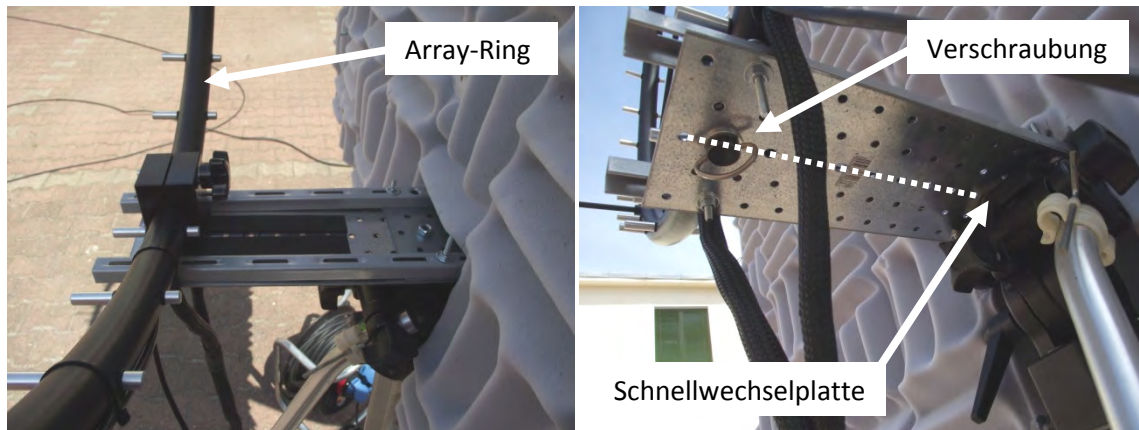


Abbildung 9: Befestigung der Akustischen Kamera an der Abschirmung



Abbildung 10: Steckverbindung zwischen Ring-Array und Abschirmung (Kreis)

### 4.3 Stativ SABA ST100 mit arretierbaren Rollen

Der Einsatz eines Stativs ermöglicht es, sowohl die Höhe als auch die Blickrichtung und den Kippwinkel der Akustischen Kamera mitsamt der Abschirmung zu verändern. Da aufgrund der Abschirmung das Gesamtgewicht des Aufbaus jedoch deutlich zugenommen hat, ist das oben genannte Array-Stativ des Lieferumfangs mit 3/8" Kamera-Fuß nicht mehr mehr geeignet. Anstelle dieses Stativs wird daher ein SABA ST100 verwendet (Anmerkung: Wird nur die Akustische Kamera, ohne Abschirmung, verwendet, kann auch weiterhin das Originalstativ verwendet werden). Zur Verbesserung der Mobilität des gesamten Aufbaus, wurden die Gummifüße des SABA ST100 entfernt und durch Lenkrollen mit Rückenloch sowie Rad- und Drehkrantzbrmsen (LKRA-VPA 80K-11-FI) der Firma Blickle Räder+Rollen GmbH und Co. KG ersetzt. Die beiden hinteren Rollen (① und ② in Abbildung 11) wurden in ihrer Drehrichtung permanent arretiert und zeigen beide in dieselbe Richtung. Rolle ③ fungiert als Lenkrolle und ist, während die Messeinrichtung bewegt werden soll, frei drehbar. Über ein Zugseil kann die gesamte Messeinrichtung gezogen und die Bewegungsrichtung des Stativs vorgegeben werden. Für die Messungen wird die Feststellbremse aller drei Rollen betätigt, so dass das Stativ stabil steht.

Das Stativ, in Verbindung mit der akustischen Abschirmung, ermöglicht die Variation der Höhe der USB-Kamera, die sich im Zentrum des Ring-Arrays befindetet, zwischen 1,34 m und 2,35 m. An den

ausziehbaren Stativfüßen wurden Markierungen angebracht, die bei eingezogener zentraler Höhenverstellung die Soll-Kamerahöhe von 1,55 m über dem Boden gewährleisten. Die Drehrichtung der Abschirmung mit Akustischer Kamera beträgt horizontal 360°. Aufgrund des Eigengewichts der Abschirmung und der durch die Rollen etwas reduzierten Standfestigkeit des Stativs, sollte ein vertikaler Kippwinkel von  $\alpha_{\max} = 20^\circ$  nicht überschritten werden (Abbildung 12), da ansonsten die Gefahr besteht, dass die Arretierung der Stativkopfes die Abschirmung nicht in Position halten kann und der gesamte Messaufbau kippt.

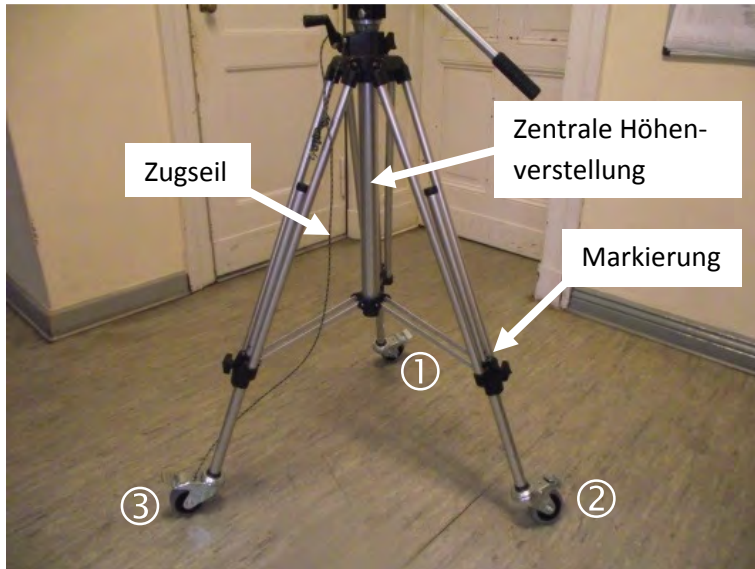


Abbildung 11: Stativ SABA ST100 mit Rollen und Zugseil



Abbildung 12: Maximaler vertikaler Kippwinkel  $\alpha_{\max}$  der Akustischen Kamera mit Abschirmung

#### 4.4 Messwagen und Kabeltrommel mit feststehenden Buchsen

Die Verwendung eines Messwagens dient, wie auch die Rollen am Stativ, der Verbesserung der Mobilität des gesamten Messaufbaus. Der in Abbildung 13 gezeigte, mit Bremsrollen ausgestattete Messwagen wird mit einer Kabeltrommel mit feststehenden Anschlüssen versehen, so dass das Stromkabel ab- beziehungsweise aufgerollt werden kann, ohne die Stromzufuhr zum Datenrekorder und dem Mess-PC unterbrechen zu müssen. Die Kabeltrommel wird mit Kabelbinder am Messwagen gegen

verrutschen gesichert. Neben der Kabeltrommel findet auf dem unteren Boden des Messwagens der Datenrecorder Platz. Auf dem oberen Boden wird der Mess-PS mit Maus aufgestellt. Sämtliche Kabel werden ebenfalls per Kabelbinder am Gestänge des Messwagens befestigt, um ein versehentliches hängenbleiben der Kabeln zu verhindern.

Das Mikrofonskabel, das Kabel der USB-Kamera sowie deren Verlängerungskabel, die den Messwagen mit der Akustischen Kamera verbinden, wurden zu deren Schutz mit Kabelbinder verbunden und mit einem flexiblen Kabelschutzschlauch umhüllt.



Abbildung 13: Messwagen – Bedienerseite (links) und Rückseite (rechts)

#### 4.5 NoiselImage Version 4.1.2

Die Durchführung der Messungen und die anschließende Verarbeitung der Messdaten erfolgt mit der Software NoiselImage, in der Version 4.1.2. Die Freischaltung der Software erfolgt über einen USB-Dongle, der den Lizenzschlüssel enthält. Ohne dieses Dongle kann die Software ausschließlich zum Betrachten der Kanaldaten beziehungsweise bereits bearbeiteter Daten verwendet werden. Eine weitere Bearbeitung der Daten ist ohne Dongle nicht möglich.

Sämtliche Softwareeinstellungen für die Aufnahmen, sowie die Schritte der automatischen Verarbeitung, werden im Abschnitt 5.2.5, ab Seite 63ff aufgeführt. Ergänzende Informationen zur Bedienung der Software sind im Handbuch „NoiselImage Help & Manual“ [11] enthalten.

##### Schallkarte der Akustischen Kamera

Die in Abbildung 14 dargestellte Schallkarte visualisiert durch die farbige Markierung die lauteste Schallquelle im Bildbereich der USB Kamera. Das Bild der Kamera wird hier in der schwarz-weißen Konturdarstellung angezeigt, bei der sich die Farben der Markierung deutlicher vom Bild abheben und leichter dem Objekt zugeordnet werden können. Der Maximalwert  $M_s$  wird pink dargestellt und befindet sich bei dem gewählten Beispiel im Zentrum der Markierung (Anmerkung: Zwischen den beiden Lautsprechern). Die Ausdehnung der Markierung ist vom frei wählbaren Delta abhängig. In diesem Beispiel wurde Delta auf 4,5 dB eingestellt. Die farbige Markierung, die stets von Pink über Grün nach Blau verläuft, wird somit in dem Bereich zwischen 80,1 dB bis 75,6 dB skaliert. „Leisere“ Werte unterhalb von 75,6 dB werden nicht in der Schallkarte dargestellt.

In der Statuszeile werden die wesentlichen Parameter der Messung und der berechneten Schallkarte angegeben:

- Samplingrate = Abtastfrequenz bei der Messung (vgl. Abschnitt 5.2.1.4)
- time domain = Integrationszeit der Schallkarte, hier von 0,005 Sekunden bis 7,990 Sekunden
- frequency domain = Frequenzbereich der Schallkarte, hier von 2.001 Hz bis 2.200 Hz
- Fokus: Abstand der Akustischen Kamera vom Objekt, hier 3,0 m
- Eff.: =  $E_s$  = Effektivwert der gesamten Schallkarte für den gesamten Frequenzbereich und der Integrationszeit, hier = time domain
- Algorithmus: RMS = root mean square (siehe Abschnitt 3.1)

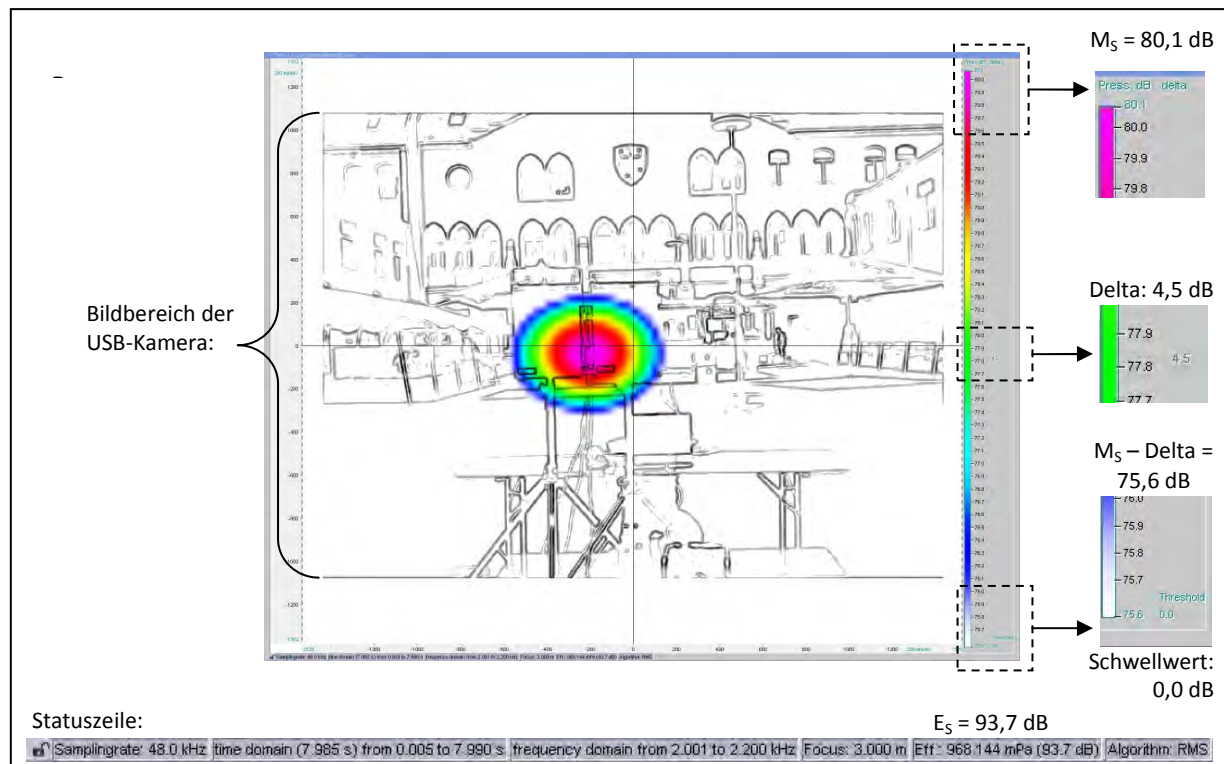


Abbildung 14: Schallkarte

## 4.6 Flaschentransportstrecke

Zur Umsetzung des neuen Regelungskonzeptes und der stauschalterbasierten Steuerung stand eine Pilotanlage zur Verfügung, die für die Durchführung der Versuche umgebaut und erweitert wurde. Die Pilotanlage ist als Rundlauf konzipiert (siehe Abbildung 15), das bedeutet, dass sämtliche Behälter, nachdem sie den Versuchsbereich durchlaufen haben, diesem wieder zugeführt werden können. Dieses Konzept hat den entscheidenden Vorteil, dass relativ wenig Behälter für die Versuche benötigt werden. Zusätzlich können auch Versuche über einen beliebig langen Zeitraum durchgeführt werden, da die Behälterzahl durch die erneute Zuführung nicht begrenzt ist. Der Nachteil dieses Konzepts liegt in der Notwendigkeit der Schaffung einer Möglichkeit der Entkopplung von Ein- und Auslauf der Versuchsstrecke. Hierzu ist ein zusätzlicher Puffer notwendig, der alle Flaschen, die auf der Versuchsstrecke Platz haben, aufnehmen kann, so dass diese nach Bedarf komplett gefüllt oder geleert werden kann. Dieser zusätzliche Puffer benötigt Platz und stellt einen apparativen Aufwand dar.

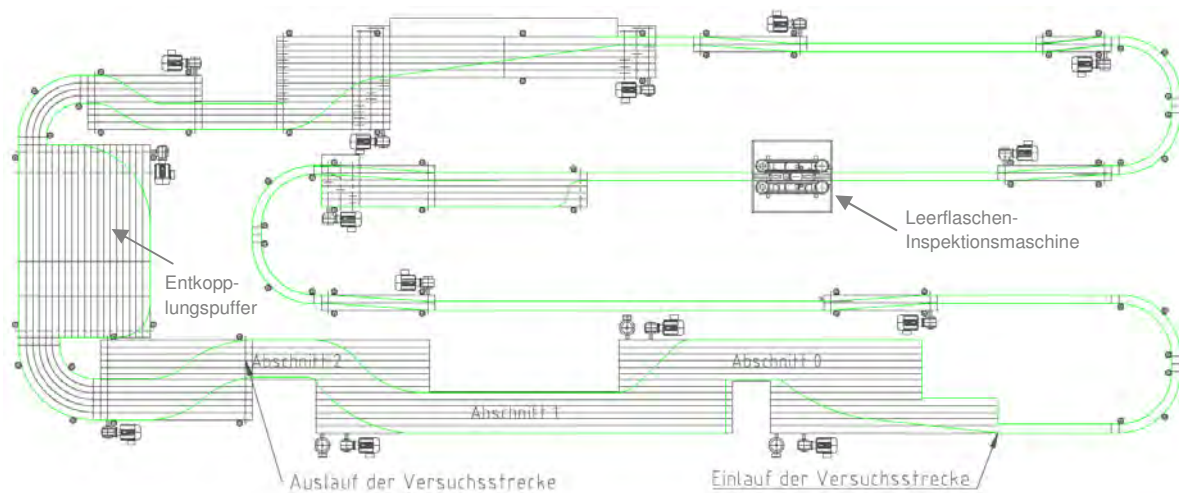


Abbildung 15: CAD-Plan der Pilotanlage

In Abbildung 15 ist der komplette Pilotrundläufer maßstabsgetreu abgebildet. Die Versuchsstrecke befindet sich zwischen dem Ein- und Auslauf. Sie besteht aus den Pufferabschnitten 0, 1 und 2. Der Behältereinlauf der Versuchsstrecke erfolgt einsträngig. Die Transportbandabschnitte 0 und 1 verfügen jeweils über zwei Antriebe, die getrennt angesteuert werden können. Dadurch kann die linke Hälfte der Antriebsbänder mit einer anderen Geschwindigkeit betrieben werden, wie die rechte Hälfte. Der Abschnitt 2 verfügt nur über einen Antrieb. Die durch die Versuchsstrecke geförderten Behälter verlassen diese am Ende des Abschnittes 2 mehrsträngig und somit im Pulk. Im Anschluss gelangen sie über einen kurvengängigen Transporteur entweder in die drucklose Behälterzusammenführung (DLZ) oder bei Rückstau in den Entkopplungspuffer. Dieser dient der Entkopplung von Ein- und Auslauf der Versuchsstrecke. Er kann je nach Bedarf bei Rückstau Behälter aufnehmen und bei Flaschenmangel in der Kurve vor der DLZ Behälter in den Produktionsstrom zurückspeisen. Nach der DLZ gelangen die Behälter in einen einsträngigen Bandabschnitt. In diesen Bereich ist eine Leerflaschen-Inspektionsmaschine der Firma Heuft Systemtechnik GmbH integriert. Nach dem einsträngigen Transportabschnitt gelangen die Behälter wieder auf die Versuchsstrecke.

#### 4.6.1 Die Steuerungsarchitektur der Pilotanlage

Die Bändersteuerung des Pilotrundläufers erfolgt durch zwei getrennte Steuerungen. Der einsträngige Transportbandabschnitt und die DLZ werden durch den Heuft Synchron gesteuert. Sämtliche Sensorik und Aktorik, die an diesen Bandabschnitten verbaut ist, ist an diese Steuerung angeschlossen.

Die übrigen Bandabschnitte werden von einer SPS der Firma Siemens angesteuert. Dabei handelt es sich um eine S7-300 mit der Typenbezeichnung CPU 317-2 PN/DP, die durch das Interfacemodul IM 151-1 erweitert wurde. Alle in diesem Bereich verbauten Stauschalter und Lichtschranken sind über digitale Eingangsbaugruppen der Steuerung beziehungsweise des Interfacemoduls angeschlossen. Die Frequenzumrichter der Motoren werden über eine Profibus-Verbindung angesteuert.

Sämtliche Eingaben, die vom Bediener getätigt werden müssen, können über mehrere Bedienterminals vorgenommen werden. Alle Eingaben, die vom Heuft Synchron verarbeitet werden sollen, können an den beiden Bedienterminals des Heuft Synchron, beziehungsweise des Heuft InLine vorgenommen werden. Alle Eingaben, die die Versuchsstrecke und den übrigen Pilotrundläufer betreffen, werden über eine mit WinCC erstellte Bedienoberfläche vorgenommen. Über diese Bedienoberfläche erfolgt auch die Kommunikation zwischen den beiden Anlagenteilen. Der Heuft InLine bekommt von

hier aus den Sollwert für die Ausbringung vorgegeben und die Freigabe für die im Bereich des Heuft Synchron verbauten Frequenzumrichter.

#### **4.6.2 Vergleichbarkeit des Pilotrundläufers mit einer industriell genutzten Anlage**

Durch die Möglichkeit, die Versuchsstrecke des Pilotrundläufers mit verschiedenen Füllungen, Bändergeschwindigkeiten und Ausbringungen der vorgeschalteten Maschine zu betreiben, können Transportstrecken mit einem Behälterdurchsatz von bis zu 36.000 Fl/h nachgestellt werden.

Allerdings sind hierbei einige Einschränkungen zu beachten. So ist der Versuchsstrecke keine Maschine nachgeschaltet, die die Behälter definiert entnimmt. Daher muss der Flaschenablauf alleine durch die Bandgeschwindigkeit des Abschnitts 2 angepasst werden. Dies ist speziell beim Anfahren einer Sollfüllung, bei zuvor komplett leerem Transporteur schwierig. Die Breite des Flaschenstroms verändert sich in diesem Zeitraum stark. Während die ersten Flaschen einzeln oder in einem schmalen Behälterstrom ankommen, stauen sich diese während des Betriebs auf der kompletten Breite des Transporteurs auf. Daher muss der Transporteurauslauf bis zur Freigabe der nachgeschalteten Maschine durch die Steuerung manuell blockiert werden.

Auch während des Betriebs unterliegt der Auslauf des Transporteurs leichten Schwankungen, die sich allerdings in sehr engen Grenzen bewegen (ca.  $\pm 200$  Fl/h). Diese Schwankungen können auch im Praxisbetrieb durch Regeleingriffe an den Maschinen auftreten und sollten durch die Transporteursteuerung und -regelung ausgeglichen werden.

Ein Nachregeln der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ist nicht möglich, da diese beim Pilotrundläufer nicht vorhanden ist. Daher muss in diesem Fall die Geschwindigkeit des Auslaufbandes verändert werden, um dem Behälterstrom zu erhöhen oder zu erniedrigen. Auf Grund der Führung im Pulk reagiert der Flaschenstrom allerdings nur sehr träge auf diese Änderungen der Bändergeschwindigkeit, da ein Großteil der eingebrachten kinetischen Energie als Reibungsverluste zwischen den Behältern und dem Transportband, sowie zwischen Behältern und Geländerführung und zwischen den Behältern selbst verloren geht. Ein exaktes Nachregeln der Ausbringung der nachgeschalteten Maschine ist somit an der Versuchsstrecke nicht umsetzbar.

Zur Darstellung eines Betriebs im kontinuierlichen Betrieb wird der Bandabschnitt 2 wie der Einlauf einer Maschine betrieben. Das bedeutet, er wird je nach Ausbringung der Maschine eingestellt. Sollten Störungen simuliert werden, wird der Transporteur angehalten, was speziell durch die gewählte Geländerführung am Auslauf zu einem Stopp des gesamten Flaschenpulks führt und somit die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine auf null setzt.

Eine komplette Füllung der Versuchsstrecke ist auf Grund der begrenzten Kapazität des Entkopplungspuffers nicht möglich. Sie kann im Betrieb nur ca. zu 85 % gefüllt werden. Dies schränkt die Eignung als Versuchsstrecke allerdings nicht ein, da die in Kapitel 5 beschriebenen Versuche alle mit niedrigeren Füllungen durchgeführt wurden.

#### **4.7 Schallpegelmessgerät**

Die Messung der Schallpegel an der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Versuchsstrecke wurden mit einem integrierenden Schallpegelmessgerät der Firma Brüel & Kjær vom Typ 2236 durchgeführt. Die verwendeten Aufnahmeeinstellungen sind in den entsprechenden Abschnitten angegeben.

## 5 Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse

Im Folgenden werden die Verwendung der Zuwendung sowie die durch die Förderung erzielten Ergebnisse im Einzelnen dargestellt und den im Forschungsantrag definierten Zielen der Arbeitsschritte gegenübergestellt. Dabei wird auch auf den Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals und der Akustischen Kamera eingegangen. Weitere Geräte, mit einem Beschaffungswert über 2.500 €, wurden in diesem Projekt nicht eingesetzt. Leistungen Dritter sind in diesem Forschungsvorhaben nicht erbracht worden.

### 5.1 Arbeitsschritt 1: Akustische Modellierung

Der erste Arbeitsschritt (AS) beinhaltet die Erfassung potentieller Schallquellen, eine Modellierung der Schallentstehung durch Behälter und die Entwicklung eines qualitativen Gesamtmodells einer Getränkeabfüllanlage.

#### 5.1.1 AS 1.1: Erfassen potentieller Schallquellen

##### Zielstellung

In einem ersten Schritt sollen potentiellen Schallquellen in Abfüllanlagen herausgearbeitet werden.

##### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 0,75 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

##### Ergebnisse

In Tabelle 1 werden die potentiellen Schallquellen einer Getränkeabfüllanlage für alkoholfreie Getränke und Bier in Ein- und Mehrwegglasflaschen aufgelistet.

Grundlage dieser Tabelle sind zum Einen die von PROBST veröffentlichten Forschungsberichte [28] und [29]. In [28], aus dem Jahre 2003, werden unter anderem Geräuschemissionswerte ausgewählter Maschinengruppen der Getränkeindustrie, in Form von Schallleistungspegel  $L_{WA}$  der gesamten Maschine und Emissions-Schalldruckpegel  $L_{pA}$  am Arbeitsplatz des Bedieners angegeben.  $L_{1(85\%)}$  sagt aus, dass der jeweilige Pegel bei 85 % der untersuchten Maschinen kleiner oder gleich dem angegebenen Pegel ist.  $L_{2(15\%)}$  entspricht dem jeweiligen Pegel der von 15 % der untersuchten Maschinen unterschritten oder erreicht wird. In [29] werden zudem Lärmemissionen von Flaschen auf den Transportsystemen behandelt.

Ergänzt werden diese Berichte durch vier Anlagenpläne [1, 2, 3, 4], in denen sämtliche Aggregate moderner Abfüllanlagen für Glasflaschen eingezeichnet sind. Anhand dieser Pläne wurden weitere, möglicherweise schalltechnisch relevante Punkte lokalisiert und ebenfalls in die Aufstellung in Tabelle 1 übernommen. Da es sich bei den Anlagenplänen um reale Abfüllanlagen handelt, werden diese, auf Wunsch der Getränkehersteller, in diesem Schlussbericht nicht zugänglich gemacht. Die Nennausbringung und der Hersteller der Angaben sind in den Literaturangaben, in Abschnitt 10.1 aufgeführt.

Tabelle 1: Aufstellung potentieller Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	$L_{1(85\%)}$	$\emptyset$	$L_{2(15\%)}$	Quellen
1	Transportstrecke Paletten (Zur Entpalettierung)	1.1	Transport				[28]
2	Entpalettiermaschine	2.1	Schalleistungspegel $L_{WA(50.000\text{ FI/h})}$ der gesamte Maschine	95,0 dB(A)	93,5 dB(A)	92,0 dB(A)	[28]
		2.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA(50.000\text{ FI/h})}$ am Arbeitsplatz Bediener	85,0 dB(A)	83,5 dB(A)	82,0 dB(A)	[28]
		2.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		2.4	Heben der Kästen				[28, 29]
		2.5	Absetzen der Kästen				[28, 29]
3	Transportstrecke Kasten (Entpalettierung zur Abschraubmaschine)	3.1	Stopper				[28, 29]
		3.2	Rückstauzonen				[28, 29]
		3.3	Überschübe				[1, 2, 3, 4]
4	Abschraubmaschine	4.1	Schalleistungspegel $L_{WA(50.000\text{ FI/h})}$ der gesamte Maschine	109,0 dB(A)	106,0 dB(A)	103,0 dB(A)	[28]
		4.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA(50.000\text{ FI/h})}$ am Arbeitsplatz Bediener	91,0 dB(A)	88,0 dB(A)	85,0 dB(A)	[28]
		4.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
5	Transportstrecke Kasten (Abschraubmaschine zur Auspackmaschine)	5.1	Stopper				[28, 29]
		5.2	Rückstauzonen				[1, 2, 3, 4]
		5.3	Überschübe				[1, 2, 3, 4]
6	Auspackmaschine	6.1	Schalleistungspegel $L_{WA(50.000\text{ FI/h})}$ der gesamte Maschine	104,0 dB(A)	103,0 dB(A)	102,0 dB(A)	[28]
		6.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA(50.000\text{ FI/h})}$ am Arbeitsplatz Bediener	86,5 dB(A)	85,3 dB(A)	84,0 dB(A)	[28]
		6.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		6.4	Kasteneinlauf				[1, 2, 3, 4]
		6.5	Kastenauslauf				[1, 2, 3, 4]
		6.6	Heben der Flaschen				[28, 29]
		6.7	Absetzen der Flaschen				[28, 29]
		6.8	Ausschub der Flaschen				[28, 29]
7	Transportstrecke Kasten (Auspackmaschine zur Kastenwaschmaschine)	7.1	Stopper				[28, 29]
		7.2	Rückstauzonen				[1, 2, 3, 4]
		7.3	Überschübe				[1, 2, 3, 4]
8	Kastenreinigungsmaschine	8.1	Schalleistungspegel $L_{WA(50.000\text{ FI/h})}$ der gesamte Maschine	---	---	---	[1, 2, 3, 4]
		8.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA(50.000\text{ FI/h})}$ am Arbeitsplatz Bediener	---	---	---	[1, 2, 3, 4]
		8.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		8.4	Umlenkung der Kästen				[1, 2, 3, 4]
		8.5	Rückstauzonen				[1, 2, 3, 4]
9	Transportstrecke Kasten (Kastenwaschmaschine zur Einpackmaschine)	9.1	Stopper				[28, 29]
		9.2	Rückstauzonen				[1, 2, 3, 4]
		9.3	Überschübe				[1, 2, 3, 4]
10	Transportstrecke Flaschenpulk (Auspackmaschine zur Flaschenreinigungsmaschine)	10.1a	Aufholpunkte am Pulkende				[29]
		10.1b	Teilung des Flaschenpulks				[29]
		10.1c	Zusammenführung des Flaschenpulks				[29]
		10.1d	Überschübe des Flaschenpulks				[1, 2, 3, 4]
		10.2	Antriebe				[1, 2, 3, 4]
		10.3	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4]
11	Flaschenreinigungsmaschine	11.1	Schalleistungspegel $L_{WA(50.000\text{ FI/h})}$ der gesamte Maschine	96,0 dB(A)	94,3 dB(A)	92,5 dB(A)	[28]
		11.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA(50.000\text{ FI/h})}$ am Arbeitsplatz Bediener	86,0 dB(A)	84,3 dB(A)	82,5 dB(A)	[28]
		11.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4, 28, 29]
		11.4	Flaschenaufgabe				[28, 29]
		11.5	Flaschenabgabe				[28, 29]
		11.6	Antriebe und Pumpen				[1, 2, 3, 4]
12	Transportstrecke Flaschenpulk (Flaschenreinigungsmaschine zur Leerflaschen-Inspektionsmaschine)	12.1a	Aufholpunkte am Pulkende				[29]
		12.1b	Teilung des Flaschenpulks				[29]
		12.1c	Zusammenführung des Flaschenpulks				[29]
		12.1d	Überschübe des Flaschenpulks				[1, 2, 3, 4]
		12.2a	Staudrucklose Flaschenvereinzlung				[29]
		12.2b	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		12.2c	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		12.3	Antriebe				[1, 2, 3, 4]
		12.4	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4]



Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	L <sub>1(85 %)</sub>	∅	L <sub>2(15 %)</sub>	Quellen
13	Leerflaschen-Inspektionsmaschine	13.1	Schalleistungspegel L <sub>WA (50.000 FI/h)</sub> der gesamte Maschine	105,0 dB(A)	102,3 dB(A)	99,5 dB(A)	[28]
		13.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA (50.000 FI/h)</sub> am Arbeitsplatz Bediener	86,5 dB(A)	83,8 dB(A)	81,0 dB(A)	[28]
		13.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		13.4	Einlauf-Schnecke (nur Rundläufer)				[28]
		13.5	Einlaufstern (nur Rundläufer)				[28]
		13.6	Transfersterne (nur Rundläufer)				[28]
		13.7	Auslaufstern (nur Rundläufer)				[28]
		13.8	Bodenabbläsung				[1, 2, 3, 4]
		13.9	Ausleitung erkannter Flaschen				[1, 2, 3, 4]
14	Transportstrecke Einzelflaschen (Leerflaschen-Inspektionsmaschine zur Füllmaschine)	14.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		14.1b	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		14.2	Antriebe				[1, 2, 3, 4]
		14.3	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4]
15	Füll- und Verschleißmaschine	15.1	Schalleistungspegel L <sub>WA (50.000 FI/h)</sub> der gesamte Maschine	107,0 dB(A)	104,8 dB(A)	102,5 dB(A)	[28]
		15.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA (50.000 FI/h)</sub> am Arbeitsplatz Bediener	88,0 dB(A)	85,5 dB(A)	83,0 dB(A)	[28]
		15.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		15.3a	Einlauf-Schnecke				[28, 29]
		15.3b	Einlaufstern				[28, 29]
		15.3c	Hubelemente Einlauf				[1, 2, 3, 4]
		15.3d	Hubelemente Auslauf				[1, 2, 3, 4]
		15.3e	Transferstern				[28, 29]
		15.3f	Verschleißmaschine				[1, 2, 3, 4]
		15.3g	Verschlußförderer				[1, 2, 3, 4, 29]
		15.3h	Ausblasen der Rückgasröhrchen				[29]
		15.3i	Auslaufstern				[28, 29]
		15.4	Ventilknoten				[1, 2, 3, 4]
		15.5	Ausleitung fehlerhafter Flaschen				[1, 2, 3, 4]
16	Transportstrecke Einzelflaschen und Flaschenpulk (Füllmaschine zur Vollflaschen-Inspektionsmaschine) (ggf. auch Etikettiermaschine, sollte keine Vollflaschen-Inspektionsmaschine vorhanden sein)	16.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		16.1b	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		16.2	Flaschenzusammenführung				[29]
		16.3a	Aufholpunkte am Pulkende				[29]
		16.3b	Teilung des Flaschenpulks				[29]
		16.3c	Zusammenführung des Flaschenpulks				[29]
		16.3d	Überschübe des Flaschenpulks				[1, 2, 3, 4]
		16.4a	Staudrucklose Flaschenvereinzlung				[29]
		16.4b	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		16.4c	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
16.5	Antriebe				[1, 2, 3, 4]		
16.6	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4, 29]		
17	Vollflaschen-Inspektionsmaschine	17.1	Schalleistungspegel L <sub>WA (50.000 FI/h)</sub> der gesamte Maschine	---	---	---	[1, 2]
		17.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA (50.000 FI/h)</sub> am Arbeitsplatz Bediener	---	---	---	[1, 2]
		17.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		17.4	Einlauf-Schnecke (Rundläufer)				[1, 2]
		17.5	Einlaufstern (Rundläufer)				[1, 2]
		17.6	Transfersterne (Rundläufer)				[1, 2]
		17.7	Auslaufstern (Rundläufer)				[1, 2]
		17.8	Ausleitung erkannter Flaschen				[1, 2]
18	Transportstrecke Einzelflaschen (Vollflaschen-Inspektionsmaschine zur Etikettiermaschine)	18.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		18.1b	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		18.2	Antriebe				[1, 2, 3, 4]
		18.3	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4]
19	Etikettiermaschine	19.1	Schalleistungspegel L <sub>WA (50.000 FI/h)</sub> der gesamte Maschine	105,5 dB(A)	102,8 dB(A)	100,0 dB(A)	[28]
		19.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA (50.000 FI/h)</sub> am Arbeitsplatz Bediener	87,0 dB(A)	84,0 dB(A)	81,0 dB(A)	[28]
		19.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		19.3a	Einlauf-Schnecke				[28]
		19.3b	Einlaufstern				[28]
		19.3c	Etikettierstationen / Module				[28]
		19.3d	Auslaufstern				[28]
		19.4	Ausleitung fehlerhafter Flaschen				[1, 2, 3, 4]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	$L_{1(85\%)}$	$\emptyset$	$L_{2(15\%)}$	Quellen
20	Transportstrecke Flaschenpulk (Etikettiermaschine zur Einpackmaschine)	20.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		20.1b	Überschübe im Einzeltransport				[1, 2, 3, 4]
		20.2	Flaschenzusammenführung				[29]
		20.3a	Aufholpunkte am Pulkende				[29]
		20.3b	Teilung des Flaschenpulks				[29]
		20.3c	Zusammenführung des Flaschenpulks				[29]
		20.3d	Überschübe des Flaschenpulks				[1, 2, 3, 4]
		20.4	Antriebe				[1, 2, 3, 4]
21	Einpackmaschine	20.5	Scharnierbandketten				[1, 2, 3, 4]
		21.1	Schallleistungspegel $L_{WA}$ (50.000 FI/h) der gesamte Maschine	104,0 dB(A)	103,0 dB(A)	102,0 dB(A)	[28]
		21.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA}$ (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener	86,5 dB(A)	85,3 dB(A)	84,0 dB(A)	[28]
		21.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		21.4	Kasteneinlauf				[1, 2, 3, 4]
		21.5	Kastenauslauf				[1, 2, 3, 4]
		21.6	Drängeltisch für Flaschen				[28]
		21.7	Heben der Flaschen				[28]
22	Transportstrecke Kasten (Einpackmaschine zur Bepalettiermaschine)	21.8	Absetzen der Flaschen				[28]
		22.1	Stopper				[28]
		22.2	Rückstauzonen				[1, 2, 3, 4]
23	Bepalettiermaschine	22.3	Überschübe				[1, 2, 3, 4]
		23.1	Schallleistungspegel $L_{WA}$ (50.000 FI/h) der gesamte Maschine	95,0 dB(A)	93,5 dB(A)	92,0 dB(A)	[28]
		23.2	Emissions-Schalldruckpegel $L_{pA}$ (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener	85,0 dB(A)	83,5 dB(A)	82,0 dB(A)	[28]
		23.3	Arbeitsbereich an der Maschine				[1, 2, 3, 4]
		23.4	Heben der Kästen				[28]
34	Transportstrecke Paletten (Zur den Flurförderfahrzeugen)	23.5	Absetzen der Kästen				[28]
		24.1	Transport				[28]

## Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Es wurde eine Aufstellung erarbeitet, in der potentielle Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie aufgelistet werden, die einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung des Lärms in Abfüllanlagen beisteuern können. Dies ermöglicht eine Abschätzung der wichtigsten Schallemitenten und ist Grundlage für das in AS 1.3 zu erstellende, qualitative Gesamtmodell einer idealisierten Getränkeabfüllanlage.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### 5.1.2 AS 1.2: Physikalische Modellierung der Schallentstehung durch Behälter

#### Zielstellung

Im Rahmen dieses AS sollen die wichtigsten Schallentstehungsmechanismen im Bereich des Flaschenkellers herausgearbeitet werden, um basierend auf diesen Ergebnissen die weiteren Maßnahmen zur Schallreduzierung in Arbeitsschritt AS 3 planen zu können.

#### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 0,75 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 2).

#### Ergebnisse

Zur wirksamen Reduzierung des Lärms müssen die Hauptemittenten identifiziert werden um dann gezielt gegen diese vorgehen zu können. Viele Lärmquellen mit geringeren Schalldruckpegeln fallen

bei der Betrachtung des Gesamtschalldruckpegels nicht ins Gewicht. So kann angenommen werden, dass bei einem Unterscheid von 10 dB und mehr zwischen zwei Schallquellen die Emissionen der leiseren Quelle in der Praxis keine Rolle mehr spielt [12]. Der Gesamtschallpegel ergibt sich aus dem Schalldruckpegel der dominierenden Quelle. Liegen dagegen zwei Schallquellen mit gleichem Schalldruckpegel vor, erhöht sich der Gesamtpegel um ca. 3 dB [12]. Das bedeutet in der Praxis, dass speziell primäre Maßnahmen, aber teilweise auch sekundäre Schallschutzmaßnahmen (zum Beispiel Kapselung), sich auf die Hauptlärmemittenten konzentrieren müssen. Hierzu kommen in Getränkeabfüllanlagen beispielsweise Kapselungen von Anlagenteilen zum Einsatz. Diese finden sich an besonders lärmintensiven Teilen der Anlage, wie zum Beispiel am Ein- beziehungsweise Auslauf der Flaschenreinigungsmaschine, aber auch an vielen anderen Maschinen [28]. Neben den Maschinen können auch Transporteure oder zumindest Teile von Transporteuren mit Schallschutztunneln umbaut werden. Allerdings sind diese in der Praxis nur selten zu finden, da sie zum Einen den Zugriff auf die Transporteure erschweren und zum Anderen hygienische Probleme verursachen können [7], [14] und [50].

Gerade die Behältertransporteure stellen allerdings eine Hauptlärmquelle in Getränkeabfüllanlagen dar [13], [45] und [50]. So spielen hierbei insbesondere die von den zusammenstoßenden Glasflaschen ausgehenden Lärmpegel eine wichtige Rolle. Untersuchungen dieses Phänomens sind in [39] und [29] zu finden. Zum Zusammenstoß kommt es an verschiedenen Stellen des Transporteurs. Hierbei gilt, je höher die Differenzgeschwindigkeit beim Zusammenstoß, desto höher der emittierte Schalldruckpegel [29]. Zu großen Differenzgeschwindigkeiten kommt es zum Einen am Staupunkt des Transporteurs, an dem die Flaschen aus dem freien Transport in den Flaschenpulk übergehen. Zum Anderen kann es aber auch im Flaschenpulk zu Aufprallereignissen mit hohen Differenzgeschwindigkeiten kommen. So neigen unter hohem Staudruck geführte Flaschen zum Verspringen. Hierbei springen Flaschen aus dem Pulk in sich ergebende Lücken. Dabei können sie sehr stark beschleunigt werden. Sie prallen dann mit hoher Geschwindigkeit auf ein festes Hindernis, meist benachbarte Flaschen. Eine Möglichkeit dies zu verhindern, ist die staudruckarme Behälterführung im Pulk.

Die Lärmemissionen, die von Transporteuren ausgehen, sind insbesondere vor dem Hintergrund problematisch, dass diese Anlagenteile über die gesamte Anlage verteilt sind und nahezu alle Bediener von ihnen betroffen sind. Da sich im Bereich der Transporteure aus den oben genannten Gründen sekundäre Schallschutzmaßnahmen verbieten, kommen meist primäre Schallschutzmaßnahmen zum Einsatz, die direkt gegen die Ursache der Schallentstehung vorgehen. Hier sind vor allem Systeme zur staudruckarmen Zusammen- beziehungsweise Auseinanderführung von Flaschen zu nennen, die am Einlauf und Auslauf der Transporteure zu erheblichen Schallreduktionen führen. Ein weiterer Ansatz ist die Einführung der Steuerung von Transporteuren mit Hilfe von Stauschaltern, die eine Reduktion des Schalldruckpegels durch eine Reduktion der Differenzgeschwindigkeiten der Behälter bewirkt [27], [29], [31]. Außerdem gibt es mechanische Verbesserungen, wie die Einführung von kurvengängigen Transportbandketten, die den rechtwinkligen Überschub ersetzen und so das Auflaufen der Flaschen gegen ein festes Hindernis verhindern [50]. Auch die Führung der Behälter durch die Geländer konnte verbessert werden [45]. Neben diesen Verbesserungen konnte in letzter Zeit auch das Leerlaufgeräusch der Transporteure reduziert werden, indem spezielle Gleitschuhe zur Rückführung der Scharnierbandketten genutzt werden oder neue Antriebskonzepte (Permanentmagnetmotoren), die die Asynchronmotoren ersetzen und somit die an den Motoren angebrachten Lüfter überflüssig machen [9], [26].

## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

In Arbeitsschritt AS 3 dieses Forschungsvorhabens sollen unter anderem die beim Flaschenstoß auftretenden Lärmemissionen untersucht und ein neuer Ansatz zur lärmarmen Regelung von mehrsträngigen Behältertransporteuren erarbeitet und umgesetzt werden. Anhand der in diesem Arbeitsschritt AS 1.2 mittels Literaturrecherche erzielten Ergebnisse konnten die notwendigen Versuche in Arbeitsschritt AS 3 vorbereitet und eingegrenzt werden.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.1.3 AS 1.3: Qualitatives Gesamtmodell einer idealisierten Getränkeabfüllanlage**

#### **Zielstellung**

Erstellen eines qualitativen Modells zur Entstehung und Ausbreitung von Schall in einer idealisierten Abfüllanlage.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,25 MM (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

##### **Layout eines qualitativen Modells einer idealisierten Abfüllanlage**

Das in Abbildung 16 dargestellte Layout eines qualitativen Modells einer idealisierten Abfüllanlage basiert auf den Anlagenlayouts [1, 2, 3 und 4]. Die laufenden Nummern (Lfd. Nr.) und die Nummern auf den Transportstrecken in der Abbildung entsprechen den Nummern in Tabelle 1 und kennzeichnen einzelne Aggregate der Abfüllanlage. Die Angaben in eckigen Klammern entsprechen dem durchschnittlichen Schallleistungspegel  $L_{WA(50.000\text{ Fl/h})}$  der Aggregate nach [28].

Bei der Auswertung bestehender Anlagenlayouts fällt insbesondere die Inhomogenität zwischen den einzelnen Anlagen aus. Diese wird unter anderem durch die räumlichen Gegebenheiten an den einzelnen Standorten, wie auch durch die erforderliche Ausbringung der Abfüllanlagen und unterschiedliche Anlagenkonzepte der Hersteller bedingt. Bei der Modellierung des Layouts der idealisierten Abfüllanlage wurden Besonderheiten einzelner Abfüllanlagen nicht in das Modell integriert. Vielmehr wurden jeweils Gemeinsamkeiten, beziehungsweise Bereiche der einzelnen Anlagenlayouts mit der höchsten Übereinstimmungen untereinander übernommen, um ein möglichst universelles Anlagenmodell zu erstellen.

Bei der Anordnung der Aggregate in den vier betrachteten Abfüllanlagen handelt es sich um eine mehr oder weniger ausgeprägte Form der sogenannten Arena-Aufstellung, die auch für den Arbeitsbereich der Bediener 1 und 2 im idealisierten Modell übernommen wurde. Eine Arena-Aufstellung zeichnet sich dadurch aus, dass die zu bedienenden Aggregate um den zentralen Arbeitsplatz des Bedieners angeordnet sind und die Transportstrecken aus Sicht des Bedieners zumeist hinter den Aggregaten verlaufen. Dies hat den Vorteil, dass der Bediener mehrere Maschinen gleichzeitig überwachen kann und bei Störungen jeweils nur kurze Strecken zurücklegen muss.

Das Verhältnis von Länge zu Breite (L:B) der Grundfläche der Abfüllanlagen beträgt bei den Anlage [2, 3 und 4] jeweils  $L:B_{[2]} = 2,1$  respektive  $L:B_{[3]} = 2,5$  und  $L:B_{[4]} = 2,4$  ein. Für das Modell wird der Mittelwert  $L:B = 2,3$  verwendet. Anlage [1] wird nicht berücksichtigt, da diese Anlage aufgrund der stark

ausgeprägten Arena-Aufstellung und einen in das Layout integrierten Tunnelpasteur eine nahezu quadratische Grundfläche von  $L:B_{[1]} = 1,3$  einnimmt.

Die beiden Aggregate Flaschenreinigungsmaschine (Lfd. Nr. 11 in Abbildung 16 beziehungsweise Tabelle 1) und die Leerflaschen-Inspektionsmaschine (Lfd. Nr. 13) sind bei allen vier betrachteten Layouts vergleichbar angeordnet, was sich auch in ihrer Aufstellung im Modell widerspiegelt. Der Austrag der Einend-Flaschenreinigungsmaschine (Lfd. Nr. 11.5) übergibt die gereinigten Flaschen an eine Flaschenspeichertisch (Lfd. Nr. 12), der zunächst parallel der Flaschenreinigungsmaschine folgt, anschließend den Flaschenstrom um  $180^\circ$  umlenkt und ihn erneut längs der Flaschenreinigungsmaschine, zur staudrucklosen Flaschenvereinzelnung (Lfd. Nr. 12.5) führt. Die Transportbänder der vereinzelt Flaschen beschreibt einen weitere  $180^\circ$  Boden und führt die Flaschen schließlich zur Inspektionsmaschine. Bei den installierten Leerflaschen-Inspektionsmaschinen handelt es sich ausnahmslos um Linear-Maschinen.

Der Arbeitsbereich des Bediener Nr. 1 umfasst die Leerflaschen-Inspektionsmaschine (Lfd. Nr. 13), die Füllmaschine (Lfd. Nr. 15) und die Etikettiermaschine (Lfd. Nr. 19). Bei [1, 3 und 4] sind diese Aggregate in Arena-Aufstellung angeordnet, was in das idealisierte Modell übernommen wurde. Bei [2] ist dies nicht der Fall, da es sich bei dieser Anlage um eine parallele Doppelanlage handelt, die als gespiegelte Kammaufstellung angeordnet ist. Aufgrund der Spiegelung der beiden Anlagenteile ergibt sich durch diese Kammaufstellung für die Bediener jedoch wieder eine Arena-Aufstellung ihre Aggregate. Eine Vollflaschen-Inspektionsmaschine (Lfd. Nr. 19) ist in den Abfüllanlagen [1 und 2] vorhanden, beziehungsweise eingeplant. In beiden Fällen befindet sich die Vollflascheninspektion unmittelbar vor der Etikettiermaschine und wird auch in der idealisierten Aufstellung entsprechend in die Arena-Aufstellung der Aggregate des Bediener Nr. 1 eingebunden. Auch wenn Vollflascheninspektion in den Abfüllanlagen zurzeit nicht zum Stand der Technik gezählt wird und bei den vier zugrundeliegenden Abfüllanlagen nur bei einer der Anlagen tatsächlich eine solche Maschine installiert ist, wird der Inspektion von Vollgut bei Getränken in Zukunft eine steigende Bedeutung beigemessen. Aus diesem Grund wurde dieser Maschinentyp ebenfalls in das idealisierte Modell übernommen.

Der Bereich der Aus- und Einpackmaschinen (Lfd. Nr. 6 und 21) und der Kastenwaschmaschine (Lfd. Nr. 8) ist weniger homogen. Bei [3 und 4] sind diese Aggregate parallel zueinander angeordnet. Bei Anlage [1 und 4] ist die Kastenwaschmaschine parallel zur Flaschenreinigungsmaschine aufgestellt. Anlage [4] hat daher die größte Übereinstimmung mit den anderen drei Layouts und wurde als Vorlage für die idealisierte Aufstellung übernommen.

Die Ent- und Bepalettiermaschinen (Lfd. Nr. 2 und 23) sind entweder parallel zu den Aus- und Einpackmaschinen angeordnet [4] oder aber seitlich, wie bei [1, 2, und 3]. Die Anordnung erfolgt im idealisierten Layout daher ebenfalls seitlich, zumal [4] eine Ausnahme darstellt, da sich hier die beiden Maschinen in einem durch eine Wand abgetrennten und tieferliegenden Gebäudeteil befinden.

Der Verlauf der Transportstrecken zwischen den einzelnen Aggregaten der vier betrachteten Anlagenlayouts ist ebenfalls heterogen. Durch die vorherrschende Arena-Aufstellung ergibt sich jedoch die zuvor bereits genannte Gemeinsamkeit, dass die Transportstrecken aus Sicht der Bediener überwiegend hinter den Aggregaten geführt werden. Dem wurde im idealisierten Modell Rechnung getragen.

Nicht in das Modell übernommen wurden unter anderem Versorgungswege für die Arbeitsbereiche, wie zum Beispiel für die Entsorgung von gepressten Etiketten aus der Flaschenreinigungsmaschine (Bediener 2) oder durch die Inspektionsmaschine ausgeleiteter Flaschen (Bediener 1).

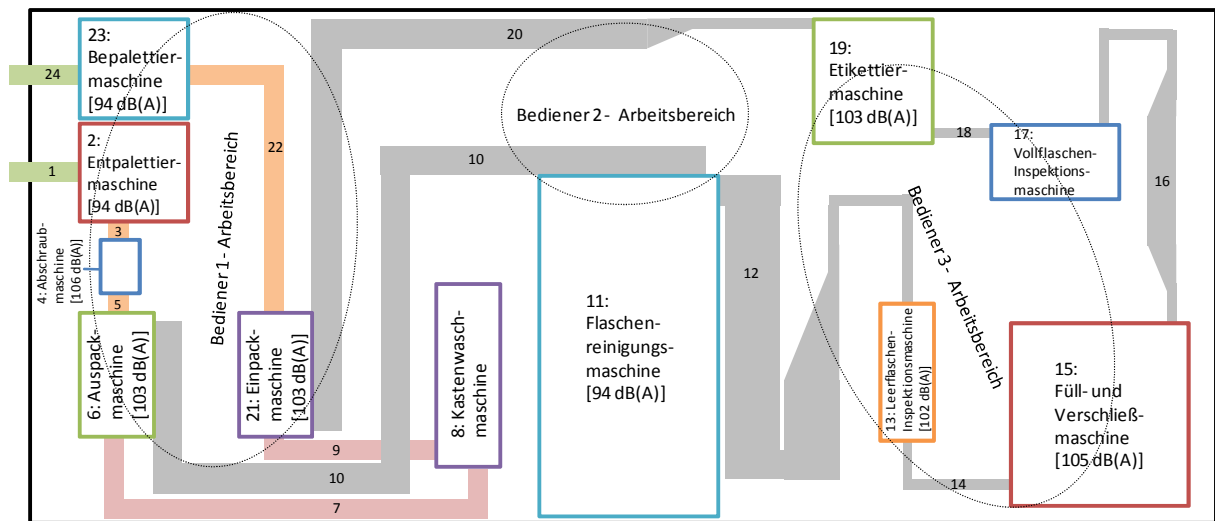


Abbildung 16: Qualitatives Modell einer Getränkeabfüllanlage [Ø Schallleistungspegel  $L_{WA}$  (50.000 Ft/h)]

### Raumakustische Maßnahmen

PROBST stellte bereits 1977 fest, „dass der Einbau von Schallschluckdecken und die absorbierende Verkleidung von Wänden den Schallpegel an den Arbeitsplätzen der lärmintensiven (Füller, FRM) um 1-4 dB(A) und an den leiseren Maschinen (Etikettiermaschine, Packer) um 4-8 dB(A) vermindert. Raumakustische Maßnahmen ... gehören zum Stand der Technik und sind unabdingbare Voraussetzung für die akzeptable schalltechnische Ausführung einer Abfüllanlage.“

In einem Beispiel wurden die Schalldruckpegel einzelner Aggregate einer Abfüllanlage vor und nach Einbringung einer Kulissendecke gegenübergestellt, mit dem Ergebnis, dass die „Nachhallzeit ... im relevanten Frequenzbereich von 3,7 s auf 1,5 s gesenkt“ wurde. Durch den Einbau der Akustikdecke waren die erzielten Immissionsschallpegel praktisch nicht mehr von der Raumerückwirkung beeinflusst, wohl aber von der gegenseitigen Überlappung der Schallfelder. [29, Abschnitt 11.2]

Für das qualitative Modell wird, da Akustikdecken auch heute noch dem Stand der Technik entsprechen und in allen Abfüllanlagen installiert sind, davon ausgegangen, dass die vorhandenen sekundären Lärmschutzmaßnahmen den Raumeinfluss auf die Immission soweit reduzieren, dass er für dieses Modell vernachlässigt werden kann.

### Schallausbreitung

Die Schallemission der Aggregate erfolgt in alle Richtungen des Raumes, wobei je nach Aggregat eine unterschiedliche Richtcharakteristik der Emission festgestellt wurde, wie am Beispiel der mittleren Richtcharakteristik von Füllmaschinen in Abbildung 17 zu erkennen ist. Die Emission in dem Bediener zugewandten Bereich der Ein- und Auslaufsterne ist erkennbar höher, als auf der Rückseite der Füllmaschine. Bei Flaschenreinigungsmaschinen ist diese gerichtete Emission noch ausgeprägter. [29]

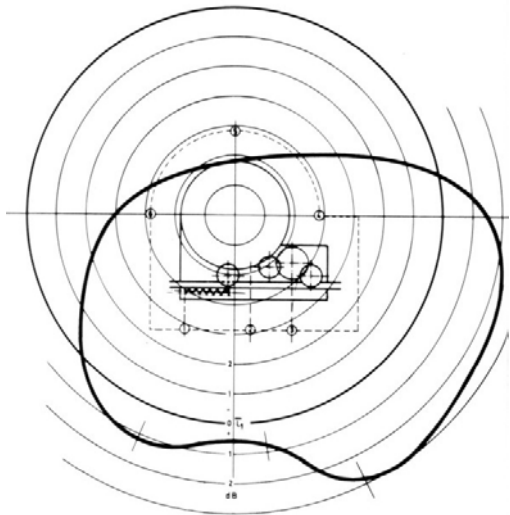


Abbildung 17: Mittlere Richtcharakteristik von Füllmaschinen [29]

### Schlussfolgerungen für die Konzeption des Messverfahrens

Das Anlagenlayout des qualitativen Modells zeigt zahlreiche Aggregate unterschiedlicher Größe, die auf engem Raum durch Puffer- oder Einzeltransportstrecken verkettet sind. Ein Messverfahren, das in der Lage sein soll unterschiedlichste Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen zu lokalisieren, sollte daher folgende Anforderungen erfüllen:

- **Mobilität** – Der gesamte Aufbau des Messgerätes sollte so gestaltet sein, dass es von einer Person innerhalb der gesamten Abfüllanlage über einen Arbeitstag von acht Stunden von einem Messpunkt zum nächsten bewegt werden kann. Dies setzt voraus, dass der Messaufbau sowohl in seinen Abmessungen als auch in seinem Gewicht gewisse praktische Grenzen nicht überschreitet.

Die Abmessungen des Messgerätes sollten dabei die Breite der meisten begehbaren Bereiche der Abfüllanlage nicht überschreiten. Als sinnvolle Obergrenze wird eine Breite von maximal 1,5 Metern erachtet. Des Weiteren sollte die Zumutbarkeit beim Heben und Tragen von Lasten nicht überschritten werden. Laut einer Empfehlung des Bundesministers für Arbeit und Sozialordnung, veröffentlicht im Bundesarbeitsblatt 1981/11, ist diese Grenze bei häufigem Heben und Tragen für Frauen und Männer zwischen 19 und 45 Jahren bei 10 kg beziehungsweise 30 kg erreicht [5].

- **Flexibilität** – Der Messaufbau sollte die Ausrichtung der Akustischen Kamera in alle Richtungen des Raumes und in unterschiedlichen Höhen erlauben, um eine mögliche Schallemissionsquelle aus verschiedenen Perspektiven erfassen zu können.
- **Akustisch ungünstige Umgebungen** – Nach LIESEGANG [18] zeichnet sich eine „Akustisch ungünstige Umgebungen ... aus durch starke Hintergrundgeräusche durch Arbeitsmaschinen und Industrieprozesse, Schallreflexionen an schallharten Oberflächen (und) Umweltgeräusche“. Diese Rahmenbedingungen gelten auch für das qualitative Modell mit sich gegenseitig überlappenden Schallfeldern einzelner Maschinen und der gegebenenfalls vorhandenen Richtcharakteristik der Aggregate. Verschärfend kommt hinzu, dass die Transportbänder, als eine mögliche Lärmquelle, die gesamte Abfüllanlage durchziehen. Da „ein großer Nachteil des Beamforming-Algorithmus (bei einer Akustischen Kamera) ... die hohe Empfindlichkeit für Hintergrundgeräusche (ist, kann bei gleich lauten Schallquellen) ... vor und hinter dem Array

... nicht unterschieden werden, welche Quelle sich auf welcher Arrayseite befindet. In der Schallkarte tauchen alle Quellen gleichberechtigt auf“. Vor diesem Hintergrund erscheint eine Abschirmung der Mikrofone auf dem Ring-Array als unumgänglich. Ein „schallschluckender oder schallzerstreuender Hintergrund“ wird auch von Hersteller der Akustischen Kamera [10] für den Einsatz außerhalb von Akustiklaboren empfohlen.

## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Anhand der Ergebnisse aus AS 1.1, dem Vergleich verschiedener Anlagenlayouts moderner Abfüllanlagen und der durchgeführten Literaturrecherche wurde ein qualitatives Model einer idealisierten Abfüllanlage entwickelt. Das Model ermöglicht die Konzeption des Messverfahrens im folgenden AS 2.1 sowie einen ersten Entwurf zur Abschirmung der Akustischen Kamera vor Störgeräuschen in der Umgebung einer Getränkeabfüllanlage.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

## **5.2 Arbeitsschritt 2: Messverfahren**

### **5.2.1 AS 2.1: Konzeption eines Messverfahrens auf Basis der akustischen Kamera**

#### **Zielstellung**

Konzeption eines praxistauglichen Messverfahrens auf Basis der Akustischen Kamera, das sich an den genormten Verfahren orientiert. Bestandteil dieses Arbeitsschrittes ist unter anderem die Auswahl der Mikrofone und die Gestaltung ihrer Anordnung, die Entwicklung und Konstruktion einer zweckmäßigen Abschirmung und das Bestimmen geeigneter Messbedingungen wie Aufstellungsorte, Entfernung und Winkel zum Messobjekt sowie die notwendige Dauer und Anzahl durchzuführender Messungen.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 2,45 MM (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1). Der Arbeitsschritt hat 1,00 MM mehr in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

##### **Anmerkung zur Auswahl der dargestellten Ergebnisse in diesem Arbeitsschritt**

In Arbeitsschritt AS 2.5 (siehe Abschnitt 5.2.5, ab Seite 63ff) wird die endgültige Fassung des in diesem Forschungsvorhaben zu entwickelnden Messverfahrens beschrieben. Die Arbeitsschritte AS 2.1 und AS 2.2 beinhalten die Konzeption und die Optimierung des Messverfahrens, die letztlich in dem in AS 2.5 detailliert und vollständig beschriebenen Verfahren münden.

Eine Beschreibung sämtlicher in AS 2.1 und AS 2.2 aufgestellten Konzepte, deren kontinuierliche Veränderung und Verbesserung, in Verbindung mit den jeweiligen Messergebnissen, würde unweigerlich auf die mehrfache Beschreibungen ein und derselben Verfahrensbestandteile hinauslaufen. Daher werden in diesen beiden Abschnitten, aus Gründen der Übersichtlichkeit, nur jene Ergebnisse dargestellt, die letztlich auch Eingang in die endgültige Fassung gefunden haben oder für das Verständnis des Messverfahrens erforderlich erscheinen.



### 5.2.1.1 Auswahl der Mikrofone und die Gestaltung ihrer Anordnung

Für das zu entwickelnde Messverfahren soll eine Akustische Kamera, als bildgebendes Verfahren zur ortsgenauen Lokalisierung von Schallemissionsquellen eingesetzt werden. Die Auswahl der Mikrophone und deren Anordnung wurden bereits vor Antragstellung, in Zusammenarbeit mit der GFal, (Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. in Berlin) vorgenommen und im Rahmen dieses Arbeitsschrittes nochmals überprüft.

Für den zu erwartenden Einsatzbereich, der sowohl einzelne Antriebe von Transporteuren mit Abmessungen unter 0,5 m als auch vollständige Aggregate mit mehreren Metern Durchmesser umfasst, erschien der „Ring-Array 32-75“ am besten geeignet. Um „die Abbildungsfehler im Randbereich der Schallkarten kleiner als 1 dB zu halten, ist der Messabstand“ nach LIESEGANG [18] „so zu wählen, dass das zu messende Objekt innerhalb eines Array-Öffnungswinkels von  $60^\circ$  ( $\pm 30^\circ$  um die Array-Hauptachse) liegt“. Bei einer maximalen Einsatzentfernung vom 5 m [10] ergibt sich daraus eine maximale Objektgröße von rund 6 m (Formel 6), mit der die meisten Aggregate in einer Abfüllanlage erfasst werden können. Sämtliche Kenndaten des Arrays sind in Abschnitt 4.1 aufgelistet.

Formel 6:  $\tan \alpha = \text{Gegenkathete} / \text{Ankathete}$  ; mit  $\alpha = 30^\circ$  und Ankathete = 5,0 m

$\tan 30^\circ * 5,0 \text{ m} = \text{Gegenkathete} = 2,9 \text{ m}$

Objektgröße =  $2 * \text{Gegenkathete} = 2 * 2,9 = 5,8 \text{ m} \approx 6 \text{ m}$

Arrays sind in den Formen Ring-, Sphere-, Star- oder als Custom-Arrays verfügbar. Sphere-Arrays sind für den Einsatz bei Rundum-Messungen, sowie für Messungen unter räumlich beengten Verhältnissen bei hohen Frequenzen geeignet, wie sie zum Beispiel im Fahrgastraum von PKWs vorkommen. Aufgrund der kugelförmigen Anordnung der Mikrofone sind sie für den Anwendungszweck in einer Abfüllanlage, bei der einzelne Aggregate und nicht die Gesamtheit der Abfüllanlage untersucht werden soll, ungeeignet. Star-Arrays sind für den Einsatz im Außenbereich bei Messungen auf weite Distanz konzipiert, zum Beispiel Industrieanlagen und Windkraftwerke. Custom-Arrays werden speziell auf einen Anwendungszweck optimiert. Sie bieten meist eine höhere akustische Auflösung, sind jedoch unflexibel im Anwendungszweck und daher für Abfüllanlagen ebenfalls ungeeignet. Ring-Arrays sind für Messsysteme konzipiert, die vornehmlich unter Freifeldbedingungen oder im Akustiklabor eingesetzt werden und bieten die größtmögliche Flexibilität in der Anwendung. Aus diesem Grund würde für dieses Forschungsvorhaben ein Ring-Array mit USB-Kamera im Zentrum ausgewählt (siehe Abbildung 18). Das Ring-Array wird auf dem im Lieferungsumfang enthaltenen Manfrotto-Stativ befestigt.

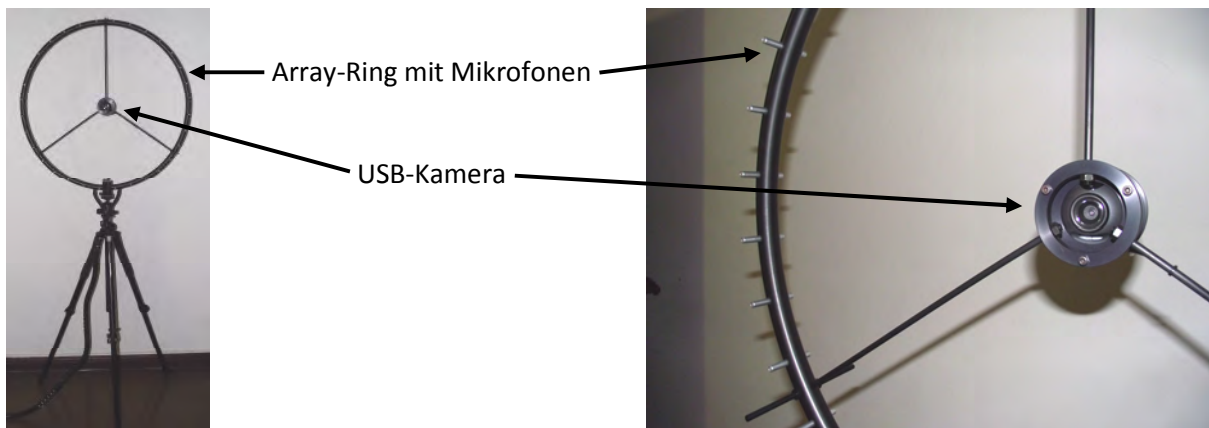


Abbildung 18: Ring-Array mit USB-Kamera auf Stativ

### 5.2.1.2 Abschirmung der Akustischen Kamera in akustisch ungünstigen Umgebungen

Die notwendige Abschirmung der Akustischen Kamera gegen Hintergrundgeräusche in einer akustisch ungünstigen Umgebung, erfolgte in diesem Arbeitsschritt AS 2.1 durch den Transportkoffer des Ring-Arrays (1. Version der akustischen Abschirmung). Dieser Koffer wurde mit Ösen versehen, die es erlauben, ihn zwischen zwei stabilen Stativen für Lautsprecherboxen (Lieferant: MPM Handels GmbH) aufzuhängen. Nachdem der Ring-Array der Akustischen Kamera auf das zu untersuchende Objekt ausgerichtet ist, können die Stative mit dem Koffer so aufgestellt werden, dass der Koffer ca. 25 cm bis 30 cm parallel hinter dem Ring-Array hängt und diesen von Schallquellen auf der Rückseite des Ringes abschirmt.

Bei Testmessungen in einem schallharten Raum konnte mit dieser Abschirmung eine Schallquelle auf der Rückseite der Akustischen Kamera soweit abgedämmt werden, dass sie auf der Schallkarte nicht wiedergegeben wurde. Abbildung 19 zeigt die Schallquelle (Fingerschnippen) zunächst vor der Akustischen Kamera. Der Handballen, als Ort der Schallentstehung, wird einem Maximalwert von 79,5 dB präzise lokalisiert. In Abbildung 20 wird die Schallquelle hinter den Ring-Array verlagert. Das Fingerschnippen wird wiederum mit 78,8 dB in der Schallkarte dargestellt, obwohl die Quelle im Videobild nicht sichtbar ist. Wird der Ring-Array mittels Koffer abgeschirmt, kann keine Einzelquelle in der Schallkarte lokalisiert werden (Abbildung 21), vielmehr zeigt die Karte ein diffuses Schallbild. Der Maximalwert wird im Vergleich zu den beiden anderen Messungen um rund 13 dB auf 65,9 dB reduziert, was sich auch in den maximalen Peaks widerspiegelt, die in Abbildung 22 gegenübergestellt werden (jeweils gekennzeichnet durch die Nummer).

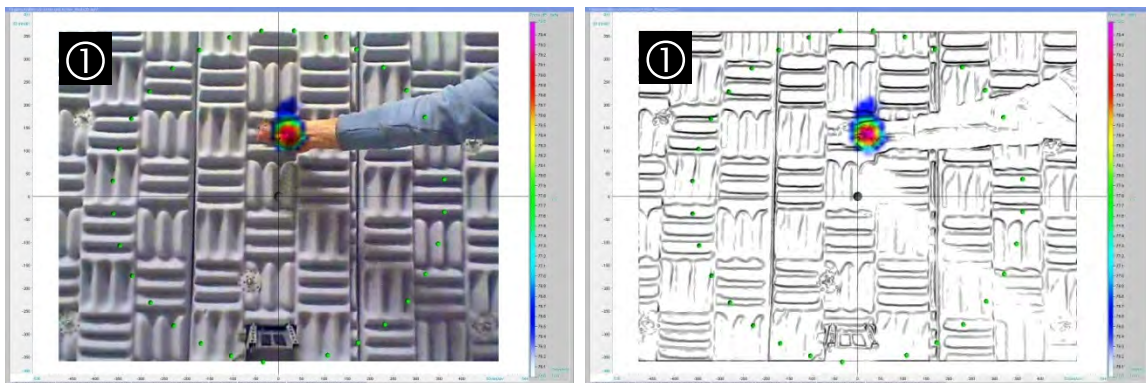


Abbildung 19: Fingerschnippen vor dem Ring-Array – ohne Abschirmung (links als Bild, rechts in der Konturdarstellung)

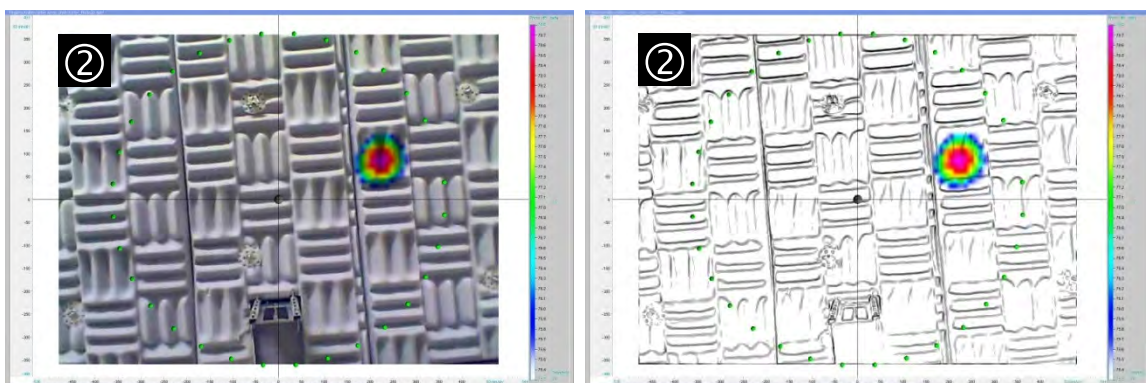


Abbildung 20: Fingerschnippen hinter dem Ring-Array – ohne Abschirmung (links als Bild, rechts in der Konturdarstellung)

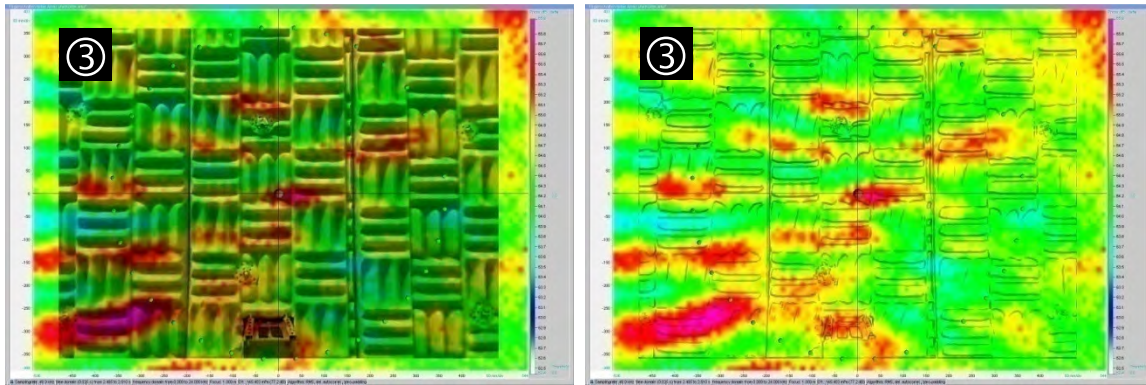


Abbildung 21: Fingerschuppen hinter dem Ring-Array – mit Abschirmung (links als Bild, rechts in der Konturdarstellung)

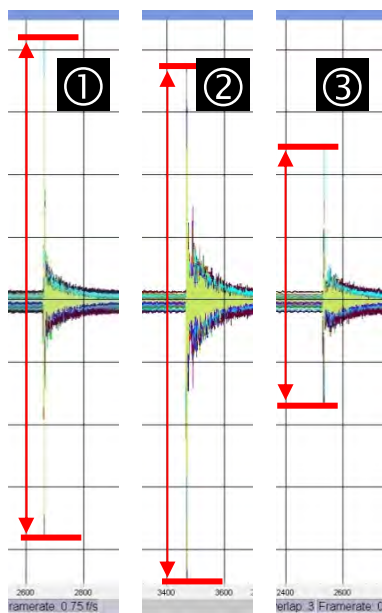


Abbildung 22: In Abbildung 19 bis Abbildung 21 dargestellte Peaks

### Vorteile der 1. Version

Neben der funktionierenden Abdämmung rückwärtiger Schallquellen besteht ein weiterer wesentlicher Vorteil dieses Aufbaus in der Einfachheit der Konstruktion und dass außer der zusätzlichen Boxenstative keine weitere Bauteile notwendig sind.

### Nachteile der 1. Version

Ein Nachteil, der letztlich der Einfachheit des Aufbaus geschuldet ist, ist die eingeschränkte Flexibilität des gesamten Messsystems. Die Abschirmung kann einer vertikalen Auslenkung des Ring-Arrays nicht folgen, da der Koffer stets senkrecht zwischen den Stativen hängt. Beim Kippen des Ring-Arrays befindet sich die Abschirmung somit nicht mehr genau senkrecht hinter dem Ring-Array. Ein weiterer Nachteil ist die beschränkte Mobilität des gesamten Versuchsaufbaus, da für jede Veränderung der Kameraposition zunächst die Abschirmung ab- und anschließend wieder aufgebaut werden muss.

Wesentlicher Nachteil ist jedoch die schallharte Oberfläche, wie sich bei Messungen an der Flaschentransportstrecke (vgl. Abschnitt 4.6) herausstellte. Abbildung 23 zeigt einen Ausschnitt der Kanaldaten, die bei der Messung des in Abbildung 25 dargestellten Antriebs (linkes Bild) aufgezeichnet wurden, ohne dass das Ring-Array vom Koffer abgeschirmt wurde. Das rechte Bild in Abbildung 25 zeigt

die entsprechende Schallkarte mit dem Grundgeräusch des Antriebes, das am Übergang zwischen Motor und Getriebe seinen Ursprung hat. Der in Abbildung 23 gewählte Ausschnitt beinhaltet neben dem Grundgeräusch des Antriebes auch das Klickgeräusch des Kalibriertesters (Klicker, Kreis in Abbildung 25). Das Klicken wird im Bild durch die gestrichelte Klammer hervorgehoben.

Die Aufnahme wurde mit dem Koffer als Abschirmung wiederholt. Die Kanaldaten in Abbildung 24 weisen im Vergleich zu den Daten ohne Abschirmung eine zweite Schallquelle aus, von der angenommen werden kann, dass es sich um die Reflektion des Klickgeräuschs an der Vorderseite der Abschirmung handelt. Für diese Annahme sprechen die in Abbildung 26 dargestellten Schallkarten. Im linken Bild wird ausschließlich der Bereich des Klickgeräusches aus Abbildung 24 dargestellt. Dieses befindet sich, wie bei einer exakten Kalibrierung zu erwarten ist, genau an der Position des Lautsprechers des Kalibriertesters. Im rechten Bild wird ausschließlich der in Abbildung 24 gekennzeichnete Bereich der mutmaßlichen Reflektion dargestellt. Diese 2. Schallquelle liegt dabei auf der Geraden (gestrichelte Linie) die vom Lautsprecher des Klickers und dem Zentrum des Ring-Arrays (die Mikrofone des Ring-Arrays werden in der Schallkarte als grüne Punkte dargestellt) gebildet wird. Jede Reflektion muss zwischen der Schallquelle und dem Zentrum des Ring-Arrays auf dieser Geraden liegen.

Ein weiterer Beleg für die Annahme einer Reflektion an der Vorderseite der Abschirmung lässt sich aus der zeitlichen Verzögerung des Klickgeräusches und der mutmaßlichen Reflektion ableiten. Über die Verzögerungszeit  $t_{\text{Verzögerung}}$  vom ersten Kontakt der Schallwellen mit dem Ring-Array bis zum ersten Auftreffen der reflektierten Schallwellen (Formel 7) und der Schallgeschwindigkeit  $c_{25\text{ °C}}$  (vgl. Abschnitt 5.2.1.4) lässt sich nach Formel 8 näherungsweise die Strecke  $S_{\text{Verzögerung}}$  berechnen, die der Schall während der Reflektion zurücklegt. Handelt es sich um eine Reflektion, so muss  $S_{\text{Verzögerung}}$  dem zweifachen Abstand zwischen Ring-Array und Abschirmung entsprechen. Nach Formel 9 ergibt sich für  $S_{\text{Abstand Ring-Array zur Abschirmung}}$  somit eine Strecke von rund 27 cm. Dies deckt sich mit den ca. 25 cm bis 30 cm Abstand, die der Koffer bei dem gewählten Aufbau parallel hinter dem Ring-Array hing.

Formel 7  $t_{\text{Klicker}} - t_{\text{Reflektion}} = t_{\text{Verzögerung}}$   
 $4.001.375 \mu\text{s} - 3.999.800 \mu\text{s} = 1.575 \mu\text{s} = 0,001575 \text{ s}$

Formel 8  $c_{25\text{ °C}} * t_{\text{Verzögerung}} = S_{\text{Verzögerung}}$   
 $346,4 \text{ m/s} * 0,001575 \text{ s} = 0,546 \text{ m}$

Formel 9  $S_{\text{Verzögerung}} * \frac{1}{2} = S_{\text{Abstand Ring-Array zur Abschirmung}}$   
 $0,546 \text{ m} * \frac{1}{2} = 0,273 \text{ m}$

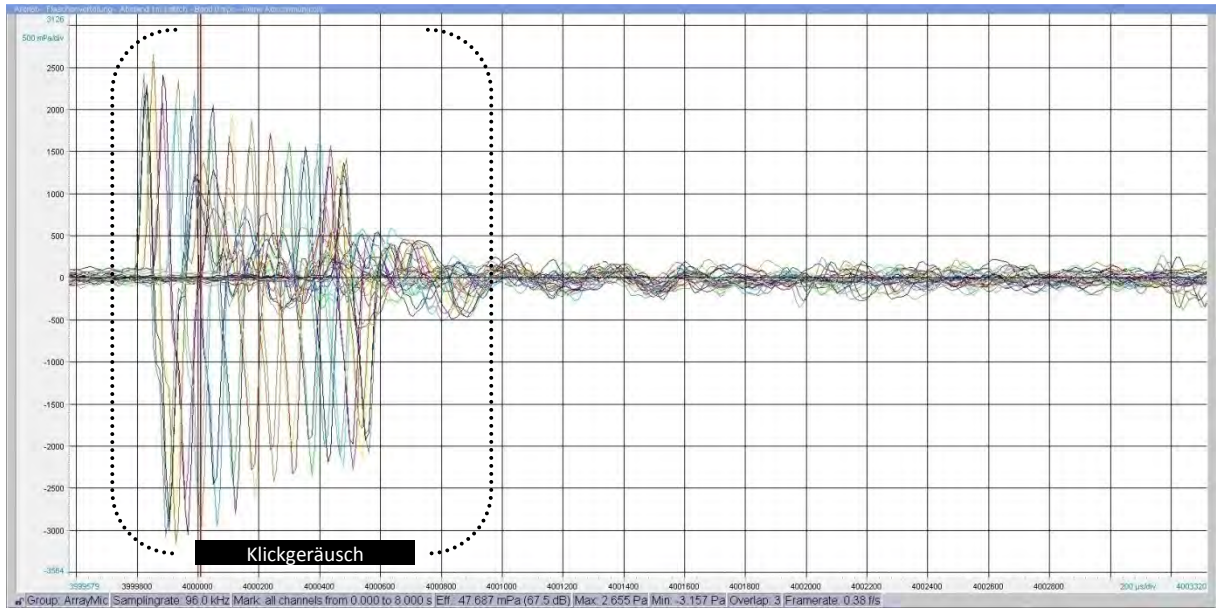


Abbildung 23: Kanaldaten des Motors mit Klickgeräusch des Kalibriertesters (Aufnahme ohne Abschirmung)

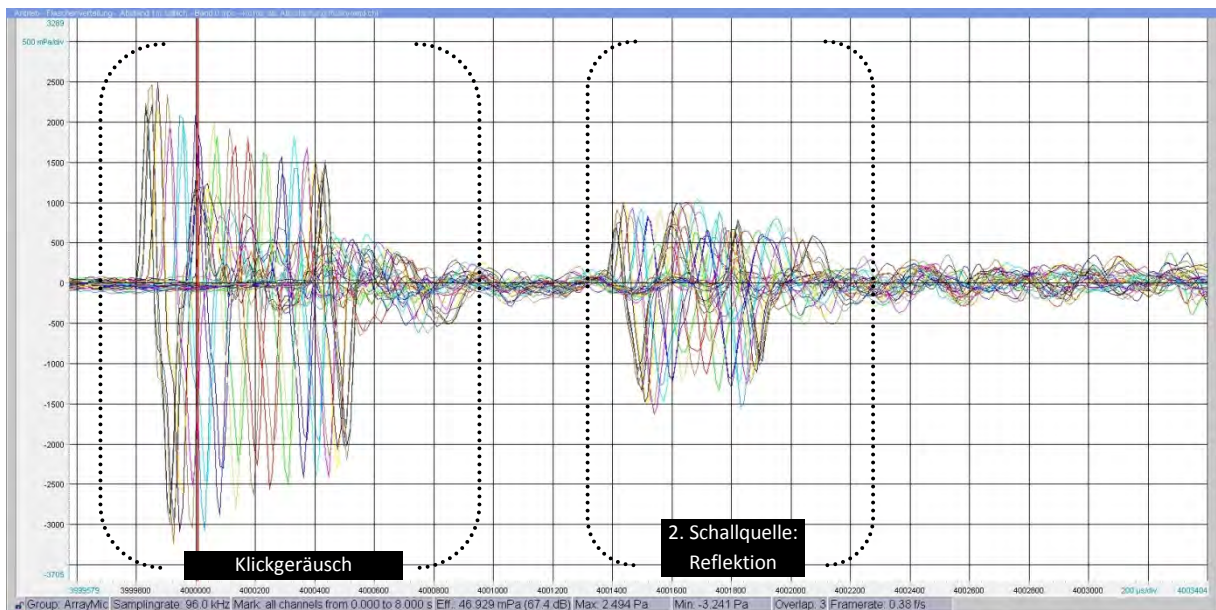


Abbildung 24: Kanaldaten des Motors mit Klickgeräusch des Kalibriertesters und Reflektion an der Abschirmung

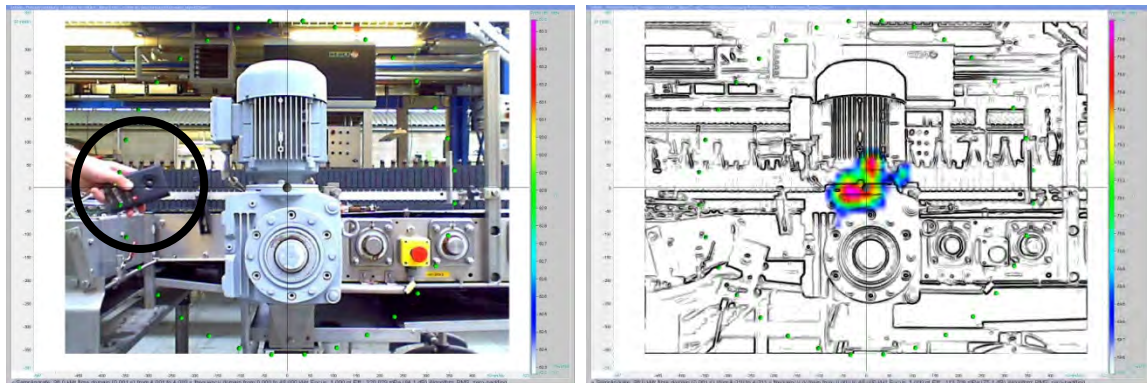


Abbildung 25: Antrieb und Klicker (Kreis im linken Bild) und Grundgeräusch des Antriebs (rechtes Bild)

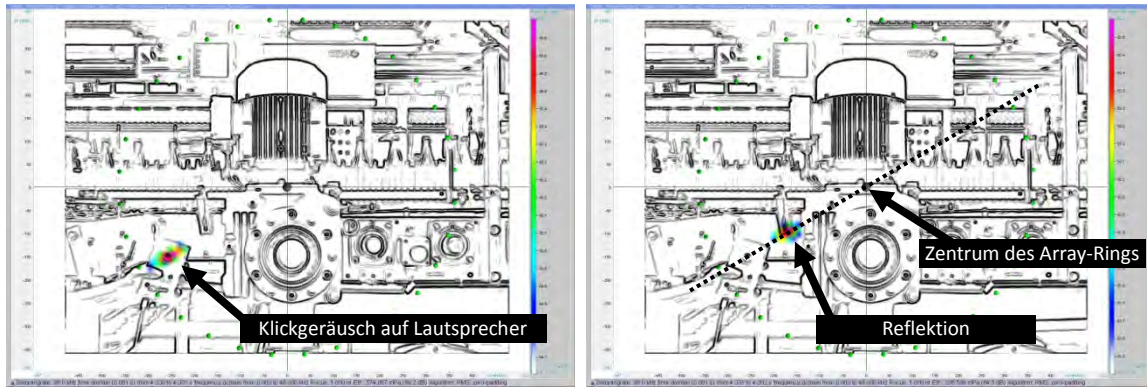


Abbildung 26: Klickgeräusch und Reflektion (Pfeile)

Durch die Reflektion von Schallwellen an der Vorderseite der Abschirmung ist anzunehmen, dass auch die Effektivwerte ansteigen. In Tabelle 2 wurden die Effektivwerte unmittelbar vergleichbarer Messreihen aufgelistet und die Differenz zwischen Effektivwert ohne und mit Abschirmung berechnet. Es scheint, dass mit zunehmender Bandgeschwindigkeit der Einfluss der Reflektion zunimmt, was sich in einer positiven Differenz bei 0,6 m/s Bandgeschwindigkeit niederschlägt. Da die Aufnahmen jedoch im Technikum durchgeführt wurden und gleichzeitig andere Lärmquellen, unter anderem ein Brüdenverdichter, vorhanden waren, kann dies nicht mit Sicherheit bestätigt werden.

Tabelle 2: Effektivwerte des Antriebs ohne und mit Abschirmung

Bandgeschwindigkeit	Fokus (Abstand)	Ohne Abschirmung: Effektivwert (Algorithmus RMS, 8 s)	Mit Abschirmung: Effektivwert (Algorithmus RMS, 8 s)	Differenz
0,0 m/s	1 m	67,5 dB	67,4 dB	- 0,1 dB
0,1 m/s		70,9 dB	71,4 dB	+ 0,5 dB
0,6 m/s		74,0 dB	74,8 dB	+ 0,8 dB
0,0 m/s	2 m	68,0 dB	67,3 dB	- 0,7 dB
0,1 m/s		68,4 dB	68,4 dB	±0,0 dB
0,6 m/s		72,1 dB	72,8 dB	+ 0,7 dB

### 5.2.1.3 Anforderungen an Mobilität und Flexibilität des Messverfahrens

Der Transport des Ring-Arrays und des Datenrekorder erfordert den Einsatz stabiler Transportboxen, um eine Beschädigung insbesondere der Mikrophone am Ring-Array zu verhindern. Diese waren im Lieferumfang der Akustischen Kamera bereits vorhanden. Da für die akustische Abschirmung (1. Version) der Transportkoffer des Ring-Arrays Verwendung findet, wird keine weitere Transportverpackung benötigt.

Die Mindestbreite der Messvorrichtung ohne Abschirmung wird durch den Durchmesser des verwendeten Ring-Arrays von 0,75 m vorgegeben. In Verbindung mit der Abschirmung erhöht sich die Breite in Höhe der Akustischen Kamera auf rund einen Meter. Im Bereich der Füße beträgt die Breite ca. 1,5 m. Somit wird die in AS 1.3 ermittelte Obergrenze von 1,5 m eingehalten.

Der gesamte Aufbau, bestehend aus Ring-Array (2,9 kg) und Manfrotto-Stativ (3,5 kg) sowie Abschirmung (3,5 kg) und Lautsprecherstativen (5,0 kg) besitzt ein Gewicht von 14,9 kg. Die in Arbeitsschritt AS 1.3 aufgestellten Forderungen, dass das Gesamtgewicht die für häufiges Heben und Tragen empfohlene Obergrenze [5] nicht überschreitet, wird folglich nur teilweise erfüllt. Bei Männern liegt die Grenze bei 30 kg und somit 15,1 kg über dem Gesamtgewicht. Für Frauen überschreitet der Versuchsaufbau jedoch die empfohlene Grenze von 10 kg um fast die Hälfte. Da Akustische Kamera und Abschirmung jedoch stets getrennt bewegt werden, ist der Messaufbau auch für weibliche Bediener geeignet.

Die Forderung aus AS 1.3, nach Flexibilität in der räumlichen Ausrichtung der Akustischen Kamera, wird durch die Höhenverstellung der Lautsprecherstative, zwischen etwa 1,2 m bis 2,0 m Höhe der USB-Kamera über dem Boden ermöglicht. Horizontal bestehen keine Einschränkungen in der Ausrichtung der Kamera. Wird diese jedoch Vertikal gekippt, kann die Abschirmung der Auslenkung des Ring-Arrays nicht folgen, da der Koffer stets senkrecht zwischen den Stativen hängt.

#### **5.2.1.4 Messeinstellungen**

##### **Messpunkte und Positionierung der Akustischen Kamera**

Die Lokalisierung und Bewertung von Schallquellen bei Getränkeabfüllanlagen erfolgt in erster Linie, um die Lärmquellen, die auf den Bediener der Anlagen und Aggregate einwirken, sichtbar zu machen. Da bei laufendem Abfüllbetrieb grundsätzlich alle Aggregate sowie einzelne Teile von Aggregaten und das bewegte Gut mögliche Lärmquellen darstellen, kommen für eine umfassende Untersuchung einer Getränkeabfüllanlage sämtliche in Tabelle 1 (ab Seite 23ff) aufgeführten, wesentlichen Lärmemitteln in Frage.

Für die ortsgenaue Lokalisierung der Schallemissionsquellen wird das Messsystem so positioniert, dass das zu untersuchende Objekt aus Tabelle 1 mit seinem gesamten Umfang im Bildbereich der USB-Kamera sichtbar wird. Der Abstand zwischen Objekt und Messsystem ergibt sich dabei aus der Größe des Objektes und kann zwischen 0,5 m und 5,0 m liegen. Bei Objekten mit einem Durchmesser > 6 m (vgl. Formel 6 in Abschnitt 5.2.1) ist das Objekt in mehrere Bereiche zu unterteilen, um den maximalen Arbeitsbereich der Akustischen Kamera von 5 m nicht zu überschreiten.

Die Videokamera befindet sich für die Aufnahmen in 1,55 m  $\pm$  0,075 m Höhe über den Boden, in Anlehnung an DIN EN ISO 9612 [25] für einen stehenden Beschäftigten. Über das Stativ kann die Neigung des Ring-Arrays so verändert werden, dass das gewünschte Objekt im Fokus des Videobildes liegt. Die Abschirmung steht in diesem Fall jedoch nicht mehr senkrecht hinter dem Array.

##### **Softwareeinstellungen für die Aufnahme**

Die Aufnahmen der Akustischen Kamera werden mit der Software NoiselImage (Version 4.1.2) durchgeführt. Die für die Aufnahme erforderlichen Softwareeinstellungen und Messparameter werden in diesem Abschnitt aufgelistet und erläutert. Ein Screenshot der Aufnahmeeinstellungen ist in Abbildung 66 auf Seite 67 dargestellt.

Zunächst sind der verwendete Datenrekorder (Recorder device) und das Ring-Array (Channel Group) auszuwählen. Gegebenenfalls können einzelne Mikrofone in der Vorschau (Active preview sensors) und der bei der Aufnahme (Active record sensors), zum Beispiel wenn sie beschädigt oder verbogen wurden, deaktiviert werden.

Nach [43] wird „die Schallgeschwindigkeit in Luft ... durch das Medium Luft bestimmt und ist nicht von der Amplitude, der Frequenz und der Wellenlänge des Schalls abhängig. Bei einem idealen Gas ist die Schallgeschwindigkeit nur von der Temperatur abhängig und unabhängig vom Gasdruck (statischer Luftdruck). Diese Abhängigkeit gilt daher auch für Luft, die in guter Näherung als ideales Gas betrachtet werden kann.“ „Allgemein gilt mit hinreichender Genauigkeit als Formel für die Schallgeschwindigkeit  $c$  (Fortpflanzungsgeschwindigkeit) von Luft in m/s in Abhängigkeit von der Temperatur  $\vartheta$  in °C“:

Formel 10: Schallgeschwindigkeit  $c_{\vartheta} = 331,5 + 0,596 * \vartheta$  m/s

$$c_{15^{\circ}\text{C}} = 331,5 + 0,596 * 15 \text{ m/s} = 340,4 \text{ m/s}$$

$$c_{25^{\circ}\text{C}} = 331,5 + 0,596 * 25 \text{ m/s} = 346,4 \text{ m/s}$$

$$c_{35^{\circ}\text{C}} = 331,5 + 0,596 * 35 \text{ m/s} = 352,4 \text{ m/s}$$

Da für die hier eingesetzte Akustische Kamera die Entfernung zwischen Schallquelle und Ring-Array 5 m nicht überschreiten sollte [10], benötigt der Schall die Zeit  $t_{25^{\circ}\text{C}; 5 \text{ m}} = 14,4$  ms, um diese Distanz zu überbrücken. Bei Temperaturschwankungen von  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  um die eingestellte Standardtemperatur von  $25^{\circ}\text{C}$ , ändert sich die benötigte Schalllaufzeit auf  $t_{15^{\circ}\text{C}; 5 \text{ m}} = 14,7$  ms beziehungsweise  $t_{35^{\circ}\text{C}; 5 \text{ m}} = 14,2$  ms. Aufgrund der begrenzten maximalen Messdistanz bleibt der Einfluss der Temperatur deutlich unter einer Millisekunde. Somit wird davon ausgegangen, dass der Temperatureinfluss zwischen  $15^{\circ}\text{C}$  und  $35^{\circ}\text{C}$  vernachlässigbar ist und die eingestellte Standardtemperatur von  $25^{\circ}\text{C}$  beibehalten werden kann.

Nach dem Nyquist-Shannonschen Abtasttheorem [42] muss ein kontinuierliches, bandbegrenzt Signal, mit einer Minimalfrequenz von  $f = 0$  Hz und einer Maximalfrequenz von  $f_{\text{max}}$ , mit einer Frequenz größer als  $2 * f_{\text{max}}$  gleichförmig abgetastet werden, um es mit endlichem Aufwand beliebig genau approximieren zu können. Bei den Lärmquellen, die mit dem zu untersuchenden Messverfahren lokalisiert werden sollen, handelt es sich um Lärmquellen, die im Hörbereich des menschlichen Ohres liegen. Dieser umfasst etwa 16 Hz bis 16.000 Hz, für einen gesunden Menschen von 20 Jahren [20]. Folgt man dem Abtasttheorem, so ergibt sich eine Mindestabtastrate  $s_{\text{min}}$  von:

Formel 11:  $s_{\text{min}} = 2 * f_{\text{max}} = 2 * 16 \text{ kHz} = 32 \text{ kHz}$

Diese Bedingung wird mit der Abtastrate (Samplingrate in samples/s) von 48 kHz erfüllt. Die nächste niedrigere Abtastrate, die in den Softwareeinstellungen gewählt werden kann, liegt mit 24 kHz deutlich unter  $s_{\text{min}}$  und wäre somit unzureichend. Die nächst höhere, verfügbare Abtastrate ist 96 kHz. Dies würde dem dreifachen von  $f_{\text{max}}$  entsprechen. Da sie jedoch, aufgrund der höheren Datenmenge, mit einer um 50 % reduzierten Aufnahmedauer im Vergleich zur Abtastung mit 48 kHz verbunden ist und gegenüber dieser Abtastrate keine wesentlichen Verbesserungen bei der Abbildung der tatsächlichen Schallquelle mit sich bringt, wird die Abtastrate auf 48.000 Hz (samples/s) festgelegt. Die mit dieser Einstellung verbundene, nutzbare Aufnahmedauer von maximal 16 Sekunden ist ebenfalls für die vorgesehene Anwendung ausreichend.

Die eingehenden Daten der Mikrofone können über mehrere zur Verfügung stehende Verstärkungsstufen (Amplifier) vorverstärkt werden, um die Auflösung der Messdaten zu erhöhen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Kanaldaten der Mikrofone durch die Verstärkung die maximale Aussteuerung nicht überschreiten. In einem Versuch zur Visualisierung der Vorverstärkerstufen, wurde ein Antrieb (Abbildung 27) der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Flaschentransportstrecke mit der Akustischen Kamera bei verschiedenen Amplifier-Stufen aufgenommen. Die linke Aufnahme in Abbildung 28 zeigt die Schallkarte ohne jede Vorverstärkung (Amplifier = 0 dB) bei einem Delta von 0,1 dB (vgl. Abschnitt 4.5). Wie aus dem Bild hervorgeht, kann eine einzelne, dominante Schallquelle auch ohne Vorverstärkung lokalisiert werden. Allerdings nur bei kleinstmöglichem Delta von 0,1 dB, wodurch die beim Beamforming entstehenden Nebenkeulen ebenfalls abgebildet werden. Wird das Delta auf 0,2 dB oder wie im rechten Bild von Abbildung 28 auf 1,0 dB erhöht, so ist die Quelle nicht mehr zu lokalisieren. In Abbildung 29 wurden als Vorverstärkerstufen 21 dB (links) und 42 dB (rechts) gewählt. Mit diesen Einstellungen kann der Antrieb als dominante Lärmquelle eindeutig lokalisiert werden. Beim Vergleich der beiden Bilder zeigt sich anhand der etwas geringeren Ausdehnungen des Farbkreises,



dass durch die höhere Vorverstärkung bei 42 dB und gleichem Delta von 1,0 dB eine geringfügig präzisere Lokalisierung der Schallquelle möglich ist. Dies kann anhand von Tabelle 3 nachvollzogen werden. Die angegebenen Effektivwerte, berechnet nach dem RMS-Algorithmus für eine Integrationszeit von vier Sekunden (über die gesamte Messdauer), unterscheiden sich zwischen 21 dB und 42 dB Vorverstärkung noch um 2,2 dB. Zwischen 28 dB und 42 dB Vorverstärkung ändert sich der Effektivwert hingegen nur noch um 0,1 dB, was dafür spricht, dass ab 28 dB bis 42 dB die Vorverstärkung optimal ist, ohne zu übersteuern. Zwischen 0 dB und 28 dB Vorverstärkung beträgt die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten Effektivwert 23,5 dB. Ab 49 dB Vorverstärkung zeigte der Rekorder an, dass die Eingangssignale übersteuert aufgenommen wurden und somit für eine korrekte Auswertung nicht geeignet sind. Auch in diesem Bereich zwischen 49 dB und 84 dB Vorverstärkung ändern sich die abgelesenen Effektivwerte wieder signifikant (Differenz: 20,7 dB). Vor diesem Hintergrund und um in einer lärmintensiveren Umgebung ein Übersteuern zu vermeiden, wird für das Messverfahren die Vorverstärkung auf 28 dB festgelegt.



Abbildung 27: Versuchsaufbau mit Antrieb der Flaschentransportstrecke als Schallquelle

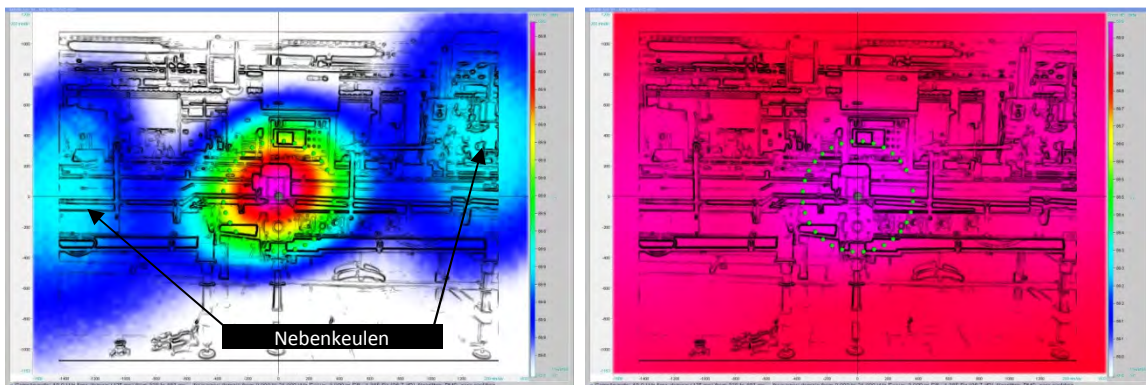


Abbildung 28: Schallkarte ohne Vorverstärkung mit Delta = 0,1 dB (linkes Bild) und Delta = 1,0 dB (rechtes Bild)

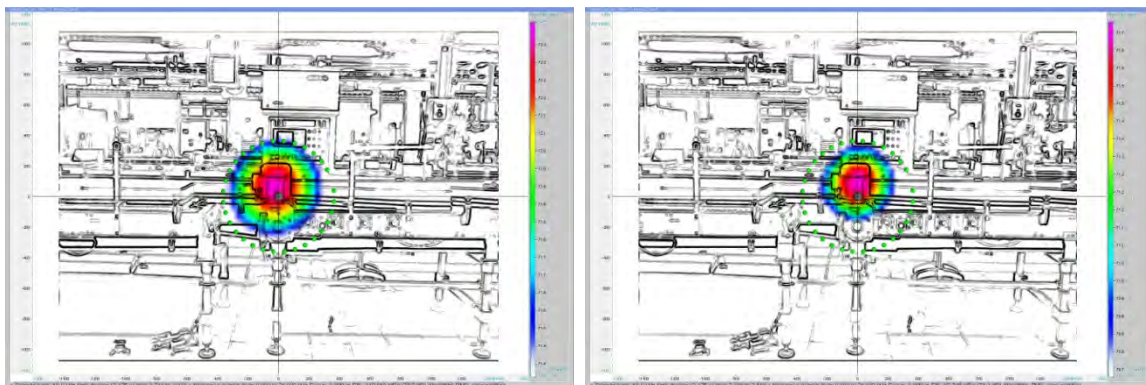


Abbildung 29: Schallkarte mit 21 dB Vorverstärkung (linkes Bild) und 42 dB Vorverstärkung (rechtes Bild), jeweils mit Delta = 1,0 dB

Tabelle 3: Amplifiereinstellungen und Effektivwerte im Versuchsaufbau

Einstellung Amplifier	Effektivwert (Algorithmus RMS, 4 s)	Eingangssignal übersteuert
0 dB	96,7 dB	nein
7 dB	85,5 dB	nein
14 dB	79,4 dB	nein
21 dB	75,3 dB	nein
28 dB	73,2 dB	nein
35 dB	73,1 dB	nein
42 dB	73,1 dB	nein
49 dB	72,7 dB	ja
55 dB	72,4 dB	ja
63 dB	70,1 dB	ja
70 dB	65,2 dB	ja
77 dB	58,4 dB	ja
84 dB	52,0 dB	ja

Der Fokus (Focus) entspricht der Entfernung des Ring-Arrays zum Objekt vor der Kamera. Dieser Abstand wird mittels Rollbandmaß vor jeder Aufnahme bestimmt und eingegeben. Die virtuelle Schallkarte wird für diese Entfernung berechnet und mit dem Bild der Videokamera synchronisiert und vereinigt.

Die maximale Aufnahmedauer (Duration (s)) beträgt bei der verwendeten Abtastrate von 48 kHz 21,85 Sekunden. Die maximale Aufnahmedauer sollte 16 Sekunden jedoch nicht überschreiten, da ansonsten der Speicher für die Videodaten zu klein ist und kein vollständiges Video aufgezeichnet wird. Je nach Geräusch, zum Beispiel bei einem monotonen Pfeifton, kann auch eine kürzere Aufnahmedauer gewählt werden. Bei impulshaltigen Geräuschen empfiehlt sich eine längere Aufnahmedauer um möglichst viele relevante Schallereignisse aufzuzeichnen. Für diesen Anwendungsfall kann zudem über die Schaltfläche „Trigger...“ der Aufnahmezeitpunkt stufenlos festgelegt werden. Ohne Trigger startet die Aufnahme mit Betätigung des Startknopfes. Bei einer Triggereinstellung von 100 % nimmt der Rekorder kontinuierlich auf und die Aufnahme wird mit Betätigung des Startknopfes abgeschlossen. Die Anzahl der durchzuführenden Aufnahmen wird zum jetzigen Zeitpunkt nicht festgelegt.

Die Einstellungen der Videokamera („Camera...“) und der Messkarte im Datenrekorder (Hardware filter) werden nicht verändert. Weitere Informationen zur Bedienung der Software und Optionen bei der Aufnahme sind [11] zu entnehmen.

### Überprüfung der Kalibrierung

Die Akustische Kamera wird vom Hersteller kalibriert. Diese Kalibrierung sollte in regelmäßigen Abständen überprüft werden. Die Vorgehensweise wird in Abschnitt 5.2.5.3 detailliert beschrieben.

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Ausgehend von einem ersten, auf theoretischen Annahmen basierenden Entwurf des Messverfahrens wurden im Rahmen dieses Arbeitsschrittes zahlreiche Testmessungen an Einzellärmquellen, wie zum Beispiel die in Abschnitt 5.2.1.2 aufgeführten Messungen an der Flaschentransportstrecke und der dort installierten Leerflascheninspektionsmaschine, durchgeführt und ausgewertet.

Das Ergebnis ist der (2.) Entwurf eines Messverfahrens, das unter Technikumsbedingungen die Identifikation von Lärmquellen mittels Akustischer Kamera ermöglicht und sich, in Bezug auf die Kamera-

aufstellung, an der DIN EN ISO 9612 zur Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz [25] orientiert. Die Abschirmung der Kamera mit deren Transportkoffer reduziert den Einfluss von Hintergrundgeräuschen und erleichtert die Lokalisierung der Lärmquellen.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht und der (2.) Entwurf steht für Testmessungen zur Überprüfung seiner Praxistauglichkeit in AS 2.2 zur Verfügung.

## **5.2.2 AS 2.2: Testmessungen und Optimierung des Messverfahrens**

### **Zielstellung**

In diesem Arbeitsschritt soll die Praxistauglichkeit des im vorhergehenden Arbeitsschritt AS 2.1 entworfenen Messverfahrens (2. Entwurf) und der akustischen Abschirmung in einer Abfüllanlage überprüft und anhand der Ergebnisse verbessert werden (3. Entwurf).

### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 2,50 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1). Der Arbeitsschritt hat 1,00 MM mehr in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

### **Ergebnisse**

Der in Arbeitsschritt AS 2.1 entwickelte (2.) Entwurf des Messverfahrens wurde in einer Abfüllanlage in Bezug auf seine Praxistauglichkeit getestet. Im Folgenden werden die aus AS 2.1 bekannten Kriterien anhand der gewonnenen Erfahrungen zunächst einzeln bewertet beziehungsweise kommentiert und anschließend die daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Verbesserung der Praxistauglichkeit beschrieben.

#### **5.2.2.1 Auswahl der Mikrofone und die Gestaltung ihrer Anordnung**

Die Akustische Kamera soll Aufnahmen von einzelnen Antrieben bis hin zu vollständigen Aggregaten mit mehreren Metern Durchmesser aus variierender Entfernung ermöglichen.

#### **Beispiel 1**

Das erste Beispiel zeigt eine Flaschentransportstrecke, von der ein schlagendes, im Abstand von etwa 260 ms wiederkehrendes Geräusch ausgeht. Das linke Bild in Abbildung 30 zeigt einen Ausschnitt der aufgezeichneten Mikrofon-Kanaldaten des Ring-Arrays. Nach Durchführung einer A-Bewertung (vgl. Abschnitt 3.1) wird deutlich, dass es sich bei dem vermeintlich singulären Geräusch tatsächlich um zwei Geräusche handelt, die so kurz aufeinander folgen, dass sie vom menschlichen Gehör als ein einzelnes Geräusch wahrgenommen werden. Die Bildanalyse der beiden Peaks (Abbildung 31) macht deutlich, dass ihr Emissionsort ebenfalls unterschiedlich ist. Auslöser des Geräuschs war eine springende Scharnierbandkette auf der Rückführung, die von der unteren Umlenkrolle (1. Peak) gegen die Auflage der oberen Scharnierbandkette schlägt (2. Peak).

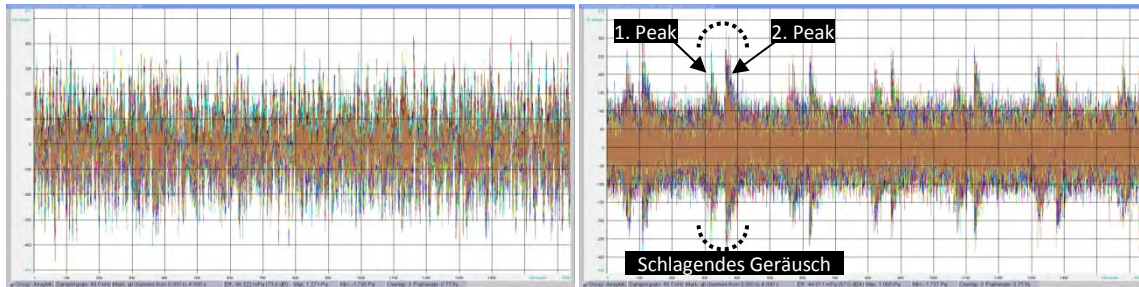


Abbildung 30: Kanaldaten des intermittierenden Geräusches vor (links) und nach (rechts) der A-Bewertung

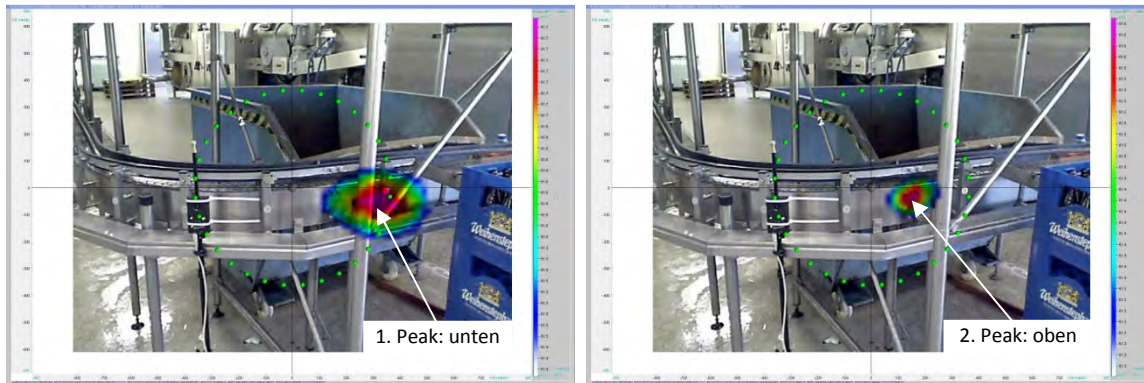


Abbildung 31: Emissionsort des ersten (links) und zweiten Peaks (rechts) des intermittierenden Geräusches aus Abbildung 30

## Beispiel 2

Ein weiteres Beispiel zeigt die Schallemissionen um einen Getriebemotor (Abbildung 32, im Zentrum der grünen Punkte des Ring-Arrays), der die Scharnierbandketten der Flaschenzuführung zur Flaschenreinigungsmaschine antreibt. Bei geschlossenem wie auch bei offenem Schallschutztor der Flaschenaufgabe ist der Antrieb nicht die primäre Lärmquelle im Bild der USB-Kamera. Vielmehr zeigen die beiden Aufnahmen in Abbildung 33, dass bei geschlossenem Schallschutz die Umlenkung der gereinigten Flaschen (im linken Bild oben links) und bei geöffnetem Schallschutz zusätzlich die gegeneinander schlagenden Flaschen in der Flaschenaufgabe (im Bild rechts) die größten Schallemissionen im Bildbereich Kamera sind.

In der Darstellung des Schallspektrums bei geschlossenem Schallschutztor fallen zahlreiche schmale und hohe Schalldruckspitzen (Peaks) im Bereich zwischen 7.740 Hz und 8.292 Hz (schwarze Markierung in Abbildung 34) auf. Werden, wie in Abbildung 35 geschehen, nur diese Frequenzen für die Berechnung der Schallkarten verwendet, wird erkennbar, dass diese Schallspitzen vom Motor des Antriebs ausgehen. Mit einem Maximalwert  $M_s$  von 56,6 dB(A) trägt der Antrieb in diesem Frequenzbereich jedoch nicht wesentlich zum Effektivwert  $E_s$  der gesamten Schallkarte von 81,0 dB(A) bei.



Abbildung 32: Getriebemotor der Flaschenzuführung zur Flaschenreinigungsmaschine

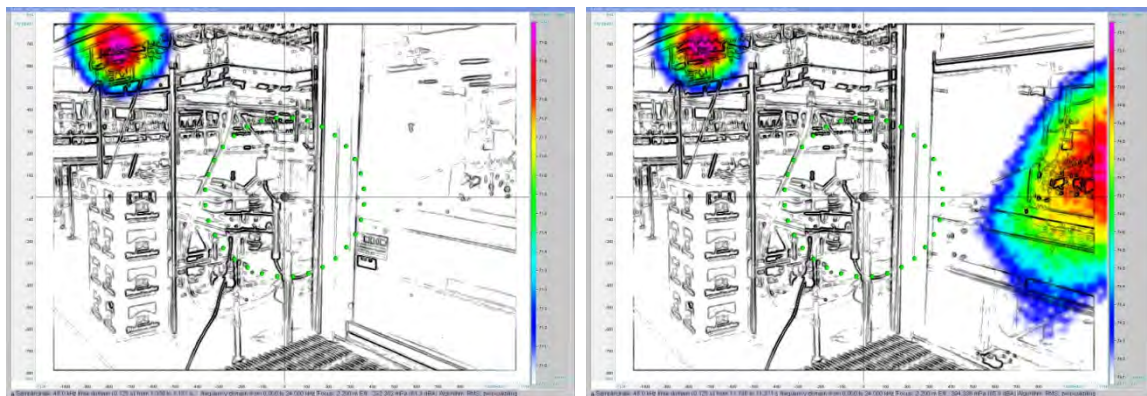


Abbildung 33: Dominante Lärmquellen bei geschlossenem (links) und geöffnetem (rechts) Schallschutztür der Flaschenreinigungsmaschine

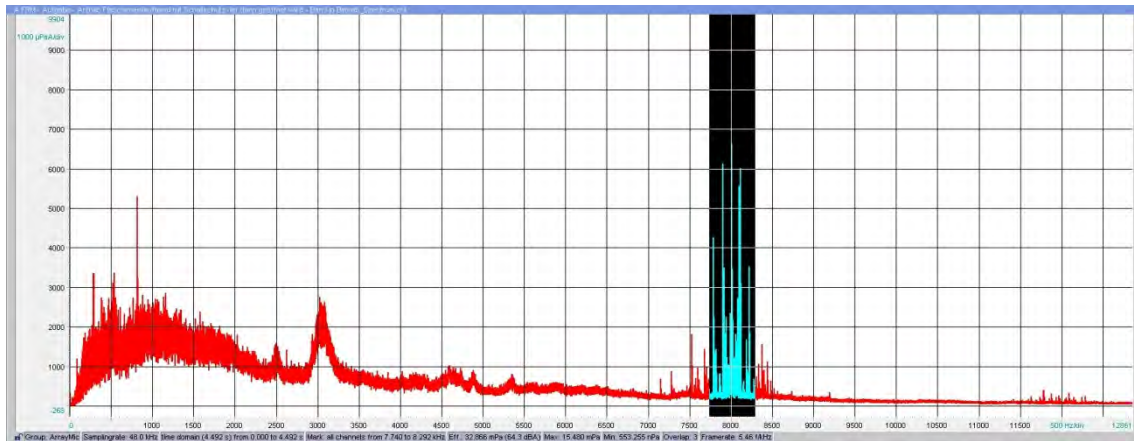


Abbildung 34: Spektrum der aufgezeichneten Kanaldaten bei geschlossenem Schallschutztür

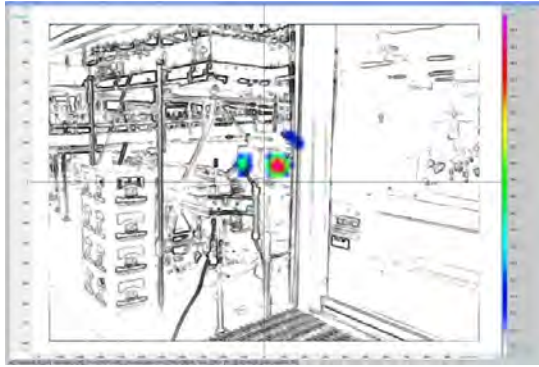


Abbildung 35: Motorengeräusch im Frequenzbereich um 8.000 Hz (schwarze Markierung in Abbildung 34)

### Beispiel 3

Die vom Hersteller der Akustischen Kamera angegebene maximale Einsatzentfernung von 5 m [10] wurde im folgenden Beispiel mit einem gewählten Fokus von 13,7 m bewusst überschritten. Der Fokus entsprach der Entfernung zwischen dem Ring-Array und der Kastenreinigungsmaschine. Wie Abbildung 36 zeigt, sind trotz der großen Entfernung die Kastenumlenkungen, in denen einzelne Kästen mit hoher Fallgeschwindigkeit aufeinander prallen, als Hauptlärmquellen dieser Maschine deutlich identifizierbar. Aufgrund der Entfernung, in Verbindung mit der begrenzten Auflösung der USB-Kamera, ist jedoch ausschließlich der Bereich „Umlenkung“ einzugrenzen. Für eine genauere Untersuchung müsste die Akustische Kamera näher an das Objekt herangeführt werden. Des weiteren zeigt sich, dass Schallquellen, die sich im Vordergrund (Stolperschwelle im Kastentransport, linkes Bild in Abbildung 37) oder außerhalb des Bildbereichs der Kamera befinden (rechtes Bild) ebenfalls dargestellt werden.

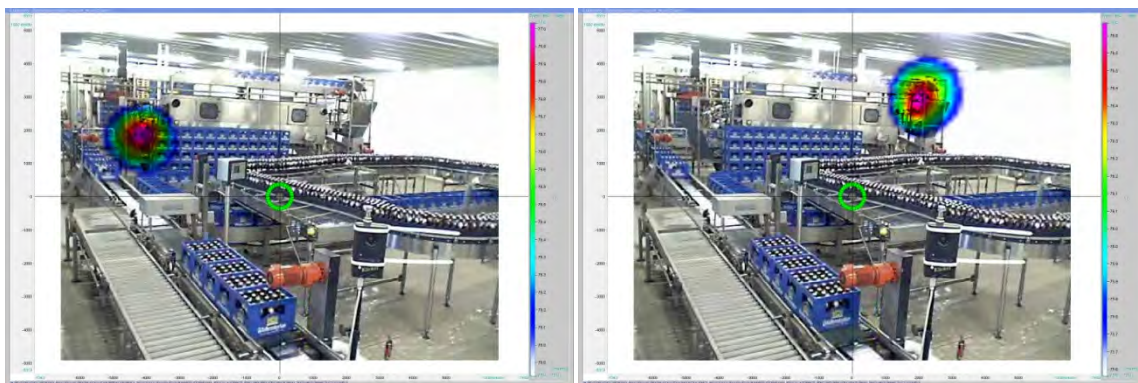


Abbildung 36: Schallemissionsquelle an der Kasten-Umlenkung

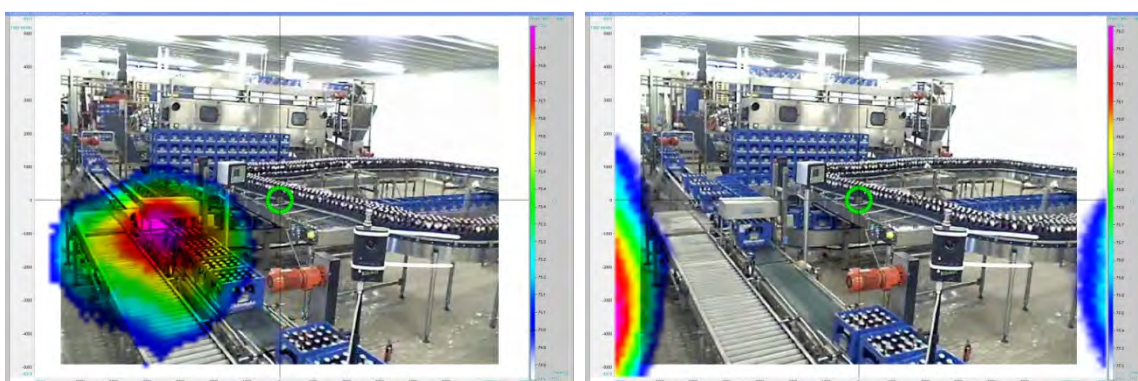


Abbildung 37: Schallquelle im Vordergrund (linkes) und außerhalb des Bildbereichs (rechtes Bild)

Fazit: Mit der ausgewählten Akustischen Kamera können sowohl ganze Aggregate, Teile von Aggregaten, bis hin zu einzelnen Antrieben oder Abschnitten von Transporteuren aus verschiedenen Entfernungen aufgenommen werden. Die Akustische Kamera entspricht somit voll den definierten Anforderungen.

### **5.2.2.2 Abschirmung der Akustischen Kamera in akustisch ungünstigen Umgebungen**

Bereits die ersten in einer Abfüllanlage durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass in der Praxis ein häufiges Nachjustieren der Akustischen Kamera erforderlich ist, um den gewünschten Maschinenausschnitt in den Fokus der USB-Kamera zu bringen. Hierfür erwies sich der Aufbau mit den Lautsprecherstativen und dem Koffer der Akustischen Kamera zur Abschirmung von Hintergrundgeräuschen als ungeeignet, da beinahe jede Neupositionierung mit einem zeitintensiven Ab- und Wiederaufbau der Abschirmung verbunden war. Aus diesem Grund wurde bereits nach den ersten Aufnahmeversuchen in der Abfüllhalle auf den Einsatz der Abschirmung verzichtet.

Fazit: In Anbetracht des beim den Testmessungen festgestellten, hohen zeitlichen Aufwandes für die Neupositionierung der Akustischen Kamera in Verbindung mit der Abschirmung und unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.2.1.2 beschriebenen Nachteilen, erscheint die Optimierung dieses Ansatzes nicht erfolversprechend. Als Konsequenz aus den Erfahrungen wird eine neue Abschirmung entwickelt, die sowohl die in Abschnitt 5.2.1.2 genannten Nachteile überwindet als auch eine schnelle und einfache Positionierung in einer realen Abfüllanlage erlaubt.

### **5.2.2.3 Anforderungen an Mobilität und Flexibilität des Messverfahrens**

Die im Lieferumfang der Akustischen Kamera enthaltenen Transportboxen für den Ring-Array und den Datenrekorder schützen die Geräte beim Transport im PKW effektiv. Das Stativ für den Ring-Array, die Lautsprecherstative sowie der Mess-PC werden in passenden Taschen transportiert, die diese ebenfalls vor Beschädigung und Verschmutzung bewahren. Die einzelnen Teile sind dabei leicht genug um von einer Person getragen und verladen zu werden.

Fazit: Keine Maßnahmen erforderlich.

Die Breite der Messvorrichtung ohne Abschirmung stellt bei der Handhabung in Abfüllanlagen keine Schwierigkeit dar. Auf den Einsatz der Abschirmung wurde aus oben genannten Gründen verzichtet. Bei den Aufnahmen an verschiedenen Aggregaten kann es beim Umstellen des Messgerätes häufig zur Verwicklung des Datenkabels und des USB-Kabels der Kamera mit den Stativfüßen. Zudem bestand für die Steckverbindung zwischen USB-Kabel und USB-Verlängerungskabel regelmäßig die Gefahr, dass sie am Boden mit Wasser, zum Beispiel von der Bandschmierung, in Kontakt kommt. Das Gesamtgewicht des Messgerätes war, wie erwartet, kein Problem, da stets Teile mit einem Gewicht von maximal 10 kg bewegt werden mussten.

Der provisorisch eingerichtete Arbeitsplatz (siehe Abbildung 38) für den Mess-PC und den Datenrekorder erwies sich als verbesserungswürdig, da stets das Risiko bestand, dass PC oder Rekorder durch Sturz beschädigt werden. Zudem erzeugt die Ansammlung von Kabeln ebenfalls ein gewisses Beschädigungsrisiko. Ein weiterer Nachteil dieses Provisoriums ist die eingeschränkte Flexibilität beim Wechsel des Messplatzes und die unangenehme Arbeitshöhe.

Ohne die Abschirmung konnte die volle Flexibilität des Stativs bei der Ausrichtung des Ring-Arrays genutzt werden. Die Erfahrungen bei diesen Testmessungen haben gezeigt, dass diese Flexibilität unbedingt erhalten werden sollte.



Abbildung 38: Provisorischer Arbeitsplatz

Fazit: Für den Mess-PC und den Datenrekorder ist ein beweglicher Arbeitsplatz zu schaffen, der die sichere Unterbringung sowie die Befestigung der verschiedenen Kabel ermöglicht. Ferner ist die Steckverbindung zwischen USB-Kabel und USB-Verlängerungskabel gegen das Eindringen von Feuchtigkeit abzudichten und beide Kabel zusammenzufassen.

Bei der Neuentwicklung der akustischen Abschirmung wird die Erhaltung der Flexibilität bei der Ausrichtung des Ring-Arrays ein entscheidendes Kriterium sein.

#### 5.2.2.4 Messeinstellungen

##### Messpunkte und Positionierung der Akustischen Kamera

Bei den Testmessungen wurden die folgenden Aggregate aufgenommen: Auspacker, Kastenreinigungsmaschine, Flaschenreinigungsmaschine, Leerflaschen-Inspektionsmaschine, Flaschenfüllmaschine mit dazugehörigem Ventilknoten, Etikettiermaschine sowie eine Linie der Keg-Abfüllanlage. Die Messpunkte wurden zum Teil entsprechend Tabelle 1 auf Seite 23ff ausgewählt, jedoch nicht durchgängig.

Die vollständige Erfassung großer Aggregate im Bildbereich der Akustischen Kamera wird durch die örtlichen Gegebenheiten in der Abfüllanlage zumeist verhindert, da der Abstand zu den Anlagen oft geringer als 5 m ist. Bei einem geringeren Abstand konnten jedoch einzelne Teile der Aggregate, wie vorgesehen, getrennt aufgenommen und anschließend gemeinsam bewertet werden.

Die in Anlehnung an DIN EN ISO 9612 [25] für einen stehenden Beschäftigten gewählte Höhe der USB-Kamera von 1,55 m erlaubte, in Verbindung mit dem Kippen des Ring-Arrays, die Aufnahme aller relevanten Objekte.

Fazit: Die Eignung der Tabelle 1 als Checkliste für die Messpunkte des zu entwickelnden Messverfahrens muss in Arbeitsschritt AS 2.3 überprüft werden. Weitere Maßnahmen erscheinen in Bezug auf Messpunkte und Positionierung der Akustischen Kamera nicht erforderlich.

##### Softwareeinstellungen für die Aufnahme

Die in Abschnitt 5.2.1.4 genannten Softwareeinstellungen und Messparameter konnten ohne Anpassung übernommen werden. Einzige Ausnahme war die Einstellung des Amplifiers. Bei der Aufnahme der Flaschenreinigungsmaschine wurde bei 28 dB Vorverstärkung die maximale Aussteuerung der Mikrofone teilweise überschritten.



Bei der Gewählten Samplingrate von 48.000 Hz (samples/s) ermöglicht eine nutzbare Aufnahmedauer von maximal 16 Sekunden. Bei den Testaufnahmen hat sich diese Messdauer als ausreichend erwiesen.

Fazit: Für das Messverfahren wird die Vorverstärkung auf 21 dB reduziert, um ein Übersteuern der Mikrofone auch bei sehr lauten Emissionen zu verhindern. Dies ermöglicht Messungen mit derselben und somit vergleichbaren Vorverstärkung. Weitere Maßnahmen erscheinen in Bezug auf die Softwareeinstellungen bei der Aufnahme nicht erforderlich.

### **5.2.2.5 Umsetzung der Maßnahmen zur Verbesserung der Praxistauglichkeit des 2. Entwurfs des Messverfahrens**

Die Auswahl der Mikrofone und die Gestaltung ihrer Anordnung erfordern keine weiteren Maßnahmen und können ohne Anpassung in den 3. Entwurf des Messverfahrens übernommen werden.

Um den Anforderungen an Mobilität und Flexibilität im 3. Entwurf des Messverfahrens gerecht zu werden, wurde der in Abschnitt 4.4 beschriebene Messwagen entworfen, der eine sichere Unterbringung des Mess-PCs und Datenrekorders sowie die Befestigung der verschiedenen Kabel am Rahmen des Wagens ermöglicht. Das Mikrofonkabel, das Kabel der USB-Kamera sowie deren Verlängerungskabel wurden zu deren Schutz mit Kabelbinder verbunden, gegen Feuchtigkeit isoliert und mit einem flexiblen Kabelschuttschlauch umhüllt.

Die Messeinstellungen des 2. Entwurfs werden ebenfalls übernommen. Im 3. Entwurf des Messverfahrens wird die Vorverstärkung jedoch auf 21 dB reduziert, um ein Übersteuern der Mikrofone auch bei sehr lauten Emissionen zu verhindern. Dies ermöglicht Messungen mit derselben und somit vergleichbaren Vorverstärkung.

Wie bereits beschrieben, erschien aufgrund der zahlreichen Nachteile eine Optimierung des Ansatzes den Transportkoffer als Abschirmung zu nutzen nicht zielführend und wurde in Gänze verworfen.

#### **5.2.2.5.1 Neuentwicklung der Abschirmung**

Stattdessen wurde für den 3. Entwurf des Messverfahrens eine neue Abschirmung auf Basis von akustischen Dämmplatten aus Melaminharzschaumstoff mit einkaschierter Schwertschicht konstruiert, die zusammen mit dem Ring-Array der Akustischen Kamera auf einem Stativ befestigt werden kann. Mit diesem Aufbau konnten die oben beschriebenen Nachteile überwunden werden. So besitzen die verwendeten Dämmplatten sowohl schalldämpfende als auch schalldämmende Eigenschaften, wodurch Reflektionen auf der Vorderseite mit der Akustischen Kamera nicht mehr messbar sind. Durch die Verbindung des Ring-Arrays mit der Abschirmung und der gemeinsamen Befestigung auf einem Stativ, bleibt die ursprüngliche Flexibilität in der Ausrichtung der Akustischen Kamera weitgehend erhalten. Das verwendete Stativ ermöglicht eine Höhenverstellung der USB-Kamera zwischen 1,34 m und 2,35 m über dem Boden. Der Einsatz eines horizontal drehbaren Kugelkopfs mit Schnellwechselplatte erlaubt 360° Drehungen in horizontaler Ebene. Vertikal gestattet dieser Aufbau einen Kippwinkel des Ring-Arrays von  $\alpha_{\max} = 20^\circ$ . Des Weiteren wird die Mobilität des Messsystems dadurch erhöht, dass Kamera und Abschirmung für eine neue Kameraeinstellung gleichzeitig versetzt werden können.

Der Aufbau der akustischen Abschirmung mit Stativ wird im Kapitel Material und Methoden in den Abschnitten 4.2 und 4.3 ausführlich beschrieben. Die in diesem Arbeitsschritt AS 2.2 entwickelte Version verfügte jedoch noch nicht über Lenkrollen an den Füßen des Stativs.

### 5.2.2.5.2 Versuchsaufbau zur Bewertung der akustischen Abschirmung

Die akustische Wirkung der Abschirmung wurde anhand des folgenden Versuchsaufbaus überprüft und bewertet. Die Akustische Kamera wurde zunächst ohne Abschirmung im Freifeld aufgestellt (siehe Abbildung 39). Als Lärmquellen dienten zwei Lautsprecher (Aktivboxen der Marke TLS Combibox M 100 CD), welche die in Abbildung 40 gezeigte Tonfolge abstrahlten. Die Tonfolge wurde mittels Laptop, mit der Freeware Audio Sweep Generator, in der Version V3.5.2.24, erzeugt und reichte von 20 Hz bis 20.000 Hz, wobei die Frequenz linear um 1.500 Hz pro Sekunde anstieg. Die Messungen wurden mit einer Samplingrate von 48.000 Hz und einer Messdauer von 8 Sekunden durchgeführt. Die Entfernung der Lautsprecher zur Akustischen Kamera betrug 3 Meter. Lautsprecher L1 befand sich während der Messungen stets an derselben Position, im Zentrum des Blickfeldes der USB-Kamera. Lautsprecher L2n wurde an verschiedenen Positionen rund um die Akustische Kamera aufgestellt, wobei der Abstand ebenfalls stets 3 Meter betrug.  $n$  steht für die Position des Lautsprechers L2. Die Skizze in Abbildung 41 zeigt die verschiedenen Positionen L2A bis L2J des Lautsprechers L2 und deren Ausrichtung, in Relation zum Ring-Array der Kamera.

Nach Durchführung der Aufnahmen ohne akustische Abschirmung, wurden die Aufnahmen mit der konstruierten Abschirmung wiederholt. Dies hat zur Folge, dass die Position der Lautsprecher und deren Ausrichtung um wenige Zentimeter beziehungsweise Grad abweichen können, was gegebenenfalls beim Vergleich der Ergebnisse zu berücksichtigen ist. Abbildung 42 zeigt den Messaufbau mit Abschirmung.

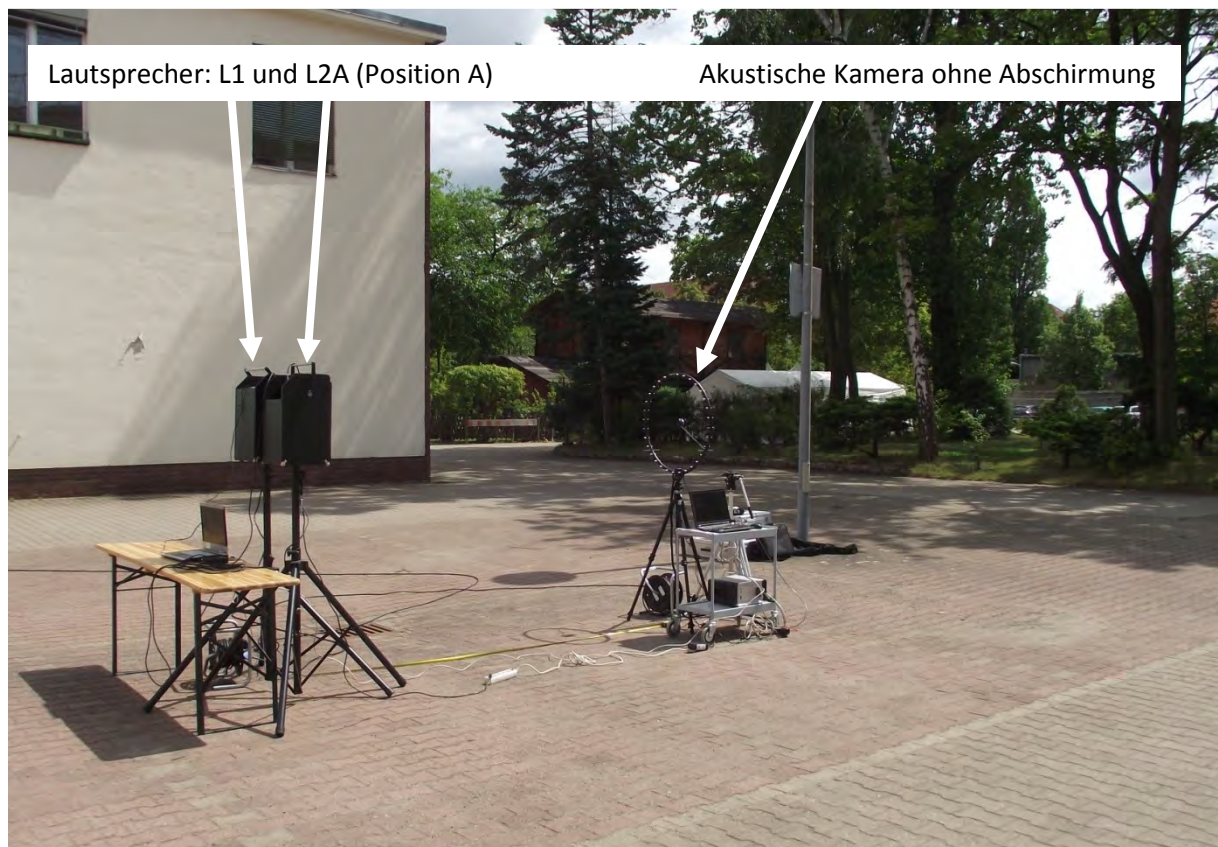


Abbildung 39: Test der Akustischen Kamera mit Aktivlautsprechern im Freifeld

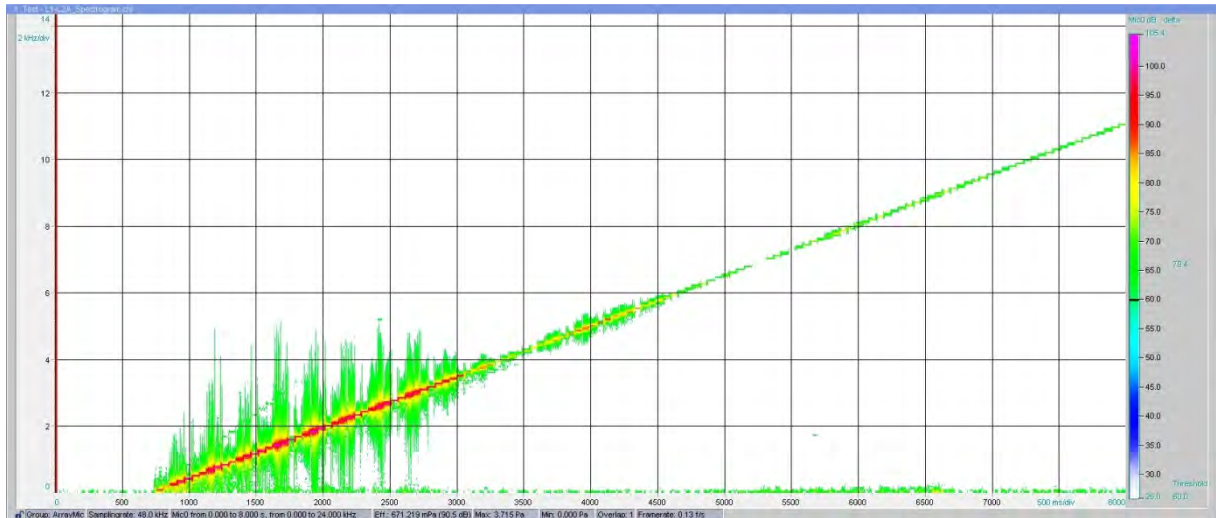


Abbildung 40: Mit Audio Sweep Generator erzeugte Tonfolge

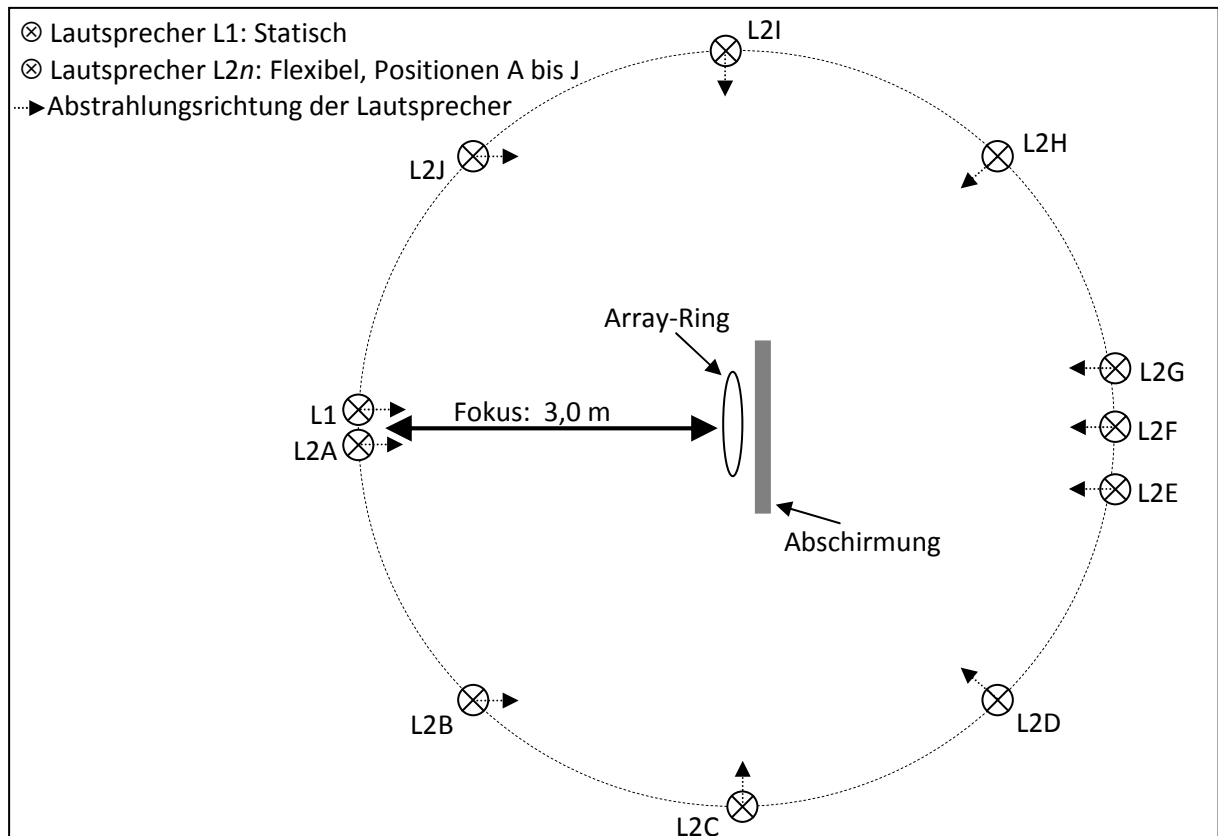


Abbildung 41: Skizze Versuchsaufbau und Kamerapositionen

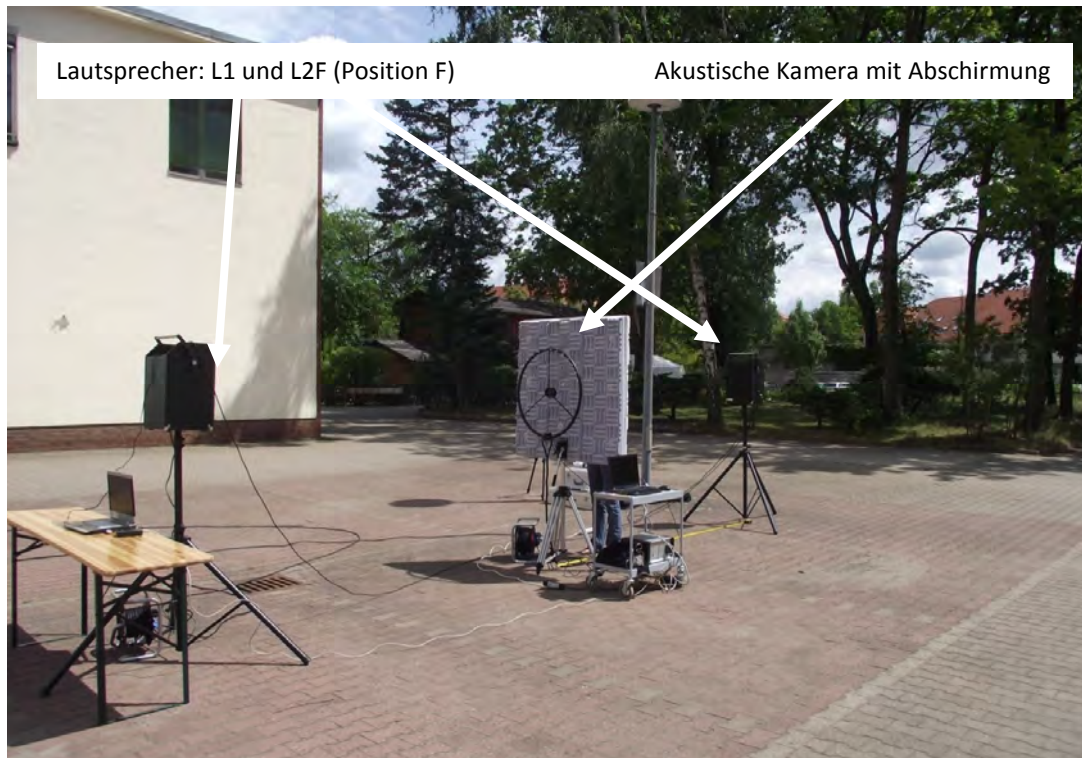


Abbildung 42: Test der Akustischen Kamera und Abschirmung mit Aktivlautsprechern

### 5.2.2.5.3 Bewertung der akustischen Abschirmung

Für die Bewertung der akustischen Abschirmung wurden sämtliche Positionen analysiert und bewertet. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse an ausgewählten Beispielen dargestellt.

#### 1. Visualisierung bekannter Emissionsquellen im Fokus der USB-Kamera, ohne/mit Abschirmung:

Abbildung 43 (linkes Bild) zeigt das Originalbild der USB-Kamera im Zentrum des Ring-Arrays. Im Vordergrund sind die beiden Lautsprecher L1 und L2A zu erkennen. Rechts in Abbildung 43 sind die Positionen der beiden Lautsprecher skizziert. Die schwarzen Lautsprecher stellen jedoch für die Farbdarstellung der Schallkarte ein Problem dar, da das Schwarz die hellen Farben überlagern würde. Aus diesem Grund wurde für die Auswertung die Konturdarstellung (Abbildung 44 und folgende) gewählt. Diese zeigt lediglich die Konturen von Objekten in einer schwarz-weiß Darstellung, so dass die Farben der Schallkarte besser zu erkennen sind.

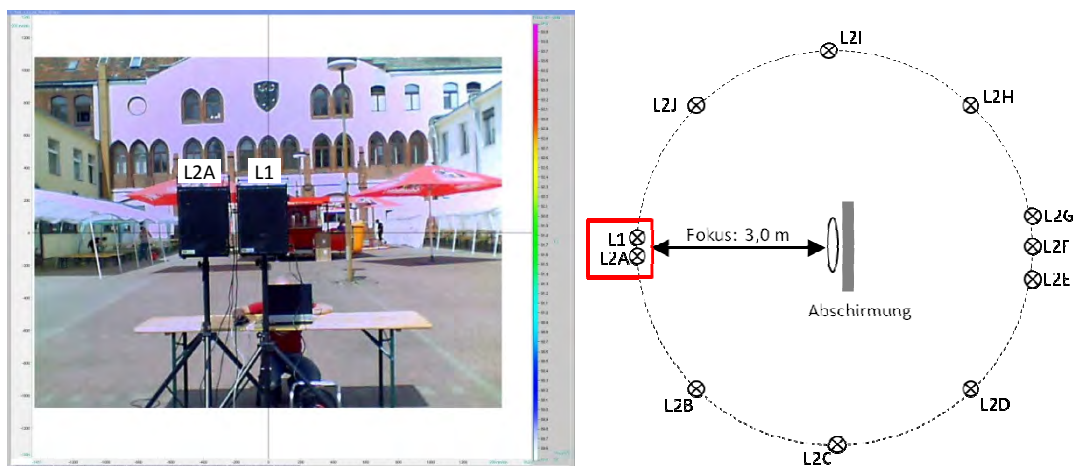


Abbildung 43: Originalbild der USB-Kamera mit den Lautsprechern L1 und L2A (links), Positionsskizze (rechts)

Um vergleichbare Werte zu erhalten, wurde der dargestellte Frequenzbereich bei der Auswertung auf die Frequenzen von 2.000 Hz bis 2.200 Hz begrenzt. Auf der Schallkarte wird stets der Punkt mit dem höchsten Schalldruckpegel, hier 80,1 dB, violett dargestellt. Die farbliche Abstufung der Schallkarte, von Violett über Grün nach Blau, erfolgt entsprechend dem angegebenen Delta. In diesem Beispiel beträgt Delta 4,5 dB. Somit werden Schalldruckpegel zwischen 80,1 dB und 75,6 dB farblich dargestellt. Schalldruckpegel unter 75,6 dB werden in dieser Darstellungsweise nicht berücksichtigt (vergleiche hierzu auch Abschnitt 4.5 im Kapitel Material und Methoden).

Für den angegebenen Frequenzbereich wurde mit der Akustischen Kamera ohne Abschirmung ein Maximum von  $M_s = 80,1$  dB bestimmt (linkes Bild in Abbildung 44). Aufgrund der räumlichen Nähe der beiden Lautsprecher überlagern sich die beiden Schallquellen, so dass nur eine Schallquelle erkennbar ist, die scheinbar genau zwischen den beiden Lautsprechern liegt.

Mit der akustischen Abschirmung (rechtes Bild in Abbildung 44) wird ebenfalls ein Maximum von  $M_s = 80,1$  dB gemessen. Die Darstellung der Schallquellen in der Schallkarte ist vergleichbar.

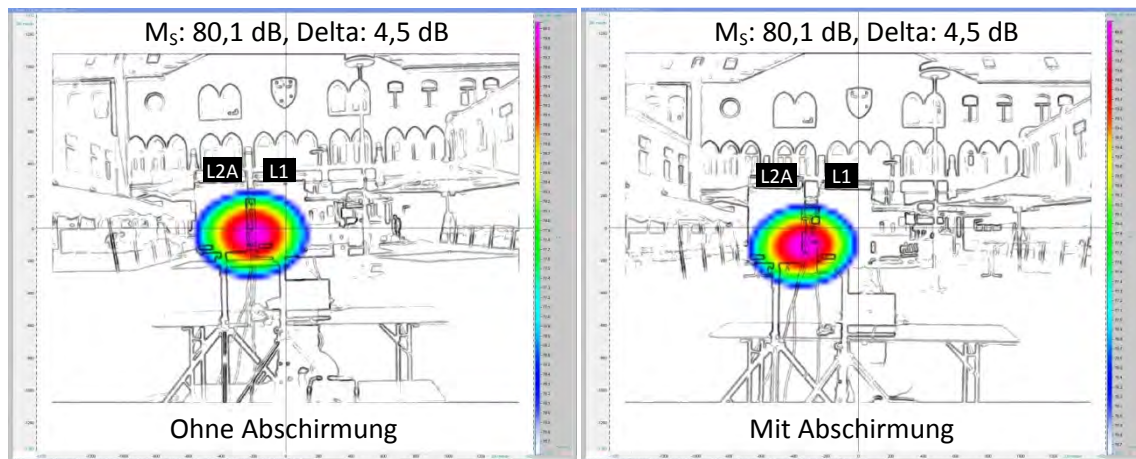


Abbildung 44: Lautsprecher L1 und L2A sind aktiv, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

Fazit: Bei Schallquellen, die unmittelbar im Fokus USB-Kamera liegen, beeinflusst die akustische Abschirmung das Messergebnis nicht signifikant. Reflektionen an der Abschirmung konnten nicht festgestellt werden.

## 2. Visualisierung zweier bekannter Emissionsquellen vor dem Ring-Array, ohne/mit Abschirmung:

Für den Frequenzbereich von 2.000 Hz bis 2.200 Hz wurde mit der Akustischen Kamera ohne Abschirmung ein Maximum von  $M_s = 77,6$  dB für die Emissionsquelle im Fokus der USB-Kamera (L1) bestimmt (linkes Bild in Abbildung 45). Der zweite Lautsprecher L2B, der sich am linken Bildrand der USB-Kamera befindet und der parallel zu L1 ausgerichtet war, wird auf der Schallkarte als zweite, mit ca. 74,7 dB jedoch leisere Emissionsquelle dargestellt.

Mit akustischer Abschirmung (rechtes Bild in Abbildung 45) wird für die Emissionsquelle im Fokus (L1) ein Maximum von 78,7 dB gemessen. Der Lautsprecher L2B am linken Bildrand wird auf der Schallkarte als wiederum als zweite, mit ca. 77,5 dB jedoch erneut leisere Emissionsquelle dargestellt.

Die Differenz zwischen den beiden Werten bei L1 ergibt sich vermutlich durch eine geringfügig unterschiedliche Stellung des Ring-Arrays bei den Aufnahmen mit und ohne Abschirmung. Bei Lautsprecher L2B kommt gegebenenfalls noch der Einfluss der Ausrichtung des Lautsprechers hinzu, wodurch die Differenz weiter anwächst.

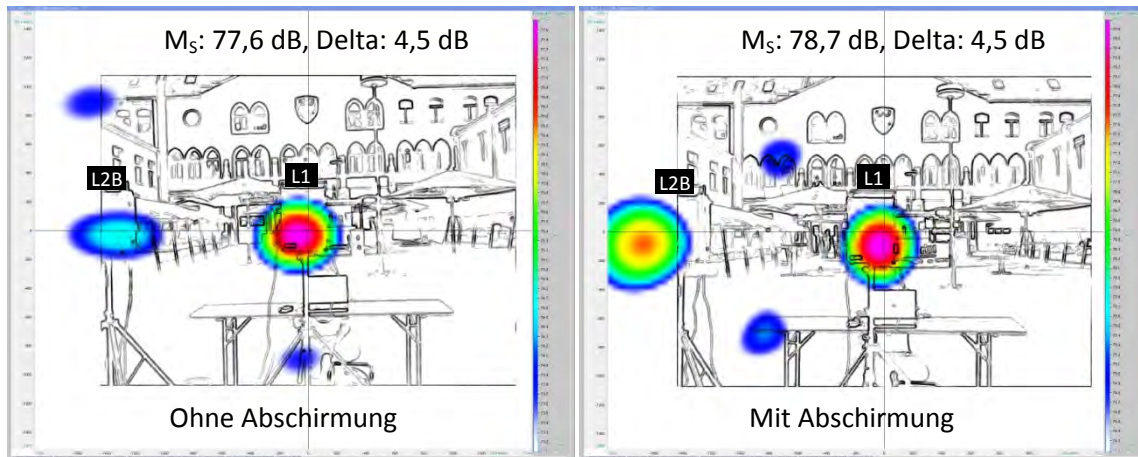


Abbildung 45: Lautsprecher L1 und L2B sind aktiv, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

Fazit: Zwei einzelne Schallquellen, von denen eine nicht unmittelbar im Fokus der USB-Kamera, jedoch vor dem Ring-Array liegt, können sowohl mit als auch ohne akustische Abschirmung lokalisiert werden.

### 3. Visualisierung zweier Emissionsquellen vor und hinter dem Ring-Array, ohne/mit Abschirmung:

Entscheidendes Kriterium für die Wirksamkeit der Abschirmung ist eine ausreichende Reduktion der Schallpegel von Hintergrundgeräuschen, beziehungsweise Schallquellen, die auf der Rückseite des Ring-Arrays liegen. Abbildung 46 zeigt einen Versuchsaufbau, bei dem der Lautsprecher L1 im Fokus der USB-Kamera und Lautsprecher L2E auf der Rückseite der Akustischen Kamera aktiv sind. Ohne Abschirmung werden zwei Quellen auf der Schallkarte dargestellt. Rechts die tatsächlich vorhandene und bekannte Quelle Lautsprecher L1, mit einem Maximum von 79,0 dB. Mit rund 78,0 dB kaum schwächer wird links neben L1 eine weitere Quelle angezeigt, für die es an dieser Stelle jedoch keine reale Quelle gibt. Diese scheinbare Quelle ist auf Lautsprecher L2E, im Rücken der Akustischen Kamera zurück zu führen. Bei der Lokalisierung und Bewertung von unbekanntem Schallquellen würde dieses Ergebnis zwangsläufig zu einer Fehlinterpretation der Schallkarte führen.

Die Messung wurde anschließend ohne den Lautsprecher L1 wiederholt. Das Ergebnis ist in Abbildung 47 dargestellt. Die scheinbare Quelle, die von Lautsprecher L2E im Rücken der Akustischen Kamera erzeugt wird, ist weiterhin vorhanden, während die Quelle L1 nicht aktiv ist.

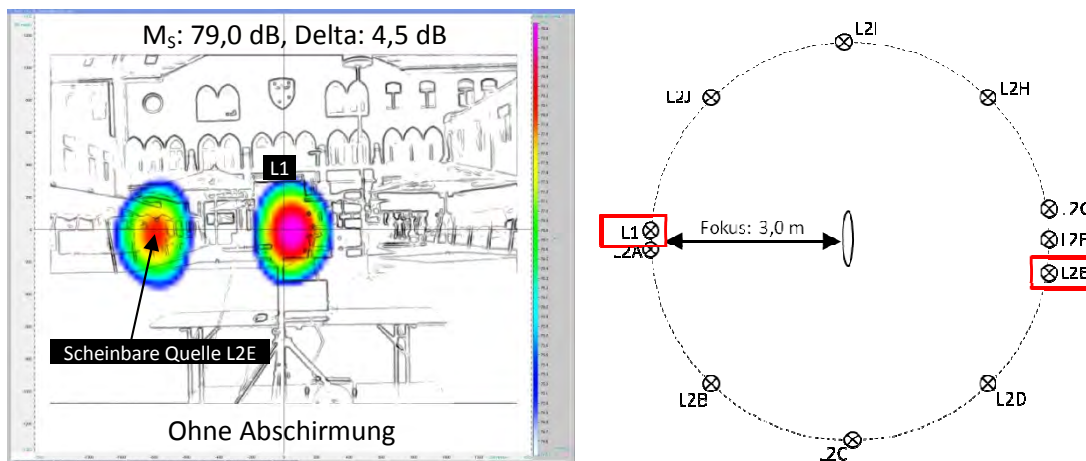


Abbildung 46: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

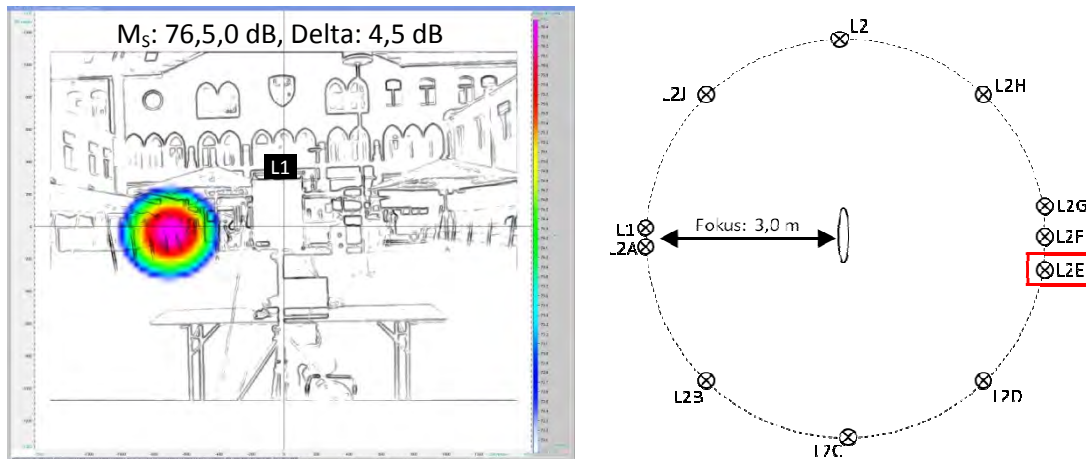


Abbildung 47: Nur Lautsprecher L2E ist aktiv, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

Derselbe Versuchsaufbau wurde mit der akustischen Abschirmung wiederholt. Obwohl beide Lautsprecher L1 und L2E aktiv waren, erscheint nur die real vorhandene Schallquelle L1 auf der Schallkarte (Abbildung 48). Die scheinbare Quelle, die in Abbildung 46 und Abbildung 47 durch den Lautsprecher L2E hervorgerufen wurde, wurde durch die Abschirmung soweit abgeschwächt, dass ihr Schalldruckpegel um mehr als 4,5 dB geringer ist, als der Maximalwert der realen Schallquelle L1. Bei dem gewählten Delta von 4,5 dB wird daher keine zweite Schallquelle dargestellt.

Auch wenn, wie in Abbildung 49 dargestellt, das Delta von 4,5 dB auf 16,1 dB erhöht wird und somit Schallpegel zwischen 76,8 dB und 60,7 dB in der Schallkarte angezeigt werden, bleibt die scheinbare Quelle L2E verschwunden. Nach [12] kann angenommen werden, dass bereits bei einem Unterscheid von 10 dB zwischen zwei Schallquellen die Emissionen der leiseren Quelle in der Praxis keine Rolle mehr spielen. Bei den vermeintlichen ringförmigen Quellen um das Zentrum L1 handelt es sich um Artefakte, die durch sogenannte Nebenkeulen einer realen Lärmquelle erzeugt werden (MSL der Messanordnung: ca. 8 dB, siehe Abschnitt 3.2 im Kapitel Grundlagen).

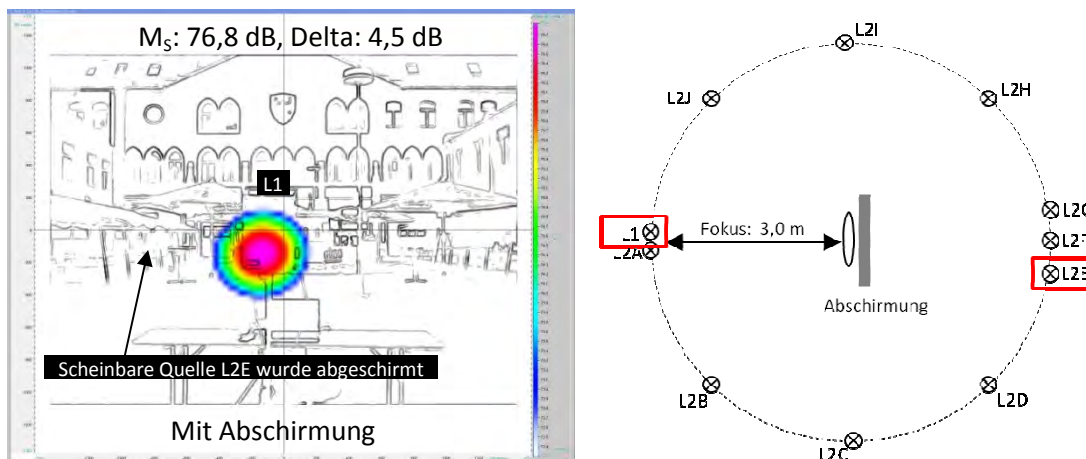


Abbildung 48: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv, L2E wird abgeschirmt, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

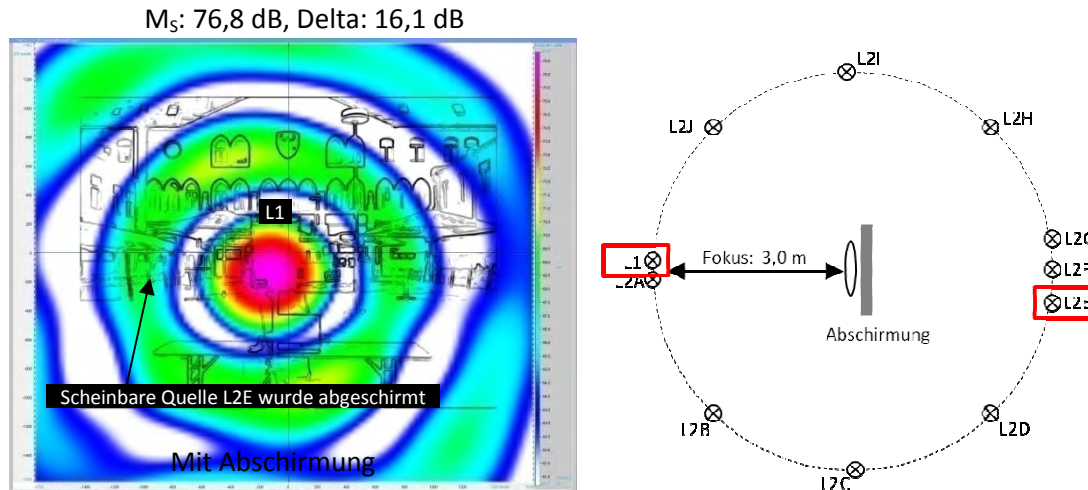


Abbildung 49: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv, L2E wird abgeschirmt, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz bei einem Delta von 16,1 dB

Auch diese Messung wurde anschließend ohne Lautsprecher L1 wiederholt. Das Ergebnis ist in Abbildung 50 dargestellt. Trotz Abschirmung und deaktiviertem Lautsprecher L1 erscheint an der Position des Lautsprechers L1 eine Quelle. Da L1 während der Messung nicht aktiv war, muss es sich folglich um eine scheinbare Quelle handeln.

Ein Erklärungsansatz: Die vermeintliche Quelle wird ebenfalls von Lautsprecher L2E, im Rücken der Akustischen Kamera erzeugt. Wie in der rechten Hälfte von Abbildung 50 skizziert, treffen die Schallwellen des Lautsprechers L2E auf die Rückseite der Abschirmung und werden durch diese abgedämpft und gedämmt. Auf der Vorderseite der Abschirmung setzt sich die Wellenausbreitung ausgehend von den vier Kanten der Abschirmung fort. Da der Abstand der Kanten zum Zentrum des Ring-Arrays gleich ist, erscheint die vermeintliche Quelle annähernd im Zentrum der Schallkarte und nicht wie in Abbildung 47 an der scheinbaren Position von L2E vor dem Ring-Array. Da sich im Zentrum der Schallkarte der Lautsprecher L1 befindet, sieht es so aus, als wäre L1 die Quelle.

Bei der Lokalisierung und Bewertung von unbekanntem Schallquellen könnte dieses Ergebnis somit trotz Abschirmung zu einer Fehlinterpretation der Schallkarte führen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die Abschirmung der Maximalwert um 15,6 dB von 76,8 dB auf 61,2 dB signifikant abgeschwächt wurde. Zudem wird bei dem in Abschnitt 5.2.5 beschriebenen Messverfahren der Schwellwert („Threshold“ © in Abbildung 76 auf Seite 74) auf 75 dB eingestellt, so dass nur einzelne, laute Schallereignisse angezeigt und Hintergrundgeräusche zumeist ausgeblendet werden. Da die abgeschirmte, vermeintliche Quelle um ca. 14 dB geringer ist, als die Eingangsschwelle, wäre die Scheinquelle in diesem Fall nicht in der Schallkarte dargestellt worden, da sie als Hintergrundgeräusch eingestuft worden wäre.



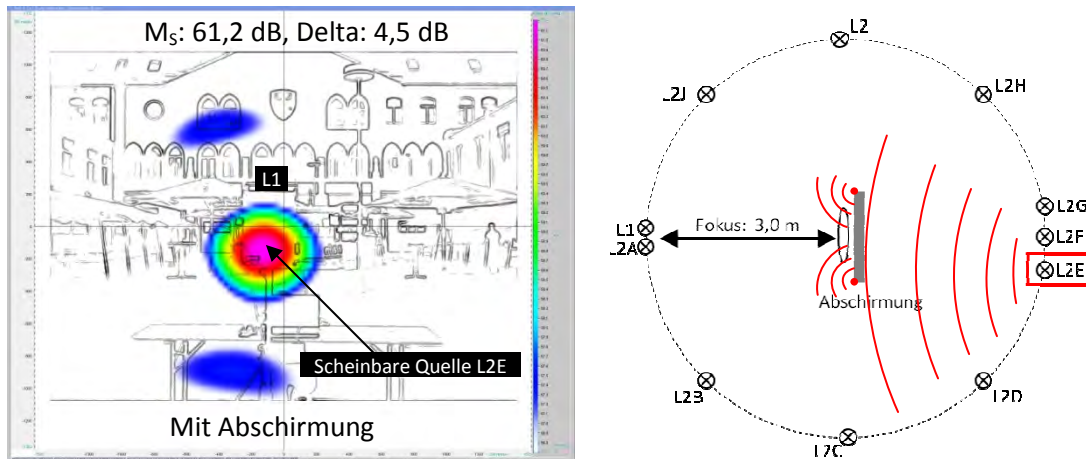


Abbildung 50: Nur Lautsprecher L2E ist aktiv, jedoch hinter der Abschirmung, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

Fazit: Wie von [10] und [18] beschrieben, kann die Akustische Kamera nicht zwischen Schallquellen vor und hinter dem Ring-Array unterscheiden. Für den Einsatz in Abfüllanlagen ist eine wirkungsvolle Abschirmung daher eine Grundvoraussetzung.

Die entwickelte Abschirmung mit den Dämmplatten ist geeignet, gleich laute Schallquellen, die sich hinter dem Ring-Array befinden, soweit abzdämpfen, dass sie die Lokalisierung und Bewertung von Schallquellen im Fokus der USB-Kamera nicht wesentlich beeinträchtigen.

#### 4. Einfluss einer zweiten Emissionsquellen seitlich des Ring-Arrays:

Eine Emissionsquelle seitlich des Ring-Arrays, in diesem Versuchsaufbau L2C, taucht zunächst in der Schallkarte nicht auf, da sie weit außerhalb des Bildausschnittes der USB-Kamera liegt. Wie Abbildung 51 zeigt, wird die Lokalisierung der tatsächlichen Emissionsquelle L1 somit nicht behindert.

Außerhalb des Bildausschnittes wird L2C am linken Rand der Schallkarte abgebildet, wie aus Abbildung 52 hervor geht. Die Position am äußersten Rand der darstellbaren Karte erklärt sich daraus, dass bei einer seitlichen Schallquelle die Zeitverzögerung des Auftreffens der Schallwellen vom nächsten Mikrofon zum gegenüber liegenden, am weitesten entfernten Mikrofon maximal ist.

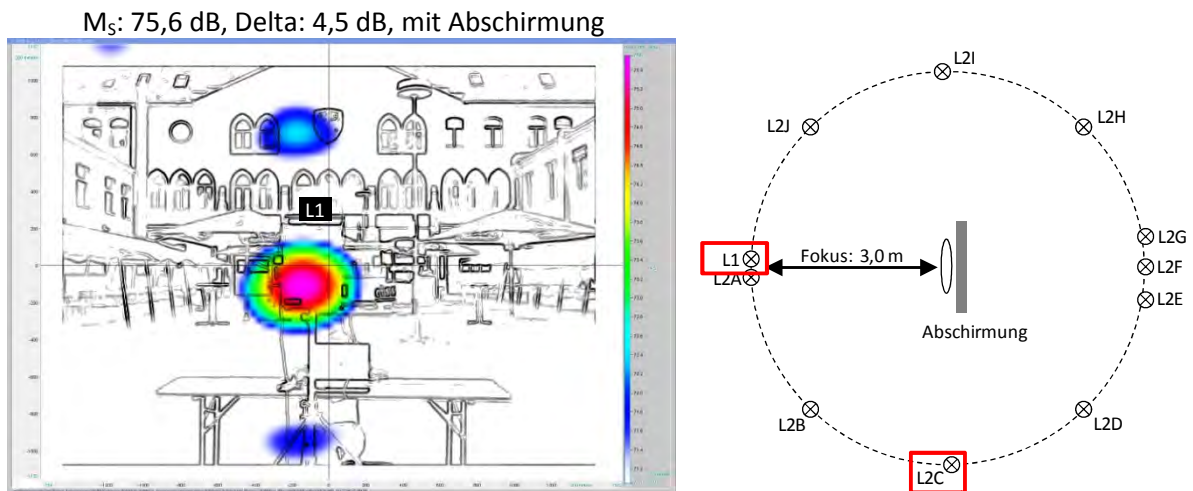


Abbildung 51: Lautsprecher L1 und L2C sind aktiv, dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

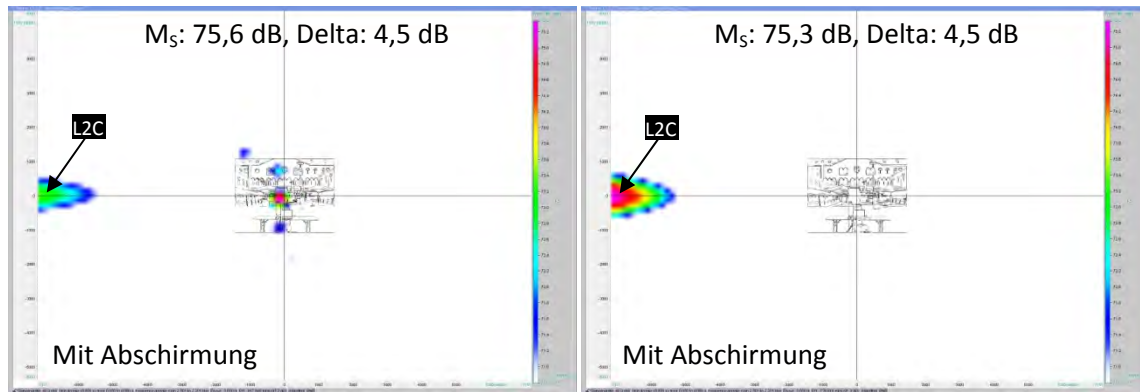


Abbildung 52: Lautsprecher L1 und L2C sind aktiv (links), nur Lautsprecher L2C ist aktiv (rechts), dargestellter Frequenzbereich 2.000 Hz bis 2.200 Hz

Fazit: Schallquellen, die nicht im Fokus der USB-Kamera oder unmittelbaren daneben liegen, haben keinen negativen Einfluss auf die Lokalisierung von Schallquellen.

### Zusammenfassung

Die akustische Abschirmung erfüllt die wesentlichen Kriterien, die für einen ausreichenden Schutz vor Reflektionen und störenden Hintergrundgeräuschen während der Aufnahmen in Abfüllanlagen notwendig sind:

- Die Abschirmung selbst übt keinen Einfluss auf die Visualisierung einer oder mehrerer Emissionsquelle im Fokus oder am Bildrand der USB-Kamera aus.
- Sie schirmt Emissionsquellen hinter der Akustischen Kamera soweit ab, dass sie auf der errechneten Schallkarte nicht erscheinen und somit die Lokalisierung der Emissionsquellen im Fokus der USB-Kamera nicht behindern.

#### 5.2.2.5.4 Erweiterte Anforderungen an Mobilität und Flexibilität durch die neu entwickelte Abschirmung

Für den Transport der akustischen Abschirmung wurde eine 1,2 m \* 1,2 m große Transportbox aus doppelagigem Karton gewählt, die die empfindlichen Dämmplatten beim Transport gegen Eindrücken schützen.

Die Mindestbreite der Messvorrichtung ohne Abschirmung wird durch den Durchmesser des verwendeten Ring-Arrays von 0,75 m vorgegeben. In Verbindung mit der neuen Abschirmung erhöht sich die Breite auf 1,2 m. Die in AS 1.3 ermittelte Obergrenze von 1,5 m wird somit weiterhin eingehalten.

Der gesamte Aufbau, bestehend aus Ring-Array (2,9 kg), Abschirmung (10,7 kg) und Stativ (7,5 kg), besitzt nun ein Gewicht von 21,1 kg. Die in Arbeitsschritt AS 1.3 aufgestellten Forderungen, dass das Gesamtgewicht die für häufiges Heben und Tragen empfohlene Obergrenze [5] nicht überschreitet, wird folglich nur noch teilweise erfüllt. Bei Männern liegt die Grenze bei 30 kg und somit 8,9 kg über dem Gesamtgewicht. Für Frauen überschreitet der Versuchsaufbau jedoch die empfohlene Grenze von 10 kg um mehr als das Doppelte.

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Der (2.) Entwurf des Messverfahrens wurde in einer Abfüllanlage, in Bezug auf seine Praxistauglichkeit getestet. Auf Basis dieser Untersuchung konnten die Mobilität und Flexibilität sowie einzelne Messeinstellungen weiterentwickelt werden. Die vorgesehene Abschirmung der Akustischen Kamera

mir deren Transportkoffer hat sich in der Praxis als ungeeignet erwiesen und eine neue Abschirmung auf Basis von Dämmmatten aus Melaminharzschaumstoff wurde entwickelt. Die Nachteile der ursprünglichen Abschirmung konnten mit der Neukonstruktion überwunden werden. Dies ist jedoch mit einem Anstieg des Gesamtgewichts verbunden, das für weibliche Bediener den empfohlenen Grenzwert überschreitet, so dass weiteres Optimierungspotential bei der Abschirmung besteht.

Die Änderungen und die neue Abschirmung wurden in den (3.) Entwurf des Messverfahrens übernommen und stehen für die Schallquellenanalyse in weiteren Abfüllanlagen zur Verfügung.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.2.3 AS 2.3: Schallquellenanalyse in Abfüllanlagen**

#### **Zielstellung**

Für die Identifikation der Lärmquellen werden die Abfüllanlagen weiterer Getränkehersteller mit den wesentlichen Aggregaten sowie der Flaschentransport- und Pufferstrecken, in verschiedenen Auslastungszuständen schalltechnisch erfasst.

Die gewonnenen Daten sollen in einen Schallquellenkatalog für Abfüllanlagen einfließen. Dieser soll als „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ veröffentlicht werden, so dass Abfüllbetriebe auch ohne Messungen an der eigenen Anlage von den Projektergebnissen profitieren können.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,80 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1). Der Arbeitsschritt hat 1,00 MM weniger in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war, da die Verarbeitung der Messdaten teilweise automatisiert durchgeführt werden konnte. Ein Teil der in den AS 2.1 und AS 2.2 entstandenen Verzögerung konnte wieder aufgeholt werden.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

Die Untersuchungen entsprechend dem (3.) Entwurf des Messverfahrens und der neu entwickelten Abschirmung wurden an drei Abfüllanlagen zweier Getränkehersteller durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ im Anhang, Abschnitt 10.6, ab Seite 129ff eingeflossen (siehe auch Arbeitsschritt AS 4.3 in Abschnitt 5.4.3.3).

#### **Optimierung der akustischen Abschirmung**

Die neu entwickelte Abschirmung hat sich bei der Anwendung in einer realen Abfüllanlage bewährt. Mit dem Ziel, die Zeit die benötigt wird, um von einem Messpunkt zum nächsten zu gelangen weiter zu verkürzen, wurden nach Durchführung der Messungen in der ersten Abfüllanlage die Füße des Stativs entfernt und durch Lenkrollen mit Rad- und Drehkranzbremse ersetzt. Dies brachte zwei Vorteile mit sich:

- Der Messaufbau, bestehend aus Stativ, Abschirmung und Ring-Array, kann gleichzeitig mit dem Messwagen versetzt werden. Dies ermöglicht einen zügigeren Wechsel zwischen verschiedenen Messpunkten.

- Durch die Rollen wird das manuelle Anheben und Versetzen des rund 21 kg schweren Messaufbaus überflüssig, da die gesamte Einheit nun gerollt werden kann. Das schwerste Einzelteil des Messaufbaus stellt die Abschirmung mit rund 11 kg dar. Da diese jedoch im Idealfall nur beim Auf- und Abbau der Apparatur vom Bediener angehoben werden muss, erfüllt der Messaufbau nun die Anforderungen für häufiges Heben und Tragen nach [5] sowohl für männliche als auch weibliche Bediener.

### **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Die wesentlichen Aggregate sowie Flaschentransport- und Pufferstrecken dreier verschiedener Abfüllanlagen wurden in unterschiedlichen Auslastungszuständen schalltechnisch erfasst. Die gewonnenen Daten wurden im „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ (Abschnitt 10.6 ab Seite 129ff) zusammengefasst und stehen den Abfüllbetrieben auch ohne Messungen an der eigenen Anlage zur Verfügung.

Der (3.) Entwurf des Messverfahrens, in Verbindung mit den Verbesserungen an der akustischen Abschirmung, entspricht dem in Arbeitsschritt AS 2.5 (Abschnitt 5.2.5) definierte Messverfahren.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.2.4 AS 2.4: Reproduzierbarkeitsversuche im Technikum**

#### **Zielstellung**

Die Reproduzierbarkeit des konzipierten Messverfahrens soll unter kontrollierten Technikumsbedingungen an der Flaschentransportstrecke überprüft werden. Gleichzeitig sollen mit einem Schallpegelmessgerät Vergleichsmessungen nach DIN EN ISO 3744 [24] durchgeführt werden.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 0,75 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1). Der Arbeitsschritt hat 0,50 MM weniger in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war. Ein Teil der in den AS 2.1 und AS 2.2 entstandenen Verzögerung konnte wieder aufgeholt werden.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

Die Untersuchung der Reproduzierbarkeit des in Arbeitsschritt AS 2.5 beschriebenen Messverfahrens wurde an einem Antrieb der Flaschentransportstrecke (vgl. Abbildung 15 auf Seite 20) unter Technikumsbedingungen durchgeführt. Hierfür wurde als Referenz mittels Schallpegelmessgerät (Brüel & Kjær, Typ 2236) zunächst der A-bewertete, äquivalente Dauerschallpegel  $L_{Aeq}$  des Antriebs in unterschiedlichen Entfernungen zum Antrieb gemessen (siehe Messpunkte in Abbildung 53), während sämtliche anderen Antriebe und externe Lärmquellen im Technikum still standen.

Die Messwerte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Der niedrigste und höchste Wert der äußeren Messpunkte (*Aa, Ab, Bc, Cd, Dd, Ed, Fc, Gb* und *Ga*, Abstand Messgerät zum Antrieb zwischen 2,8 m und 3,2 m) unterscheiden sich um 2,1 dB(A). Bezogen auf den Mittelwert dieser Messpunkte von 68,2 dB(A) legt dies den Schluss nahe, dass die Schallabstrahlung des Antriebs im Bereich der Messpunkte keine signifikante Richtcharakteristik besitzt. Der Effektivwert  $E_s$ , der bei Messungen nach dem Messverfahren auf den äußeren Messpunkten bestimmt wurde, bestätigt die Messungen des Schallpegel-

messgeräts. Aus Tabelle 5 geht hervor, dass  $E_s$  (Algorithmus RMS; Integrationszeit = Messdauer: 8 Sekunden) auf den äußeren Messpunkten (*Ab, Bc, Dd, Fc und Gb*) bei durchschnittlich 70,4 dB(A), mit einer Differenz von 2,5 dB(A) zwischen niedrigstem und höchstem Wert liegt.

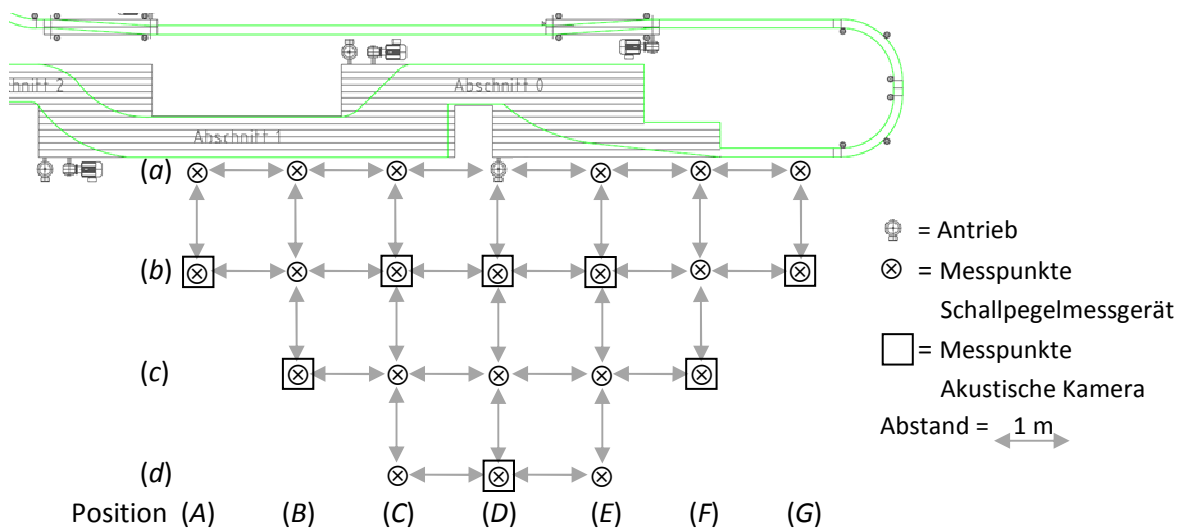


Abbildung 53: Untersuchter Antrieb im Teilstück der Flaschentransportstrecke

Tabelle 4: Messwerte Schallpegelmessgerät Brüel & Kjær, Typ 2236 ( $L_{Aeq}$ ; Zeitbewertung: Fast; Messdauer 8 Sekunden)

Abstände	3 m (A)	2 m (B)	1 m (C)	0 m (D)	1 m (E)	2 m (F)	3 m (G)
0 m (a)	68,3 dB(A)	69,9 dB(A)	72,8 dB(A)	Antrieb	74,3 dB(A)	70,8 dB(A)	69,3 dB(A)
1 m (b)	67,3 dB(A)	70,0 dB(A)	69,7 dB(A)	73,6 dB(A)	74,8 dB(A)	70,2 dB(A)	68,6 dB(A)
2 m (c)		67,2 dB(A)	69,2 dB(A)	73,2 dB(A)	71,9 dB(A)	68,5 dB(A)	
3 m (d)			67,2 dB(A)	68,5 dB(A)	68,9 dB(A)		

Tabelle 5: Messwerte Akustische Kamera (Effektivwerte  $E_s$ , Algorithmus RMS; Integrationszeit = Messdauer: 8 Sekunden)

Abstände	3 m (A)	2 m (B)	1 m (C)	0 m (D)	1 m (E)	2 m (F)	3 m (G)
0 m (a)				Antrieb			
1 m (b)	69,0 dB(A)		71,9 dB(A)	78,7 dB(A)	74,7 dB(A)		71,2 dB(A)
2 m (c)		69,2 dB(A)				71,5 dB(A)	
3 m (d)				71,0 dB(A)			

Wesentliches Ziel des Messverfahrens ist die Lokalisierung von Schallquellen bei Getränkeabfüllanlagen. Die Ergebnisse sind als reproduzierbar zu bewerten, wenn eine Lärmquelle ohne signifikante Richtcharakteristik auf der Schallkarte stets demselben Emittenten zugeordnet werden kann.

Hierfür wurde der Antrieb aus verschiedenen Richtungen und Entfernungen (vgl. Abbildung 53) nach Anweisung des Messverfahrens aufgenommen. Die Ergebnisse (Abbildung 54 bis Abbildung 61, links jeweils das Videobild, rechts die Schallkarte mit Objekt in der Konturdarstellung) zeigen, dass unabhängig von der Richtung und der Entfernung des Ring-Arrays, stets der Motor des Antriebs als primäre Lärmquelle identifiziert wird.

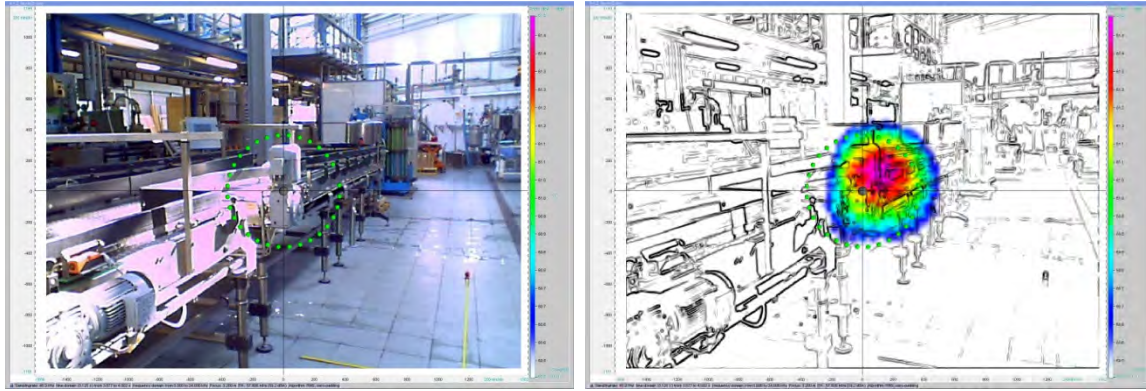


Abbildung 54: Position *Ab* in 3,2 m Entfernung zum Antrieb

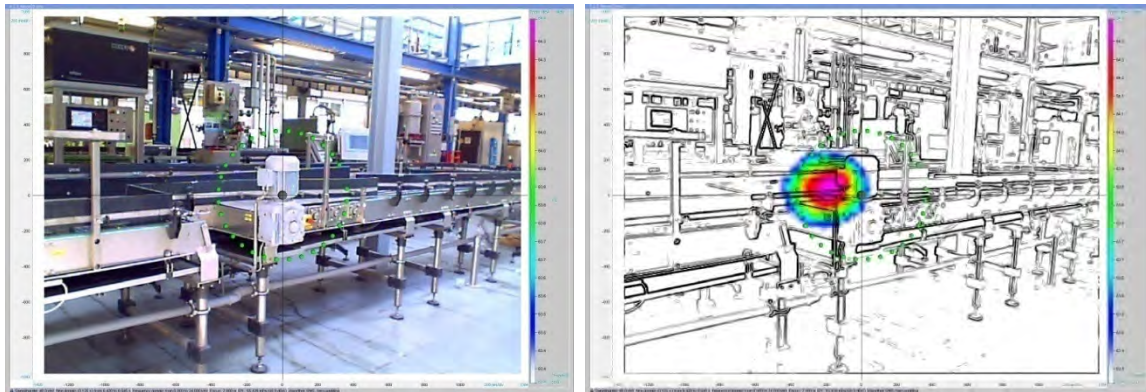


Abbildung 55: Position *Bc* in 2,8 m Entfernung zum Antrieb

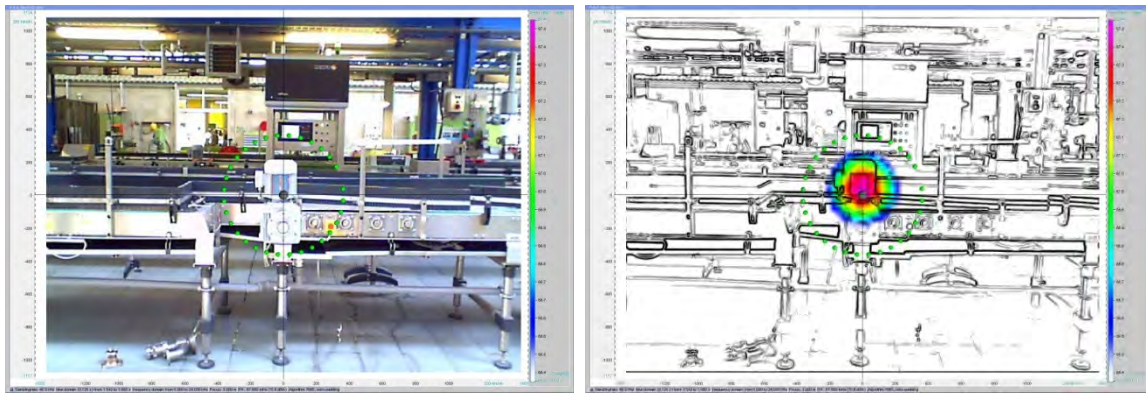


Abbildung 56: Position *Dd* in 3,0 m Entfernung zum Antrieb

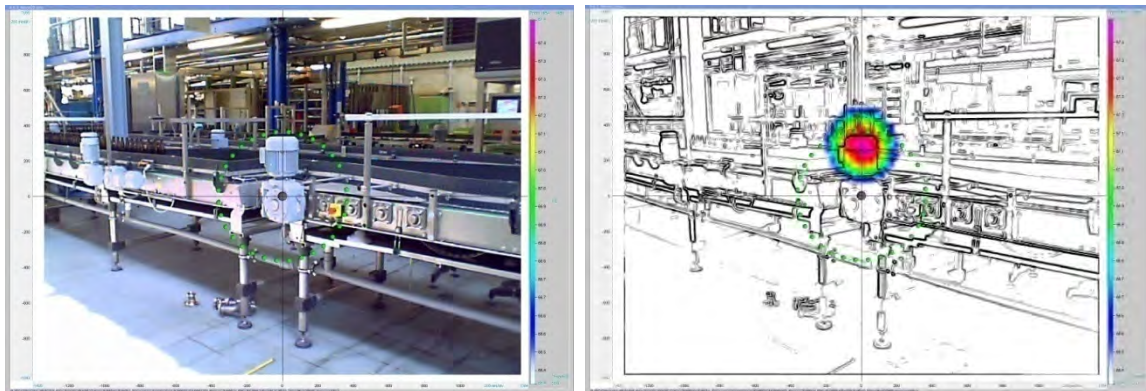


Abbildung 57: Position *Fc* in 2,8 m Entfernung zum Antrieb

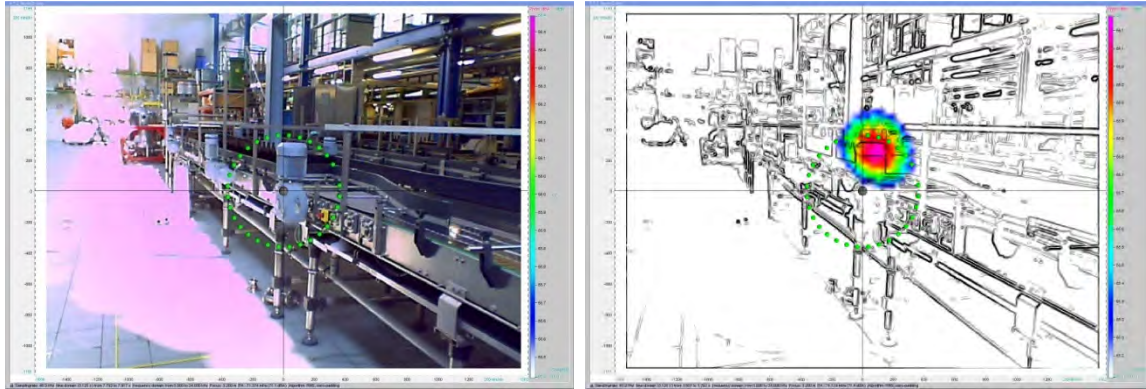


Abbildung 58: Position *Gb* in 3,2 m Entfernung zum Antrieb

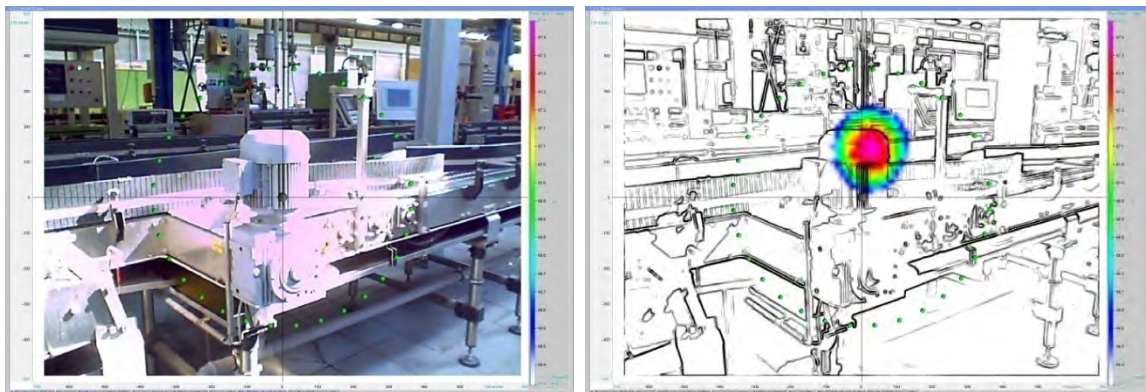


Abbildung 59: Position *Cb* in 1,4 m Entfernung zum Antrieb

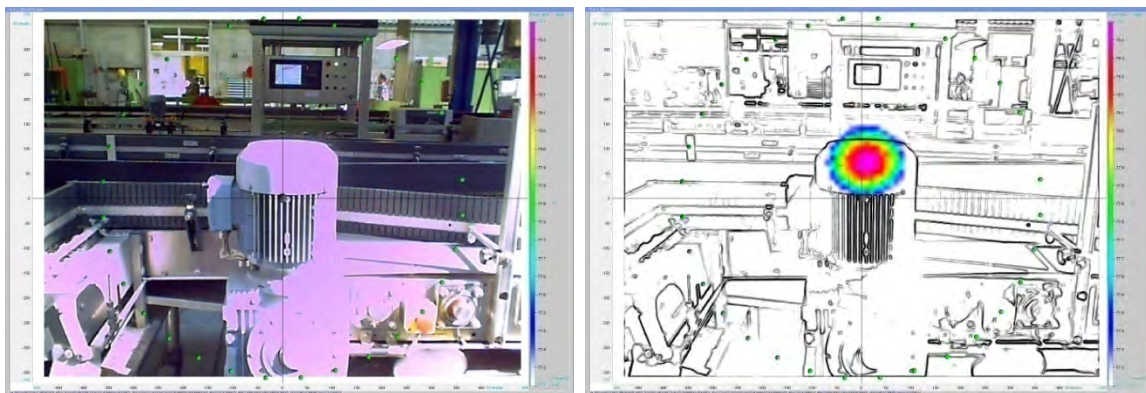


Abbildung 60: Position *Db* in 1,0 m Entfernung zum Antrieb

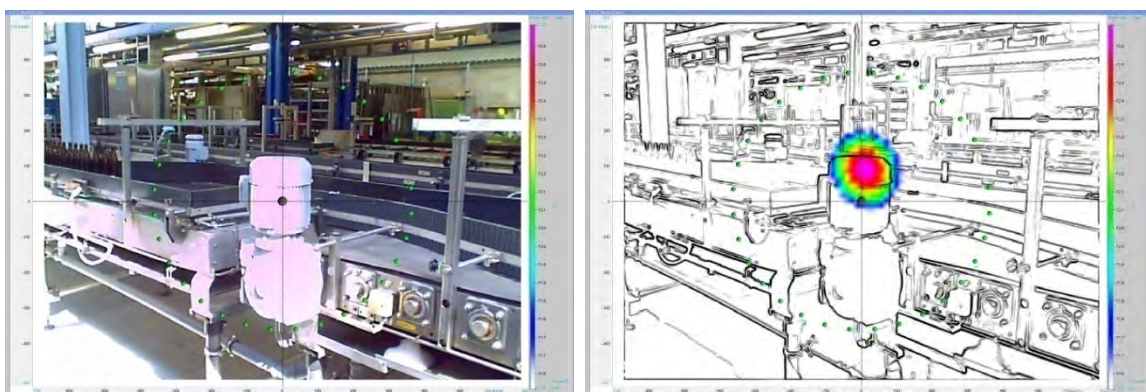


Abbildung 61: Position *Eb* in 1,4 m Entfernung zum Antrieb

## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Die Untersuchungen im Technikum haben ergeben, dass das Messverfahren in Bezug auf die Lokalisierung von Lärmquellen reproduzierbare Ergebnisse liefert.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.2.5 AS 2.5: Definition des Messverfahrens; Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen**

#### **Zielstellung**

Definition des Messverfahrens zur Lokalisierung und Bewertung von Schallquellen bei Getränkeabfüllanlagen auf Basis der Akustischen Kamera und Veröffentlichung in Form eines Leitfadens.

Wie in Abschnitt 2.2 bereits ausgeführt, soll hierfür das Messsystem Akustische Kamera für den Einsatz im Getränkeabfüllbereich angepasst werden. Ziel ist es, eine ortsgenaue Lokalisierung von Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen zu ermöglichen. Des Weiteren soll das Messverfahren die Darstellung und Aufzeichnung der Bewegungen der Emissionsquellen auf den Behältertransporteuren und deren zeitlichen Schallpegeländerungen erlauben.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,40 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

#### **Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen**

Beschreibung des Messverfahrens zur Lokalisierung und Bewertung von Schallquellen bei Getränkeabfüllanlagen auf Basis der Akustischen Kamera.

##### **5.2.5.1 Messeinrichtung – Benötigte Geräte und Aufbau des Messsystems**

Für die Durchführung der Messungen werden die folgenden Gerätschaften benötigt:

- Akustische Kamera (Herstellerbezeichnung und Kenndaten in Abschnitt 4.1) bestehend aus
  - 32 Kanal Ring-Array
  - Datenrecorder dRec 48C192 EPP MicBus; 25-poliger D-Sub Stecker
  - Mess-PC Lenovo ThinkPad T61p, 2GB RAM mit EPP-Interface-Modul und NoiseImage Version 4.1.2; Computermaus
  - Kalibriertester (Klicker) mit Anschlusskabel
- 5 m Rollmaßband
- Akustische Abschirmung mit Schnellwechselplatte (siehe Abschnitt 4.2)
- Stativ SABA ST100 mit arretierbaren Rollen (siehe Abschnitt 4.3)



- Messwagen und Kabeltrommel mit feststehenden Buchsen (siehe Abschnitt 4.4)

Für den Transport sind Ring-Array und Datenrekorder in stabilen Transportboxen zu verstauen, um eine Beschädigung, insbesondere der Mikrophone am Ring-Array, zu verhindern. Die Abschirmung ist für den Transport in einer 1,2 m \* 1,2 m großen Transportbox aufzubewahren, die die Dämmplatten beim Transport schützt.

Der Aufbau der Messeinrichtung erfolgt in folgenden Schritten (siehe Abbildung 62 und Abbildung 63):

- Aufstellen des Stativs, Arretierung der Rollen, öffnen und fixieren der Arretierung für die Schnellwechsellatte, absenken und fixieren der zentralen Höhenverstellung auf Minimumhöhe, feststellen der Stativbeine beim Markierung „1,55 m“, arretieren der Drehplatte, Stativkopf waagrecht und ebenfalls fixiert.
- Einsetzen der Abschirmung mit Schnellwechsellatte in den Stativkopf, Arretierung rastet selbsttätig ein und fixiert die Abschirmung.
- Einsetzen des Ring-Arrays in die Abschirmung, Befestigen des Arrays mittels Schraube (5. Loch von vorne), Befestigung des Arrays an der Abschirmung durch einstecken des oberen, rückseitigen Abstandhalters in den Gummi-Verbinder, Überprüfung der Soll-Kamerahöhe von 1,55 m über dem Boden.
- Kabeltrommel auf dem unteren Boden mit Kabelbindern am Messwagen befestigen, Kabeltrommel vollständig abrollen und einstecken.
- Mess-PC mit Computermaus auf dem oberen Boden des Messwagens aufstellen und an Kabeltrommel anschließen, überschüssiges Kabel mit Kabelbinder am Messwagen fixieren, Mess-PC einschalten, Software-Dongle in USB-Buchse einstecken, Software NoiseImage starten.
- Datenrekorder auf dem unteren Boden des Messwagens aufstellen und an Kabeltrommel anschließen (Kippschalter aus, siehe Abbildung 65), überschüssiges Kabel mit Kabelbinder am Messwagen fixieren.
- Ring-Array 32 an Datenlogger (Mikrofone, siehe ② in Abbildung 64) und Mess-PC (USB-Kamera) anschließen.
- Datenlogger und Mess-PC mittels D-Sub Stecker verbinden (③ in Abbildung 64), überschüssiges Kabel mit Kabelbinder am Messwagen fixieren.
- Anschließen des Kalibriertesters (Klicker) am Datenrekorder (① in Abbildung 64), einschalten des Datenrekorders.

Mit dem Anschluss des Klickers an den Rekorder ist die Messeinrichtung vollständig aufgestellt und nach dem Einschalten des Datenrekorders kann mit der Softwareeinstellung und der ersten Messung begonnen werden.

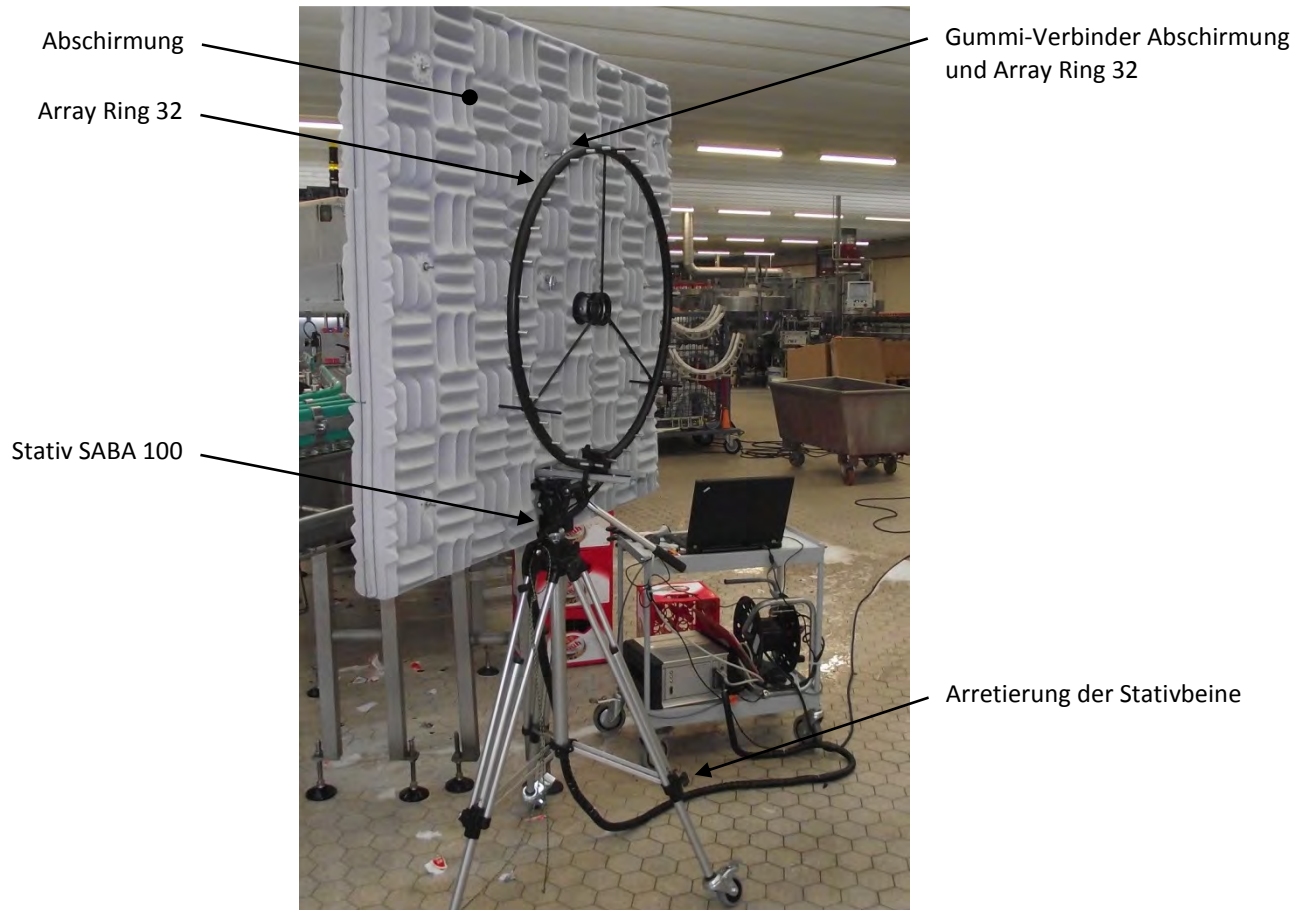


Abbildung 62: Messaufbau – gesamt



Abbildung 63: Messaufbau – Stativkopf

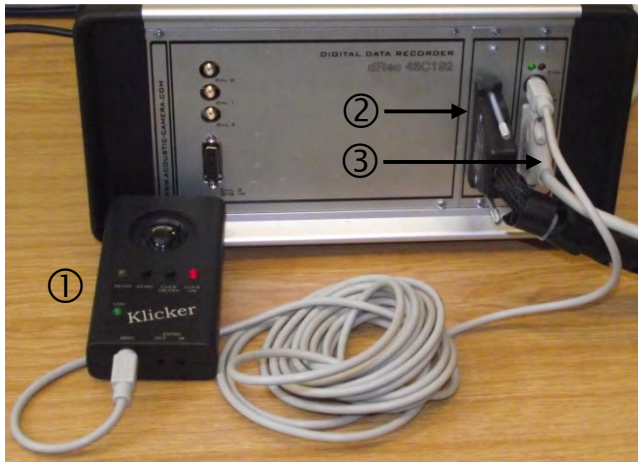


Abbildung 64: ① Kalibriertester (Klicker), ② Ring-Array  
logger und ③ EPP am Datenlogger



Abbildung 65: Kippschalter am Daten-

### 5.2.5.2 Messeinrichtung – Software und verwendete Einstellungen

Nach dem Aufstellen und Anschließen der Messeinrichtung kann das Programm Noiselmage gestartet werden. Der Rekorder wird durch anklicken des „REC“-Symbols eingeschaltet (siehe ① in Abbildung 66). Über die Schaltflächen der „Recorder Control“ ② werden die erforderlichen Einstellungen für die Aufnahme vorgenommen. Als Standardeinstellung für die Schaltflächen „Recorder device“, „Temperature“, „Channel Group“, „Samplingrate (samples/s)“, „Hardware filter“ und „Amplifier“ werden die in Abbildung 66 dargestellten Einstellungen verwendet. Die Einstellungen der Videokamera („Camera...“) werden nicht verändert.

Die „Live Preview“ Vorschaufunktion ist beim Start des Recorders bereits aktiviert. Das Vorschaufenster ③ zeigt dabei die aktuellen Kanaldaten der Mikrophone. Fenster ④ zeigt an, ob das Signal einzelne Mikrophone übersteuert (grün = nicht übersteuert, gelb = noch nicht übersteuert, rot = übersteuert) und welche Mikrophone deaktiviert wurden. Das Mikrophon Nummer 22 wurde sowohl über die Schaltfläche „Active preview sensors“ als auch über „Active record sensors“ deaktiviert, da es auf dem verwendeten Ring-Array leicht verbogen ist und gegebenenfalls zu fehlerhaften Ergebnissen bei der Erstellung der Lärmkarten führen könnte. Ist eines der Mikrophone übersteuert, so muss die Verstärkung durch den „Amplifier“ schrittweise reduziert werden, bis das Signal nicht mehr übersteuert. Fenster ⑤ zeigt das aktuelle Bild der in die Akustische Kamera integrierten Videokamera und die aus den Kanaldaten der Mikrophone über die „Preview time“ von 8,0 ms ② errechnete Schallkarte.

Der „Focus“ entspricht der Entfernung des Ring-Arrays zum Objekt vor der Kamera. Dieser Abstand wird mittels Rollbandmaß vor jeder Aufnahme bestimmt und eingegeben. Die virtuelle Schallkarte wird für diese Entfernung berechnet und mit dem Bild der Videokamera synchronisiert und vereinigt.

Die Aufnahmedauer kann über die Einstellungen „Duration (s)“ eingegeben werden. Bei der verwendeten Samplingrate von 48.000 samples/s können Aufnahmen mit einer Dauer von 0,25 Sekunden bis 21,85 Sekunden durchgeführt werden. Die maximale Aufnahmedauer sollte 16 Sekunden jedoch nicht überschreiten, da ansonsten der Speicher für die Videodaten zu klein ist und kein vollständiges Video aufgezeichnet wird. Tabelle 6 listet die mögliche Aufnahmedauer in Abhängigkeit der gewählten Samplingrate auf.

Tabelle 6: Mögliche Aufnahmedauer in Abhängigkeit der Samplingrate

Mögliche Aufnahmedauer in Sekunden	Samples/s				
	12.000	24.000	48.000	96.000	192.000
0,25	✓	✓	✓	✓	✓
0,5	✓	✓	✓	✓	✓
1,0	✓	✓	✓	✓	✓
2,0	✓	✓	✓	✓	✓
4,0	✓	✓	✓	✓	✓
8,0	✓	✓	✓	✓	
16,0	✓	✓	✓		
32,0	✓	✓			
64,0	✓				
Maximum in Sekunden	87,38	43,69	21,85	10,92	5,46

Über die Schaltfläche „Trigger...“ kann der Aufnahmezeitpunkt stufenlos festgelegt werden. Ohne Trigger startet die Aufnahme mit Betätigung des Startknopfes. Bei einer Triggereinstellung von 100 % nimmt der Rekorder kontinuierlich auf und die Aufnahme wird mit Betätigung des Startknopfes abgeschlossen.

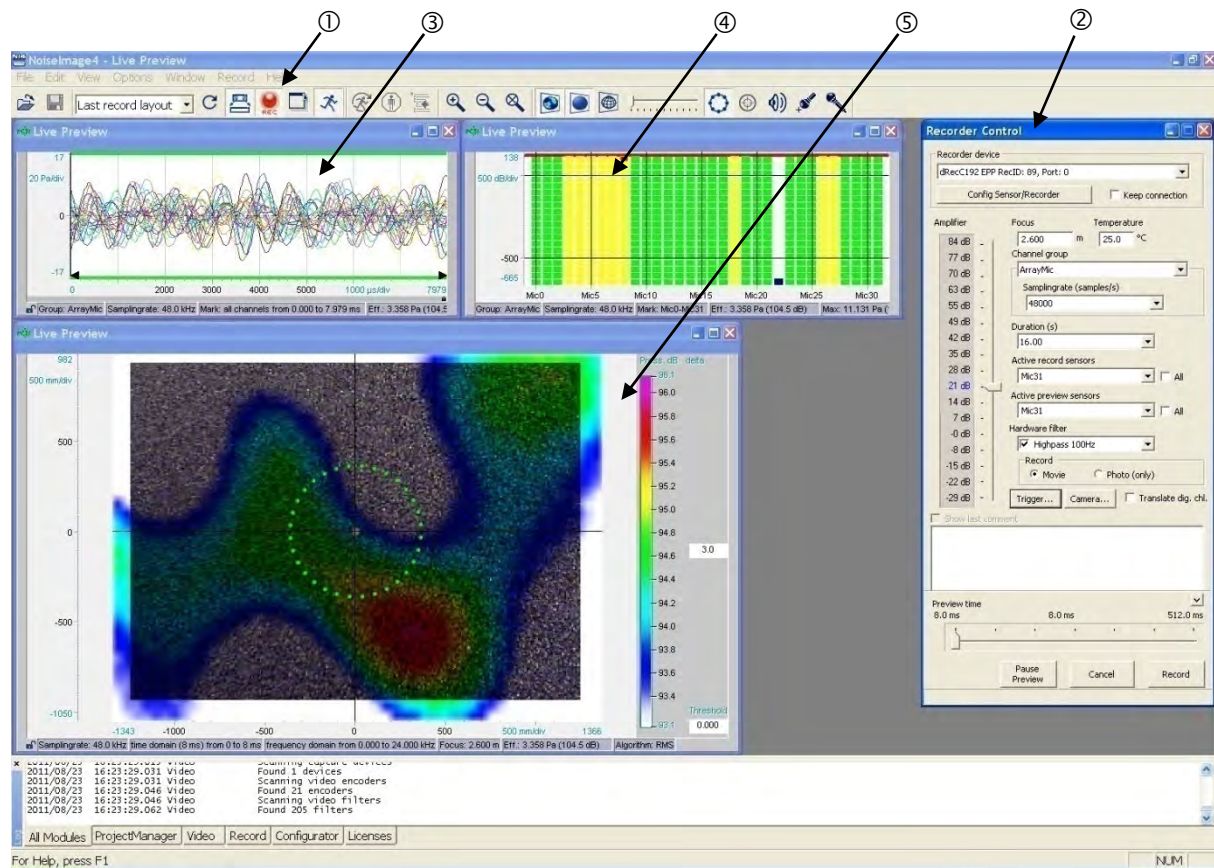


Abbildung 66: Screenshot der Aufnahmeeinstellungen

Nachdem die Akustische Kamera auf das zu untersuchende Objekt ausgerichtet (siehe unten: Messung – Ausrichtung des Ring-Arrays) und sämtliche Einstellungen vorgenommen und protokolliert wurden, wird die Messung über die Schaltfläche „Record“ vorbereitet. Sobald der Recorder bereit ist, öffnet sich ein entsprechendes Eingabefenster und die Messung kann durch anklicken der Schaltfläche „Trigger“ gestartet werden. Alternativ kann die Messung auch durch Drücken der Taste „Start“ auf dem Kalibriertester (siehe Abbildung 64, oben) gestartet werden.

Nach Ablauf der Messdauer werden die Kanaldaten aus dem Datenrekorder ausgelesen und zusammen mit den Video in sogenannten Kanaldatendateien (Dateiformat: \*.chl) zwischengespeichert. Die aufgenommenen Kanaldaten werden automatisch geöffnet und können über die Menüpunkt „File“ (siehe ① in Abbildung 67) und „Save As...“ dauerhaft auf der Festplatte des Mess-PCs gespeichert werden.

Weitere Informationen zur Durchführung von Aufnahmen mit der Akustischen Kamera finden sich im Handbuch zur Software NoiseImage [11].

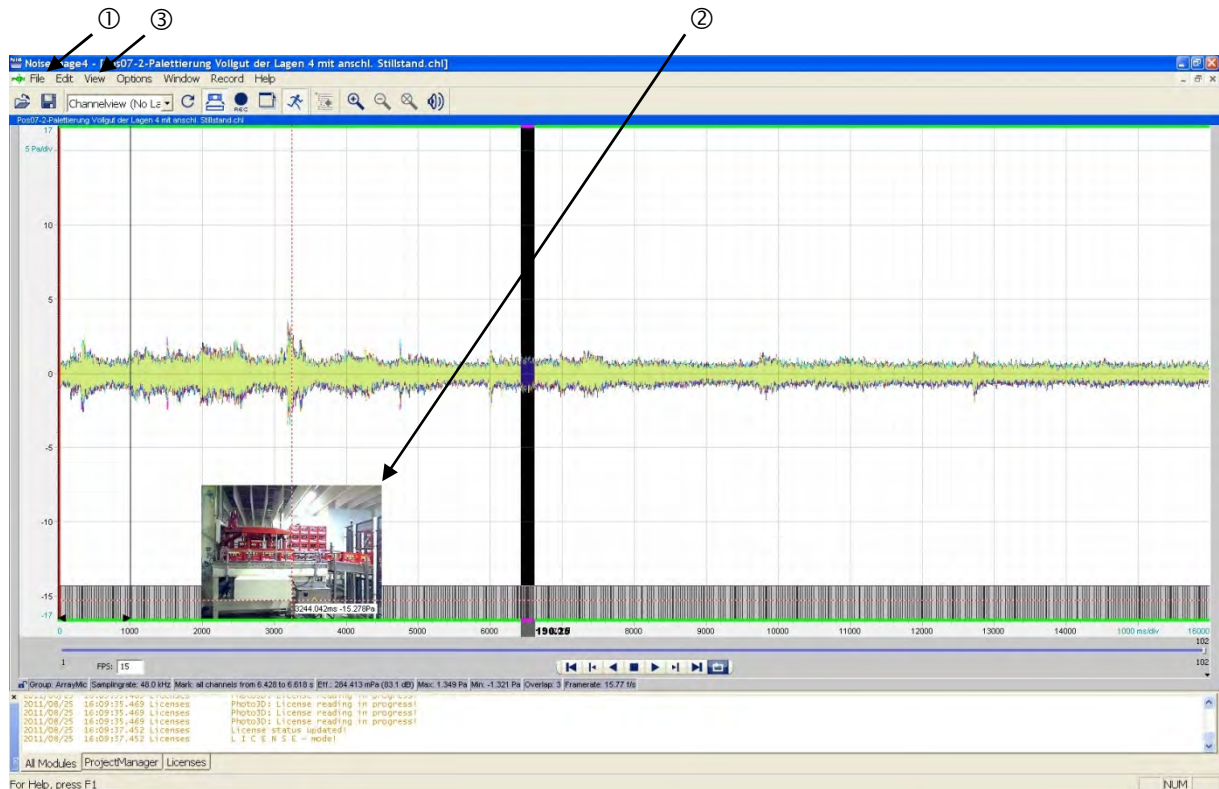


Abbildung 67: Screenshot der aufgenommenen Kanaldaten mit Video-Vorschaufenster ②

### 5.2.5.3 Messung – Überprüfung der Kalibrierung

Nach jedem Neuaufbau des Messsystems, zu Beginn eines Messtages oder nach einer möglichen Beschädigung des Arrays sollte die Kalibrierung der Mikrophone überprüft werden. Dies erfolgt über den am Datenlogger angeschlossenen Kalibriertester (Klicker). Der Klicker wird in zuvor definierten Abständen vor dem Ring-Array positioniert und erzeugt über einen integrierten Lautsprecher auf Knopfdruck ein kurzes Klickgeräusch. Die Kalibrierung sollte in einer Umgebung erfolgen, in der das Klickgeräusch des Kalibriertesters deutlich wahrnehmbar ist, um eine Überlagerung des Testers zu vermeiden. Ist die Akustische Kamera korrekt kalibriert, so muss die Quelle auf der Lärmkarte genau im Zentrum des Lautsprechers liegen.

Das Messsystem wird wie zuvor beschrieben aufgebaut, die Software gestartet und eingerichtet. Als Messdauer wird zwei Sekunden gewählt und der Trigger auf 50 % eingestellt. Gestartet werden die Messungen über den Startknopf des Kalibriertesters. Die Kalibrierung wird für drei verschiedene Entfernungen überprüft, um sicherzustellen, dass die berechneten Schallkarten die realen Schallquellen über den gesamten Messbereich richtig abbilden. Abbildung 68 bis Abbildung 70 zeigen die Ergebnisse einer positiven Kontrolle der Kalibrierung für die Entfernungen 0,5 m (Mindestabstand), 1,5 m und 5,0 m (maximaler Messbereich).

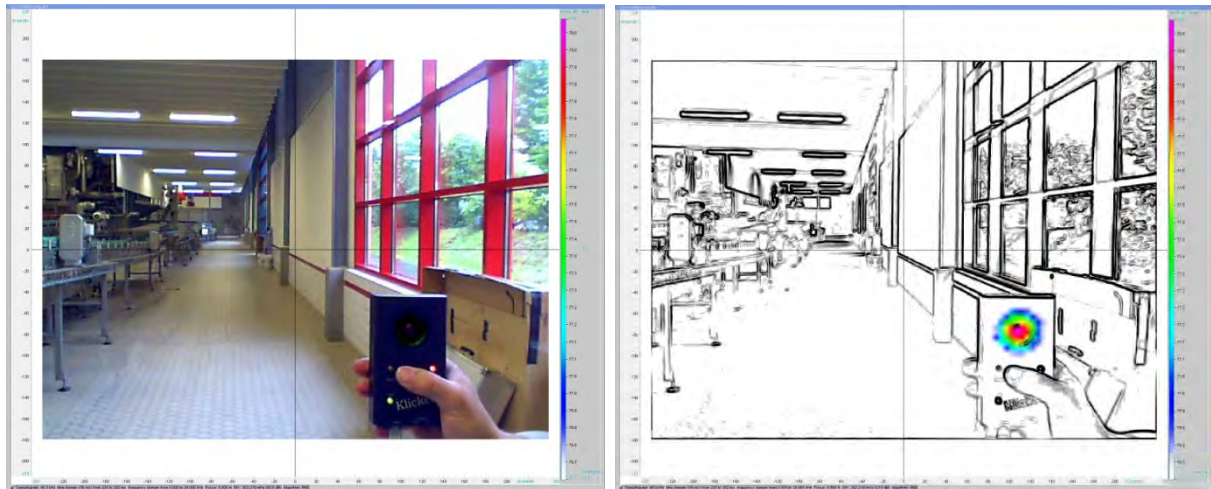


Abbildung 68: Abstand Kalibriertester – 0,5 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung)

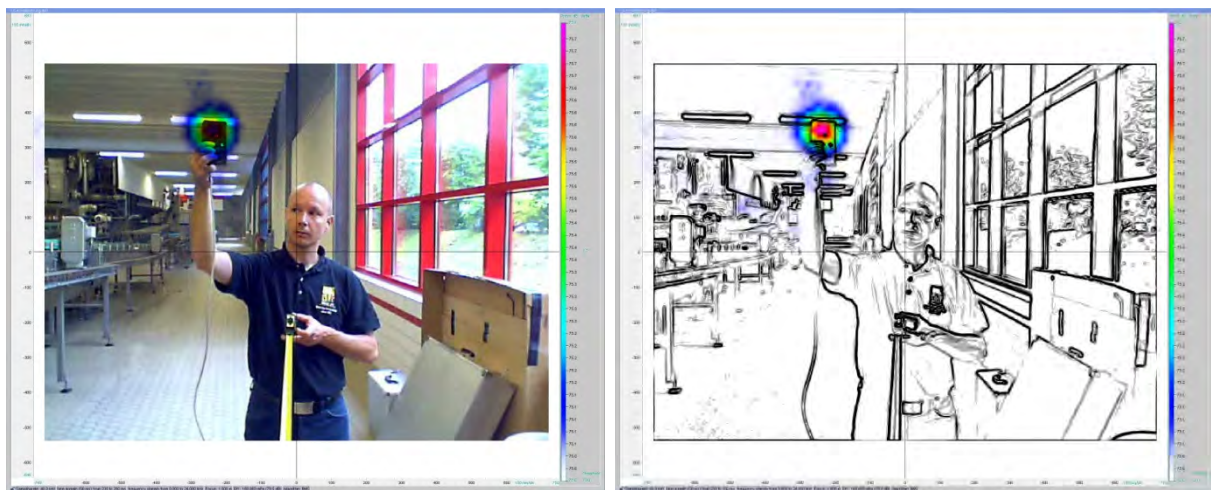


Abbildung 69: Abstand Kalibriertester – 1,5 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung)

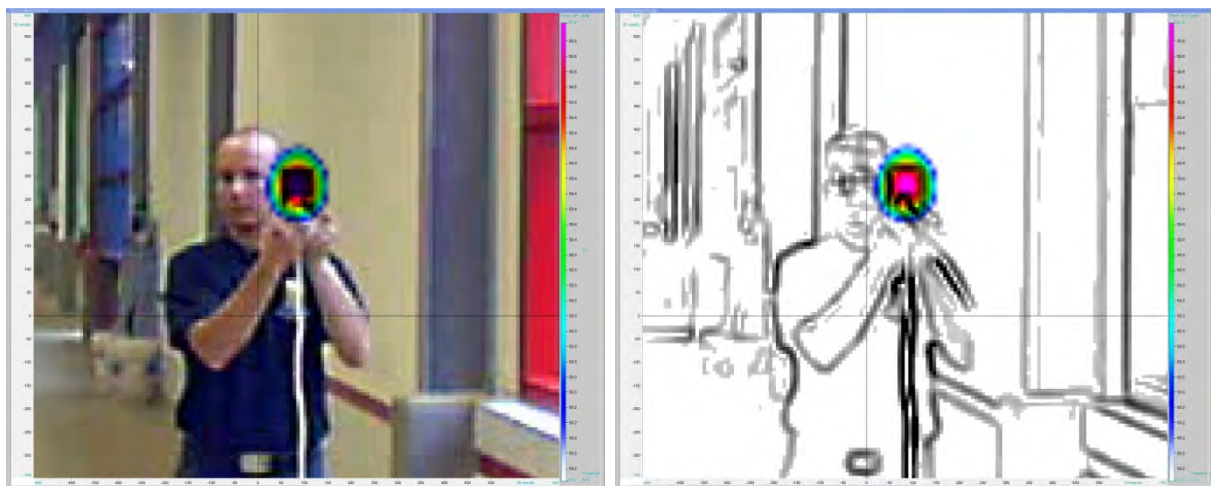


Abbildung 70: Abstand Kalibriertester – 5,0 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung)

#### 5.2.5.4 Messung – Ausrichtung des Ring-Arrays

Die Schallkarten werden auf eine Ebene parallel zur Ebene des Ring-Arrays projiziert. Der Abstand dieser Projektionsebene entspricht dem bei der Aufnahme eingestellten Fokus. Im Idealfall wird daher die Akustische Kamera senkrecht vor dem zu beobachtenden Objekt, wie in Abbildung 71 zu se-

hen, positioniert. Bei dieser Aufstellung ist gewährleistet, dass reale Schallquellen auf der Schallkarte in der Ebene des beobachteten Objektes dargestellt werden.

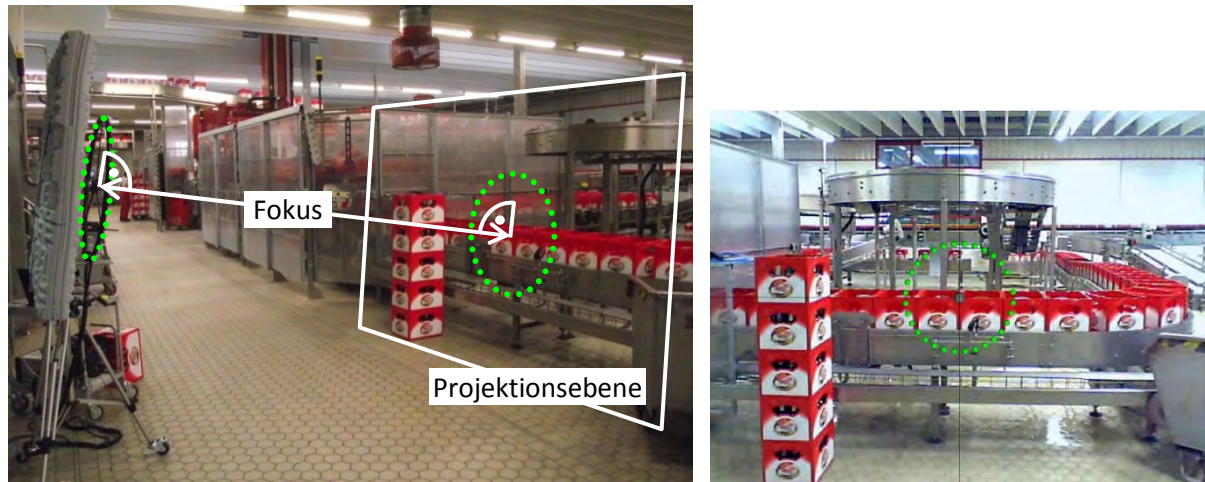


Abbildung 71: Ausrichtung des Ring-Arrays (links) zum beobachteten Objekt (rechts)

Schallquellen, die vor oder hinter dem eingestellten Fokus liegen, werden ebenfalls auf der Projektionsebene dargestellt. Die Folge ist, dass in einem dreidimensionalen Raum verteilte Schallquellen auf einer zweidimensionalen Ebene dargestellt werden und somit die Tiefe des Raumes bei der Darstellung verloren geht. Bei dem in Abbildung 72 gezeigten Beispiel führt dies dazu, dass weit entfernte Schallquellen, wie zum Beispiel der Kastentransport (gestrichelter Pfeil im linken Bild), auf der berechneten Schallkarte gegebenenfalls nicht exakt mit der tatsächlichen, im Videobild erkennbaren Quelle übereinstimmen. Mit zunehmender Distanz zwischen Schallquellen und Projektionsebene kann diese Unschärfe in der Darstellung zunehmen.

Kann die Akustische Kamera, zum Beispiel aus Platzgründen oder aufgrund der Abmessungen des Objektes, nicht parallel zum Objekt ausgerichtet werden, ist der Fokus so zu wählen, dass er in der Mitte des zu beobachtenden Objektes liegt, um auch hier die Unschärfe der von drei auf zwei Dimensionen reduzierten Darstellung möglichst gering zu halten.

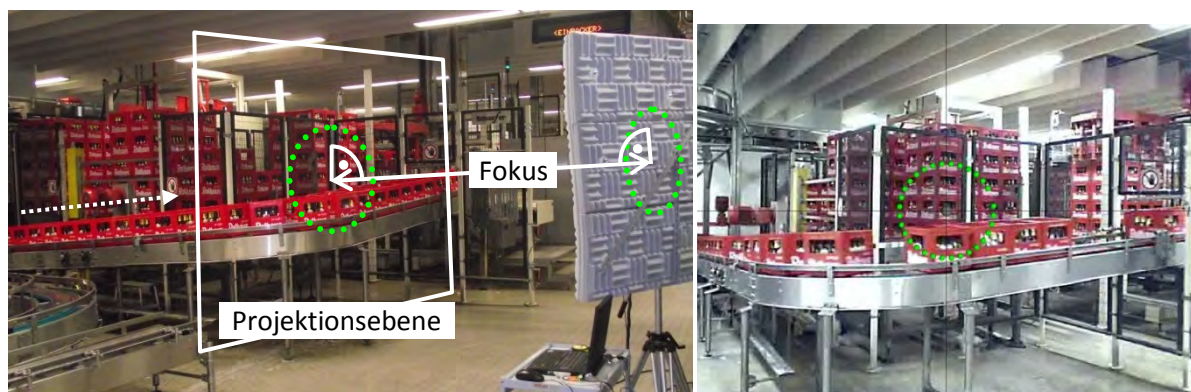


Abbildung 72: Ausrichtung des Ring-Arrays (links) zum beobachteten Objekt (rechts)

### 5.2.5.5 Messung – Messpunkte und Positionierung der Akustischen Kamera

Prinzipiell stellen bei laufendem Abfüllbetrieb sämtliche Aggregate, einzelne Teile von Aggregaten und das bewegte Gut mögliche Lärmquellen dar, die jeweils ihren Beitrag zur Gesamtemission der Abfüllanlage beitragen. Um für die Untersuchung gesamter Abfüllanlagen den Messumfang auf ein

handhabbares Maß zu reduzieren, werden die in Tabelle 1 (ab Seite 23) aufgeführten, wesentlichen Lärmemittenten als Orientierungshilfe beziehungsweise Checkliste verwendet.

Für die ortsgenaue Lokalisierung der Schallemissionsquellen wird das Messsystem so positioniert, dass das zu untersuchende Objekt aus Tabelle 1 mit seinem gesamten Umfang im Videobild der „Live Preview“ Vorschaufunktion sichtbar ist (vgl. ⑤ in Abbildung 66). Der Abstand zwischen Objekt und Messsystem ergibt sich dabei aus der Größe des Objektes und kann zwischen 0,5 m und 5,0 m liegen. Bei Objekten mit einem Durchmesser > 6 m (vgl. Formel 6 auf Seite 32 in Abschnitt 5.2.1) ist das Objekt in mehrere Bereiche zu unterteilen, um nicht den maximalen Arbeitsbereich der Akustischen Kamera von 5 m zu überschreiten. Die Videokamera befindet sich für die Aufnahmen in  $1,55 \text{ m} \pm 0,075 \text{ m}$  Höhe über den Boden, in Anlehnung an DIN EN ISO 9612 [25] für einen stehenden Beschäftigten. Über das Stativ kann die Neigung des Ring-Arrays und der Abschirmung so verändert werden, dass das gewünschte Objekt im Zentrum des Videobildes liegt.

#### 5.2.5.6 Auswertung – Automatisierte Verarbeitung der Messungen mittels „Project Manager“

Die Software Noiselmage, in der verwendeten Version 4.1.2, stellt den sogenannten „Project Manager“ (② in Abbildung 73) zur Verfügung, der über die Taste „View“ (① in der Menüzeile) geöffnet werden kann. Die Verwendung des „Project Managers“ ermöglicht die automatisierte Verarbeitung der aufgenommenen Kanaldaten (⑤), die in „Sessions“ (③) und „Projects“ (④) gegliedert werden können. Die Verwendung des „Project Managers“ wird im Handbuch zu Noiselmage 4.1.2 erläutert [11].

Für die spätere Auswertung der Messungen sind die Kanaldatenansicht (⑥), das Spektrum (⑦) sowie das Spektrogramm (⑧) von Bedeutung, die über den „Project Manager“ sukzessive erzeugt und als Bilder im Dateiformat „.jpg“ in den zugehörigen Projektordner exportiert werden. Mit einem entsprechenden Programm (zum Beispiel Vorschaufunktion im „Microsoft Explorer“) können diese Dateien zur visuellen Bewertung geöffnet werden.

Zusätzlich zu den drei Bilddateien werden von jeder Aufnahme zwei akustische 2D Filme über die Funktion „Movie2D (Template)“ erzeugt und ebenfalls in den Projektordner exportiert. Die beiden Filme unterscheiden sich darin, dass bei einem der Filme das tatsächliche Bild der Videokamera wiedergegeben und mit der Schallkarte überlagert wird. Dies hat den Vorteil, dass das untersuchte Objekt leicht zu identifizieren ist. Nachteilig kann dabei jedoch sein, dass auf dunklen Objekten die Farben der Schallkarte nicht eindeutig der Schallpegelfarbskala zugeordnet werden können. Aus diesem Grund wird beim zweiten Film die Konturdarstellung (vgl. ① in Abbildung 76) aktiviert. Über den Schieberegler kann die Intensität der Kanten so reguliert werden, dass das Objekt noch zu erkennen ist, ohne die Farben der Schallkarte zu überdecken. Gespeichert werden die Filme jeweils in den Formaten „\*.amo“ (⑨), welches ausschließlich mit Noiselmage betrachtet werden kann, und „\*.avi“ (⑩), das mit gängiger Abspielsoftware (zum Beispiel dem Mediaplayer von Microsoft) betrachtet werden kann. Der Vorteil des Formates „\*.amo“ besteht darin, dass die Einstellungen später beliebig geändert und die Schallkarten neu berechnet werden können. Diese Möglichkeit besteht bei den Filmen im „\*.avi“ Format nicht mehr.

Abbildung 74 zeigt die Grundeinstellungen (① „Dataview Properties“), die zur Berechnung der akustischen 2D Filme verwendet werden. Die Integrationsbreite (② „Width“) zur Berechnung der einzelnen Schallpegel der Schallkarte wird auf 125 ms festgelegt, in Anlehnung an die Zeitbewertung „F (Fast)“ bei Schallpegelmessgeräten [21]. In Verbindung mit einer Überlappung (③ „Overlap“) von drei Bildern besitzen die Schallkarten der erzeugten akustischen 2D Filme eine hohe Dynamik bei gleichzeitig fließenden Übergängen zwischen verschiedenen Schallereignissen. Die weiteren Einstel-



lungen zur Berechnung der akustischen 2D Filme sind in Abbildung 75 zu sehen, wobei der Wert für den Fokus aus den Aufnahmeeinstellungen (vgl. Abbildung 66) automatisch übernommen wird und an dieser Stelle gegebenenfalls noch korrigiert werden kann.

Abbildung 76 zeigt einen akustischen 2D Film während der Berechnung. Die Eingangsschwelle („Threshold“ ② in Abbildung 76) wird auf 75 dB eingestellt, so dass nur einzelne, laute Schallereignisse angezeigt werden und Hintergrundgeräusche zumeist ausgeblendet werden. Auf diese Weise zeigt der akustische 2D Film ausschließlich die lautesten Schallquellen und ermöglicht so deren Lokalisierung, sofern sie im Blickfeld der Videokamera liegen. Die Weite der Farbskala wird auf 1,0 dB ③ limitiert. Somit werden, ausgehend vom lautesten Punkt der Schallkarte, nur jene Bereiche in der Schallkarte farbig dargestellt, deren Schallpegel um maximal 1,0 dB niedriger ist, wodurch das Zentrum der Emission zumeist eindeutig identifiziert werden kann.

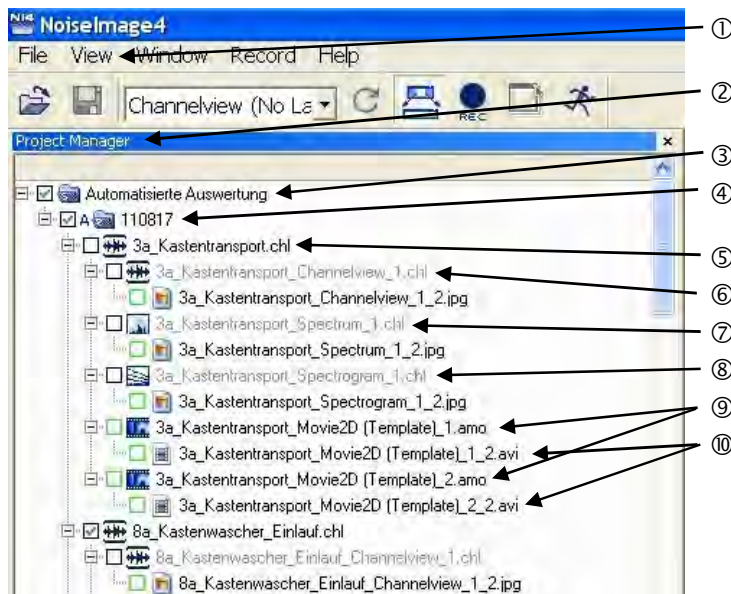


Abbildung 73: „Project Manager“ mit abgeschlossenen und offenen Projekten

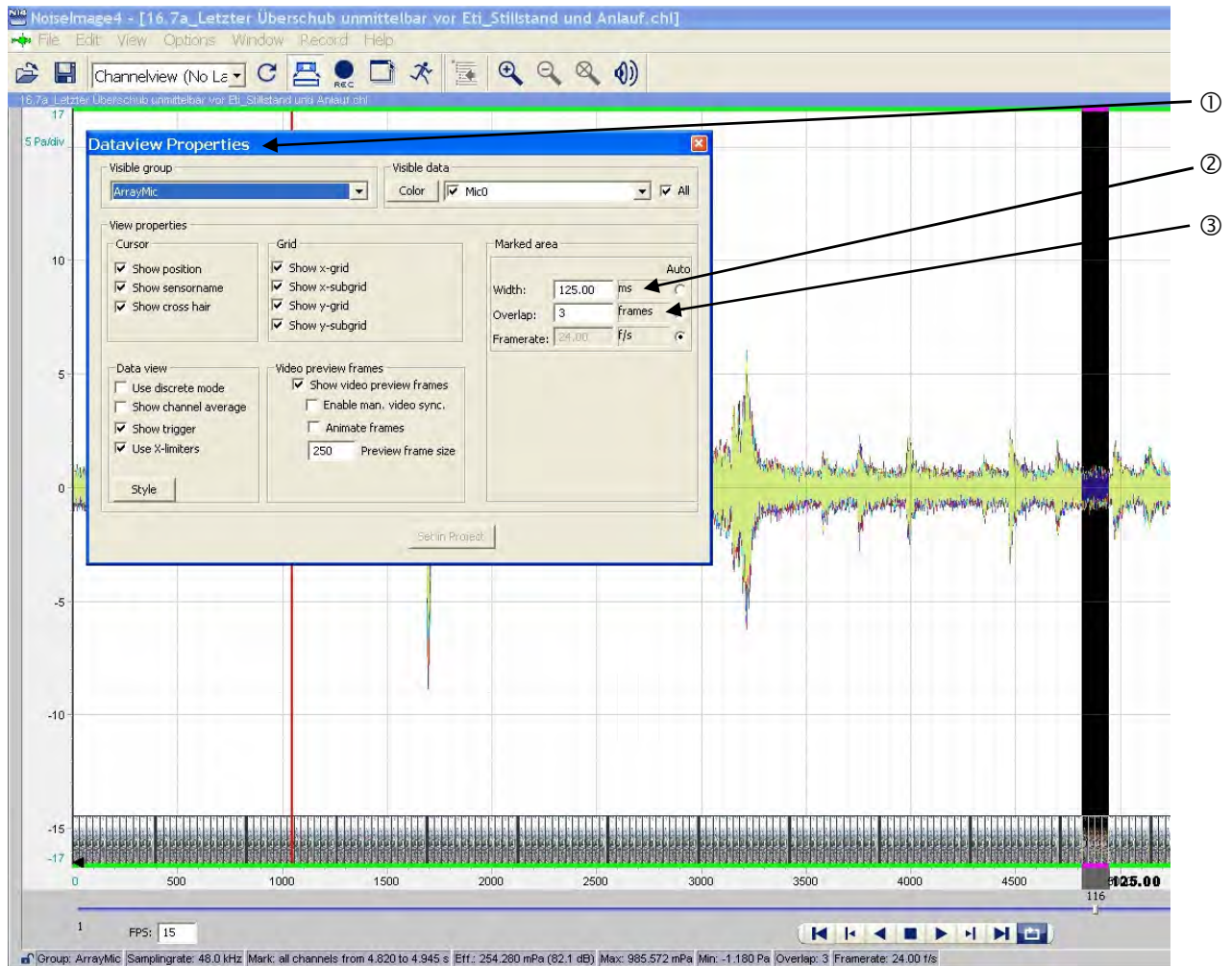


Abbildung 74: Einstellung für die akustischen 2D Filme – „Dataview Properties“

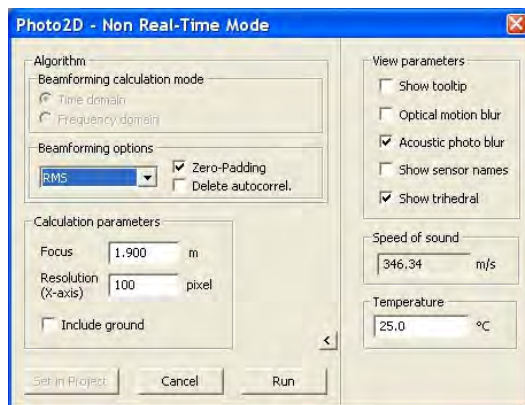


Abbildung 75: Einstellung für die akustischen 2D Filme – „Photo2D – Non Real-Time Mode“

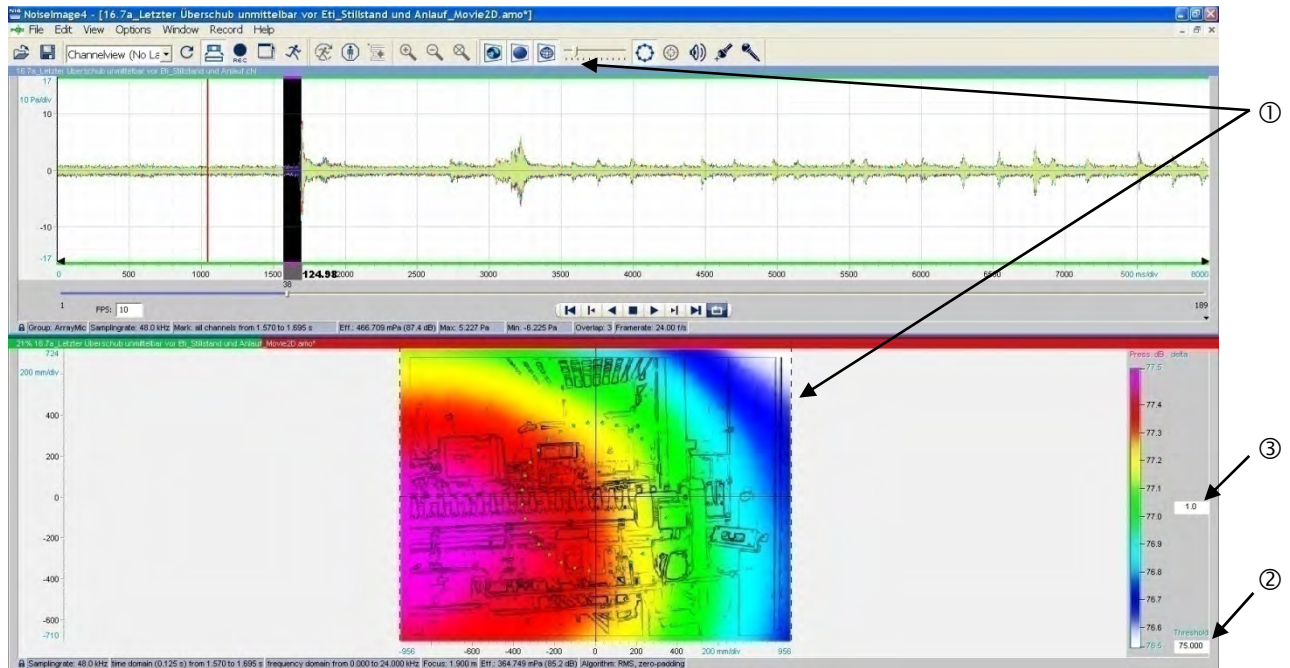


Abbildung 76: Berechnung eines akustischen 2D Films über die Funktion „Movie2D (Template)“

### 5.2.5.7 Auswertung – Bewertung der erzeugten Filme und Bilder

Ziel des Messverfahrens ist es, die ortsgenaue Lokalisierung von Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen zu ermöglichen. Des Weiteren soll das Messverfahren die Darstellung und Aufzeichnung der Bewegungen von Emissionsquellen auf den Behältertransporteuren und deren zeitlichen Schallpegeländerungen erlauben.

Hierfür stehen nach Abschluss der automatisierten Verarbeitung die Filme und Bilder im Projektordner der „Session“ und des entsprechenden „Projects“ für zur Verfügung. Die visuelle Bewertung soll anhand zweier repräsentativer Beispiele erläutert werden.

Das erste Beispiel in Abbildung 77 zeigt Schnappschüsse aus Filmen, die mittels der Automatisierten Verarbeitung erstellt wurden. Das linke Bild entstammt dem unbearbeiteten Videobild, das rechte Bild zeigt das Objekt mit aktivierter Konturerkennung. In den Aufnahmen können der untersuchten Maschine, anhand der farblichen Markierungen, zwei Emissionsquellen zugeordnet werden. Die lautere Quelle (80,8 dB) scheint der Lüfter auf dem Maschinengehäuse zu sein, während die zweite, etwas leisere Emission (80,7 dB) anscheinend vom Antrieb ausgeht.

⇒ Die ortsgenaue Lokalisierung von Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen ist mit dem entwickelten Messverfahren möglich.

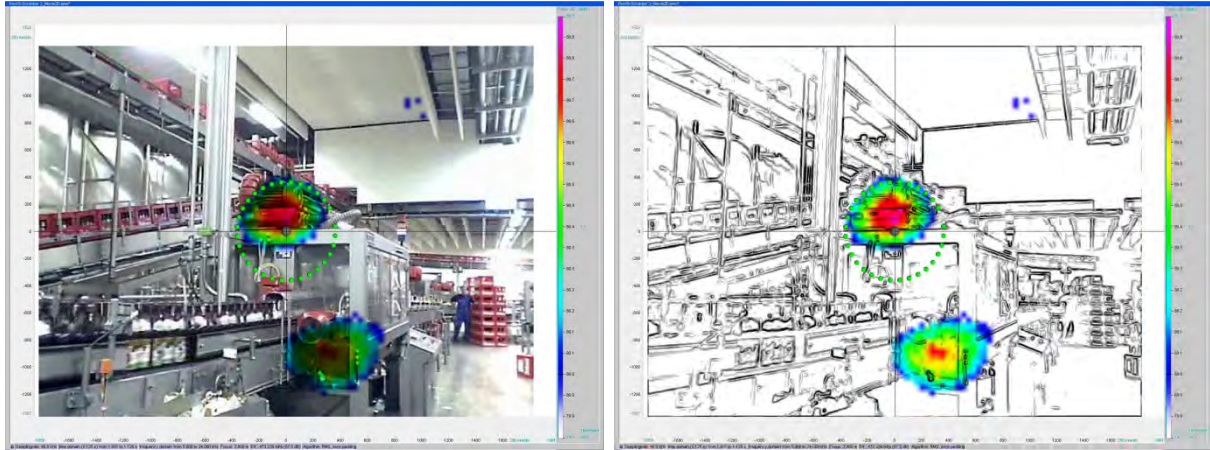


Abbildung 77: Schnappschüsse aus Filmen der automatisierten Verarbeitung (links Videobild, rechts Konturerkennung) über den Integrationszeitraum 1,001 s bis 1,126 s

Weitere Informationen über diese Emissionsquellen können der Kanaldatenansicht (Abbildung 78), dem Spektrum (Abbildung 79) und dem Spektrogramm (Abbildung 80) entnommen werden.

Aus den Kanaldaten geht hervor, dass im Integrationszeitraum 1,001 s bis 1,126 s (Integrationsbreite 125 ms), der den Schnappschüssen in Abbildung 77 zugrunde liegt, kein außergewöhnliches Schalleignis aufgetreten ist (① in Abbildung 78). Wie auch während der gesamten Aufnahmedauer, mit Ausnahme von ② nach etwa 4,1 s, kein signifikanter Amplitudenschlag zu erkennen ist. Es wird somit davon ausgegangen, dass es sich um annähernd konstante, stationäre Emissionsquellen handelt.

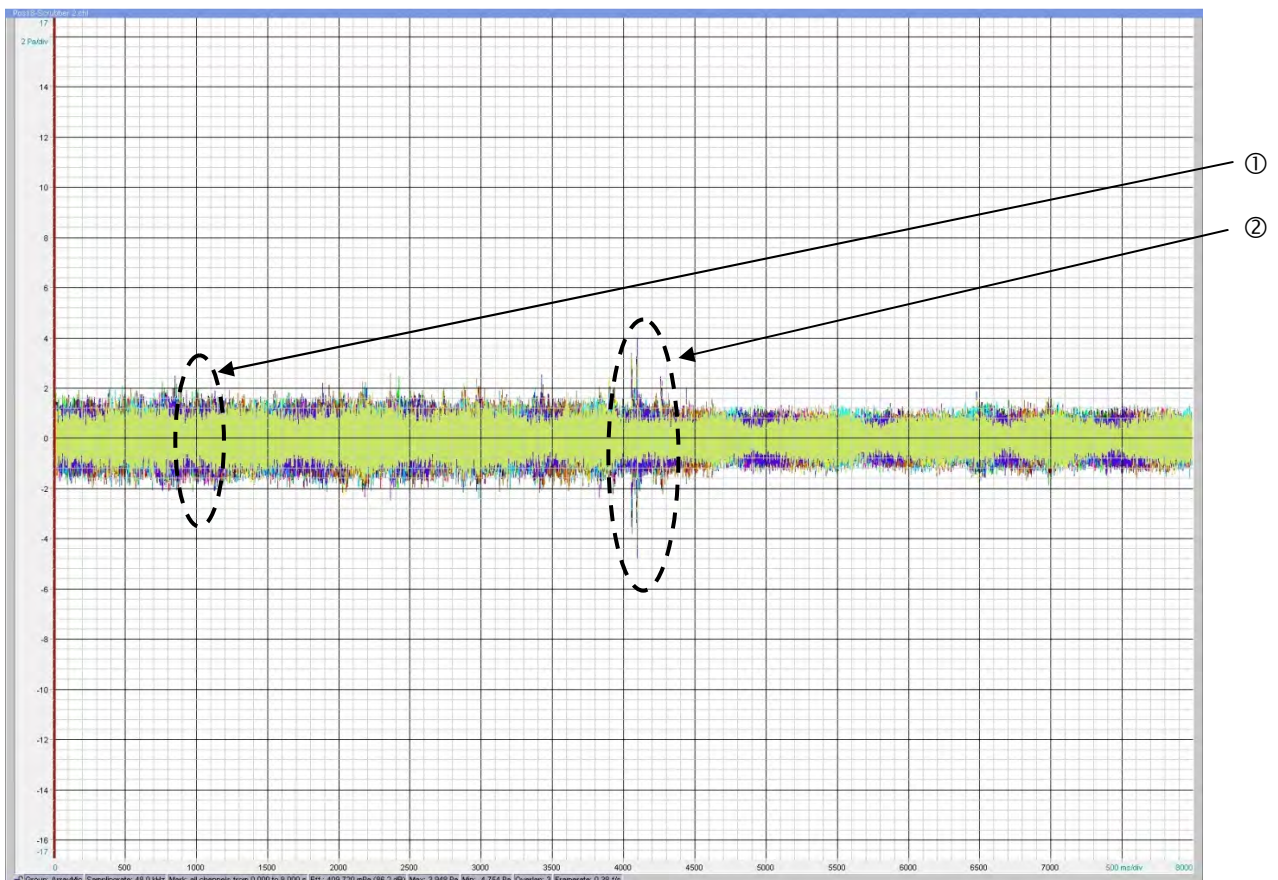


Abbildung 78: Kanaldatenansicht zur untersuchten Maschine in Abbildung 77 (x-Achse: Zeit in ms; y-Achse: Schallpegel in Pa)

Auf eine Besonderheit einer oder gegebenenfalls beider Quellen weisen jedoch das Spektrum und das Spektrogramm hin. Im Spektrum fällt vor allem der Peak bei ca. 2.050 Hz ins Auge (① in Abbildung 79), der die beiden anderen signifikanten Peaks bei 4.100 Hz ② und 6.000 Hz ③ mehrfach übertragt. Dieser Peak bei 2.050 Hz hebt sich auch im Spektrogramm (③ in Abbildung 80), mit einem Spitzenschallpegel von 86,4 dB, deutlich ab. Da der Schallpegel über die gesamte Messdauer von acht Sekunden nahezu konstant bleibt, gilt weiterhin die Vermutung, dass es sich um eine konstante, stationäre Emissionsquellen handelt.

Der 4.100 Hz Peak im Spektrum ist ebenfalls im Spektrogramm (② in Abbildung 80) sichtbar, lässt in seiner Intensität jedoch nach etwa 4,5 Sekunden nach. Parallel dazu verläuft im Spektrogramm eine Linie bei ca. 5.000 Hz, die ebenfalls nach etwa 4,5 Sekunden nachlässt. Der 6.000 Hz Peak (① in Abbildung 80) im Spektrum ist hingegen im Spektrogramm kaum wahrnehmbar.

⇒ Über die Lokalisierung von Schallquellen hinaus, liefert das entwickelte Messverfahren weitere Informationen zu den Schallquellen, die gegebenenfalls für eine weiterführende Analyse der Emittenten genutzt werden können (siehe Folgeabschnitt „Weiterführende beziehungsweise ergänzende Analysen“).



Abbildung 79: Spektrum der untersuchten Maschine in Abbildung 77 (x-Achse: Frequenz in Hz; y-Achse: Schallpegel in mPa)

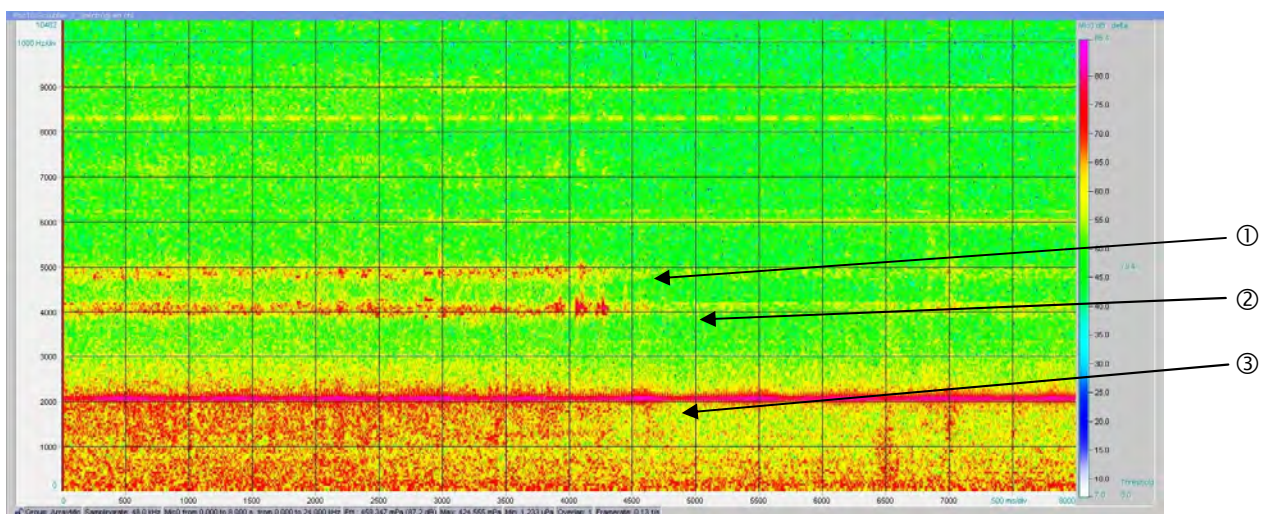


Abbildung 80: Spektrogramm der untersuchten Maschine in Abbildung 77 (x-Achse: Zeit in ms; y-Achse: Frequenz in Hz)

Das zweite Beispiel (Abbildung 81) zeigt ebenfalls Schnappschüsse die mittels der automatisierten Verarbeitung erstellt wurden. Anstelle eines statischen Aggregats wurde bei dieser Aufnahme jedoch eine Flaschenzusammenführung als Objekt gewählt. Die Aufnahmen zeigen, wie sich einzelne Schallquellen, in diesem Fall ein Bündel zusammenstoßender Flaschen, mit den Transporteuren bewegen (Schnappschüsse ① bis ④, die Quelle bewegt sich innerhalb von 0,375 s von rechts bis zum linken Bildrand). Darüber hinaus werden auch einzelne Zusammenstöße visualisiert (Schnappschüsse ⑤ bis ⑨), die punktuell in dem sich bewegenden Flaschenstrom auftreten. Die Schallpegeländerung durch die Flaschenkollisionen wird über die veränderliche Skalierung der Schallpegelfarbskala dokumentiert.

⇒ Das entwickelte Messverfahren ermöglicht die Aufzeichnung beweglicher Emissionsquellen auf Behältertransporteuren. Die Darstellung im Film erlaubt auch bei beweglichen Quellen deren Lokalisierung und die Dokumentation der zeitlichen Schallpegeländerungen.

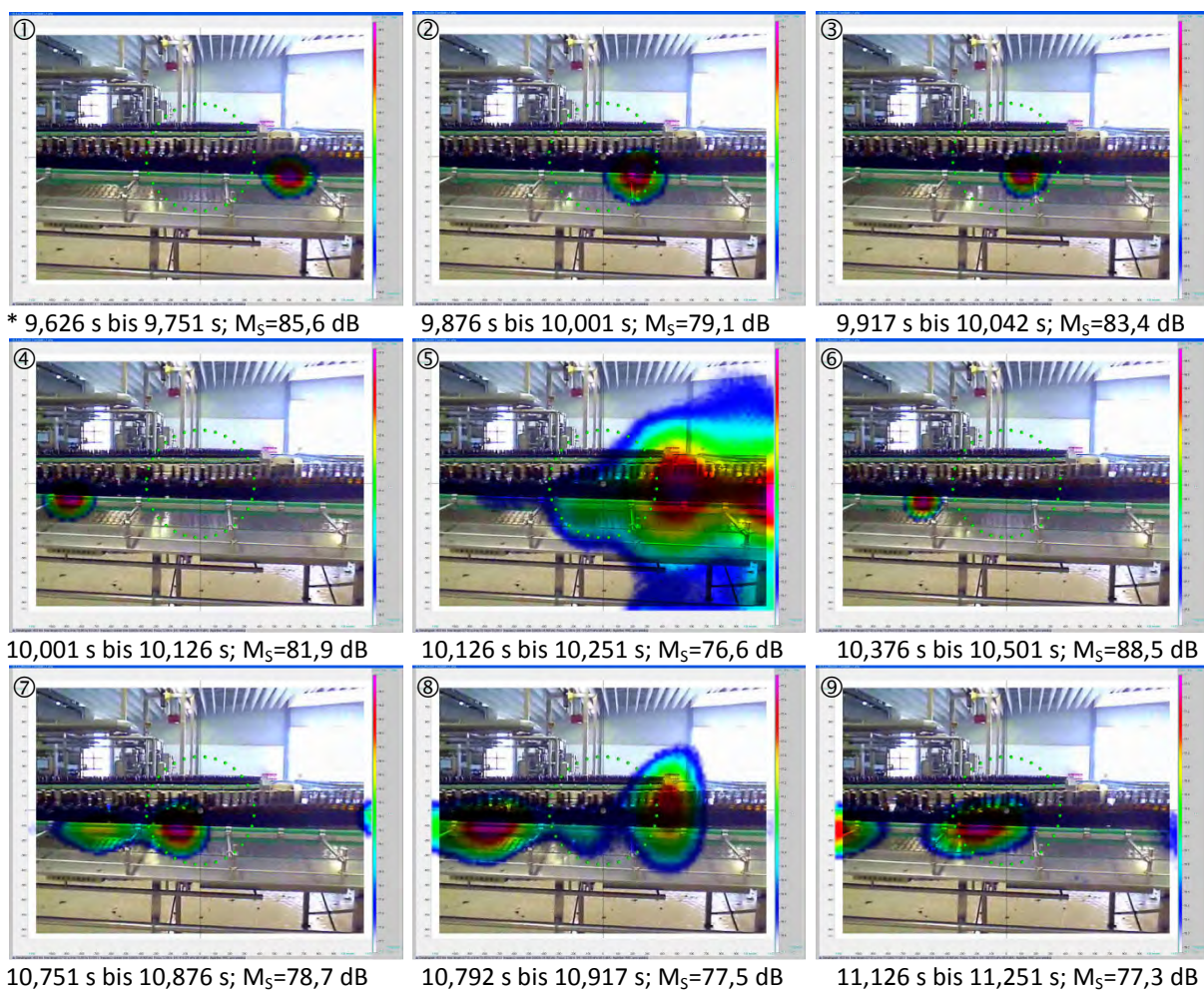


Abbildung 81: Schnappschüsse einer Flaschenzusammenführung aus Filmen der Automatisierten Verarbeitung (\* Integrationszeiträume)

Soll eine Abfüllanlage mit sämtlichen in Tabelle 1 genannten, möglichen Emissionsquellen untersucht werden, so ist mit einem Zeitbedarf für die Messungen von rund drei Arbeitstagen zu rechnen. Weitere drei Tage sind für die automatisierte Verarbeitung mittels „Project Manager“ zu veranschlagen.

### 5.2.5.8 Weiterführende beziehungsweise ergänzende Analysen

Wie bei dem oben aufgeführten, ersten Beispiel bereits erwähnt wurde, können die Informationen aus der automatisierten Verarbeitung Basis für eine weiterführende Analyse der Emittenten sein. Auch wenn diese Untersuchungen nicht Bestandteil des entwickelten Messverfahrens sind, soll eine der möglichen Vorgehensweisen an einem konkreten Beispiel veranschaulicht werden. Eine allgemeingültige Vorgehensweise kann für diese ergänzenden Untersuchungen nicht festgelegt werden, da die weiteren Schritte wesentlich von dem jeweiligen Objekt bedingt werden. Grundsätzlich können alle im Noiselmage Handbuch [11] beschriebenen Verfahren zur Anwendung kommen.

Auf Basis der im ersten Beispiel genannten Beobachtungen wurden die beiden Bauteile der Maschine sowie die entsprechenden Bauteile einer baugleichen, spiegelverkehrt installierten Maschine aus verschiedenen Blickwinkeln erneut mit der Akustischen Kamera aufgenommen. Einzelne Peaks in den Spektren der neuen Detailaufnahmen wurden anschließend markiert und mit der Funktion „SpectralPhoto 2D (Template)“ untersucht. Beispielhaft sind in Abbildung 82 und Abbildung 83 jeweils zwei Frequenzbereiche dargestellt. Als dominante Emissionsquelle wurde bei beiden Maschinen das Gehäuse der Verdichterschaufeln identifiziert („2“: 88,3 dB bei ca. 2.080 Hz). Der Peak bei ca. 6.240 Hz, der durch das Ansaugen der Luft an der Spitze des Schalldämpfers entsteht, ist mit 61,5 dB jedoch signifikant leiser als die Schallquelle bei ca. 2.080 Hz.

Sollte im Arbeitsbereich dieser beiden Aggregate der durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung [49] festgelegte obere Auslösewert  $LEX,8h = 85 \text{ dB(A)}$  überschritten werden, könnte durch die Abschirmung oder Verkleidung (sekundäre Lärmschutzmaßnahme) des Verdichters die lauteste Emissionsquelle gezielt abgeschirmt werden, um den gesetzlich geforderten Grenzwert einzuhalten. Alternativ könnten als primäre Lärmschutzmaßnahme leisere Verdichter eingesetzt werden, die gegebenenfalls ohne sekundären Lärmschutz den Anforderungen genügen.

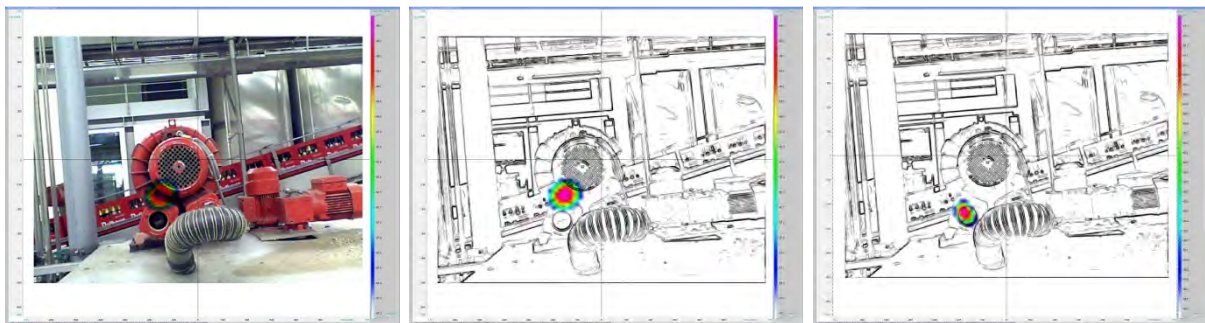


Abbildung 82: Maschine „2“ im Frequenzbereich 2.072 Hz bis 2.094 Hz (links Videobild, Mitte Konturerkennung) und 6.236 Hz bis 6.240 Hz (rechts Konturerkennung)

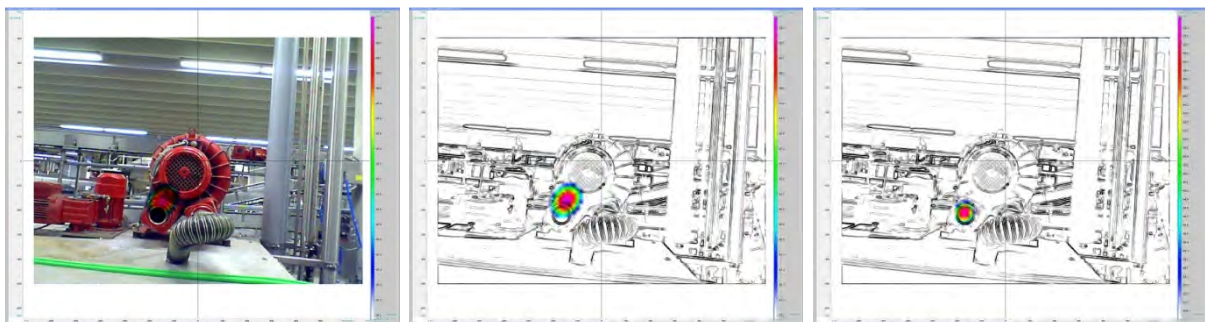


Abbildung 83: Maschine „1“ im Frequenzbereich 2.058 Hz bis 2.105 Hz (links Videobild, Mitte Konturerkennung) und 6.203 Hz bis 6.279 Hz (rechts Konturerkennung)

## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Das entwickelte Verfahren auf Basis der Akustischen Kamera ermöglicht sowohl die Lokalisierung und Bewertung von Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie als auch das Aufzeichnen und Auswerten von beweglichen Emissionsquellen auf Behältertransporteuren.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

## **5.3 Arbeitsschritt 3: Maßnahmen zur Lärmreduzierung**

### **5.3.1 AS 3.1: Umbau und Inbetriebnahme der Technikumsanlage**

#### **Zielstellung**

In diesem AS soll die Pufferkapazität des Flaschenspeichertisches erweitert und die Anlagenkonstellation angepasst werden, um die Arbeitsschritte AS 3.5 bis AS 3.7 wie geplant durchführen zu können.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 2,50 MM; Forschungsstelle 1 – 0,15 MM (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 1 und 2). Der Umbau des Rundläufers verzögerte sich auf Grund einer längeren Planungs- und Genehmigungsphase. Außerdem verlängerte sich die Umbauphase, da ein hoher Eigenanteil bei den Umbaumaßnahmen nötig war. Dies führte zu einer Verzögerung von 1,00 MM bei Forschungsstelle 2. Auf Grund der Verzögerung wurden die Arbeitsschritte AS 3.3 und AS 3.4 vorgezogen. Der Umbau konnte am 23.12.2010 abgeschlossen werden.

#### **Ergebnisse**

Um den Versuchsrundläufer für die Arbeitspaketen AS 3.5 bis AS 3.7 nutzen zu können wurde dieser umgebaut. Dabei wurden vor allem die Transporteure in den rot markierten Bereichen (siehe Abbildung 84) durch neue Komponenten ersetzt. Der mit ① markierte Bereich wurde durch einen kurvengängigen Transporteur ersetzt, mit Hilfe dessen der Behälterabfluss besser gestaltet werden kann. Der mit ② markierte Bereich wurde durch einen breiteren Transporteur ersetzt, durch den mehr Behälter zwischengespeichert werden können. Die Versuchstrecke kann dadurch mit einem variablen Füllungsgrad betrieben werden. Über diese Erweiterungen hinaus wurde die Geländerführung im Bereich der Versuchstrecke angepasst.

Funktionsweise, Steuerung und der Anlagenplan nach dem Umbau (siehe Abbildung 15) sind im Kapitel Material und Methoden in Abschnitt 4.6 (Seite 19ff) erläutert.



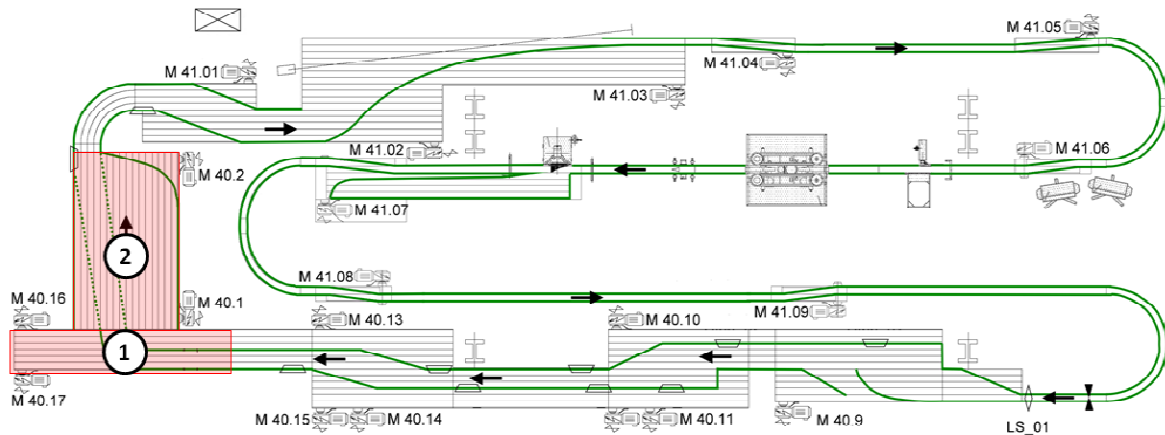


Abbildung 84: CAD-Plan des Versuchsrundläufers vor dem Umbau. Die geänderten Anlagenteile sind rot markiert.

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die angestrebte Erweiterung der Pufferkapazität und die besser Nutzbarkeit für die in den Arbeitsschritten AS 3.5 bis AS 3.7 geplanten Arbeiten konnte erreicht werden.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### 5.3.2 AS 3.2: Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke

#### Zielstellung

In diesem Arbeitsschritt sollen die lärmtechnischen Eigenschaften verschiedener, am Markt erhältlicher Behälter für Getränke getestet werden. Die aufgezeichneten Ergebnisse der Schallmessungen sollen den Industriepartnern im Katalog „Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke“ zur Verfügung gestellt werden.

#### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 1,50 MM; Forschungsstelle 1 – 0,50 MM (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 1 und 2).

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### Ergebnisse

Wie bereits in Abschnitt 5.1.2 erläutert, spielen die Behältertransporteure eine große Rolle bei der Lärmmentstehung im Flaschenkeller. Sie tragen sowohl durch ihre, durch den Betrieb verursachten Lärmabstrahlungen (Leerlaufgeräusche), als auch durch die transportierten Behälter im erheblichen Maße zum Lärmpegel der Abfüllanlage bei [14]. Insbesondere der durch Behälterstöße verursachte Lärm soll bei der Auslegung der Regelung berücksichtigt werden. Wie in Abbildung 85 zu sehen ist, hängt diese Schallabstrahlung im besonderen Maße von der Aufprallgeschwindigkeit der Behälter ab.

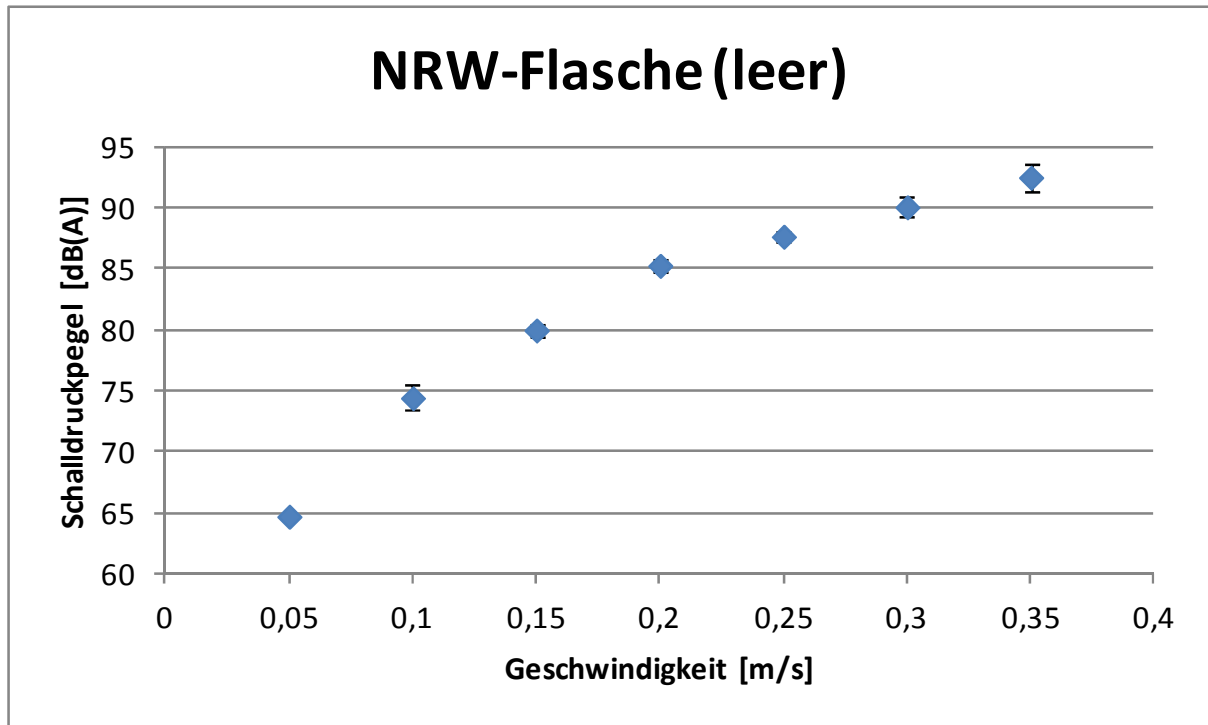


Abbildung 85: Das Diagramm stellt die Schallemissionen von NRW-Flaschen dar, die bei den aufgeführten Geschwindigkeiten auf ein stehendes Ende eines Flaschenpulkts prallen. Die Schalldruckpegel wurden in einem Meter Entfernung vom Aufprallpunkt in der Messgeräteinstellung Fast aufgenommen (vgl. Abschnitt 4.7). ( $n = 5$ ,  $\alpha = 0,05$ )

Daher soll die Regelung nur mit der für den Betrieb der Anlage notwendigen Geschwindigkeit arbeiten. Zu hohe Geschwindigkeitsdifferenzen, wie sie bei heutigen Stauschalterregelungen insbesondere nach Störungen vorkommen, müssen im Sinne einer Lärmreduzierung vermieden werden.

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Arbeitspakets gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Umsetzung des in Abschnitt 5.3.3 und 5.3.5 beschriebenen Algorithmus zur stufenlosen Regelung von Behältertransporten. Weitere Ergebnisse aus diesem Arbeitsschritt finden sich im Anhang, Abschnitt 10.7 im „Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke“. Dieser dient als Ergänzung der bereits durch Probst durchgeführten Versuchen [29], [31].

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### 5.3.3 AS 3.3: Technische Maßnahmen – Primäre Lärmschutzmaßnahmen

#### Zielstellung

Dieser Arbeitsschritt dient der Untersuchung technischer Möglichkeiten zu primären Lärmvermeidung.

#### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 2,00 MM; Forschungsstelle 1 – 1,00 MM (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 1 und 2).

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

## Ergebnisse

### 5.3.3.1 Algorithmus zur lärmarmen Regelung von Behältertransporteuren

Zur Umsetzung von primären Schallschutzmaßnahmen wurde der in der Folge beschriebene Algorithmus zur lärmarmen Regelung von Behältertransporteuren entwickelt. Der Algorithmus ist für den Anti-Starve- (dem Zentralaggregat vorgeschaltete Puffer) und den Anti-Block-Puffer (dem Zentralaggregat nachgeschaltete Puffer) getrennt beschrieben.

#### 5.3.3.1.1 Anforderungen für einen Anti-Starve-Puffer

Bei einem Anti-Starve-Puffer (AS) können die vorgeschaltete Maschine und die Transportbänder geregelt werden. Die nachgeschaltete Maschine wird als Master betrachtet und gibt die Ausbringung des Systems vor (siehe Abbildung 86). Primäres Ziel ist es den Master möglichst kontinuierlich mit Behältern zu versorgen und so einen Stillstand zu vermeiden. Bezogen auf die drei oben beschriebenen Betriebszustände bedeutet dies, dass folgendermaßen vorgegangen wird:

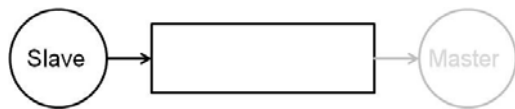


Abbildung 86: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Starve-Puffer. Der nicht regelbare Master ist ausgegraut.

- AS I Kontinuierlicher Betrieb:** Im kontinuierlichen Betrieb muss die Sollfüllung gehalten oder angefahren werden. Dazu muss die aktuelle Füllung erfasst werden und mit der Sollfüllung abgeglichen werden. Ist die Sollfüllung überschritten, muss die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine gedrosselt werden. Ist die Sollfüllung unterschritten, muss die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht werden. Die Geschwindigkeit der Transportbänder muss dabei den Maschinenausbringungen angepasst werden. Dabei müssen zum Einen die in Abschnitt 5.3.5 aufgeführten Bedingungen zum Betrieb des Transporteurs eingehalten werden, zum Anderen muss die Geschwindigkeitsabstufung so gewählt werden, dass sie möglichst gering zwischen den einzelnen Transportbandabschnitten ausfällt. So können hohe Differenzgeschwindigkeiten vermieden und die Lärmemissionen durch kollidierende Flaschen reduziert werden.
- AS II Stillstand der nachgeschalteten Maschine:** Bei einem Stillstand der nachgeschalteten Maschine arbeitet die vorgeschaltete Maschine weiter und regelt der Pufferfüllung entsprechend langsam bis zum Stillstand herunter. Auch hier wird die Transportbandgeschwindigkeit den Maschinenausbringungen angepasst. Die komplett gefüllten Transportbandabschnitte können außerdem abgeschaltet werden, da die nachgeschaltete Maschine nicht mit Flaschen versorgt werden muss. Dies führt zu einer Schonung der Behälter, da kein unnötiger Staudruck aufgebaut wird und zu einer Schonung der Anlage, da die Motoren stehen und die Ketten nicht unter dem stehenden Flaschenpulk durchgeschliffen werden. Des Weiteren werden auf diese Weise die Lärmemissionen reduziert. Es treten keine Leerlaufgeräusche durch die Antriebe, Kettenführungen und weitere Anbauteile auf. Die Gefahr weiterer Lärmemissionen, die durch das Verspringen der im Pulk geführten Flaschen entstehen können, wird reduziert.
- AS III Stillstand der vorgeschalteten Maschine:** Bei einem Stillstand der vorgeschalteten Maschine kommt es zu Lücken im Behälterstrom. Außerdem wird die Sollfüllung unterschritten. Steht die vorgeschaltete Maschine länger als die Pufferzeit, muss auch die nachgeschaltete Ma-

maschine angehalten werden. Bis zu diesem Zeitpunkt wird sie aber mit Sollausbringung weiter betrieben, um das Zentralaggregat möglichst lange mit Behältern zu versorgen. Die Sollausbringung entspricht am Zentralaggregat der Einstellausbringung, bei den übrigen Maschinen der durch die nachfolgende Transporteurregelung vorgegebenen Sollausbringung. Die Abschaltung beziehungsweise der Entzug der Freigabe ist das einzige Signal, das die jeweilige Transporteurregelung an den Master übermitteln kann.

Die Geschwindigkeit der Transportbänder wird auf das, zur Versorgung der nachgeschalteten Maschine, notwendige Minimum  $v_{\text{Band}}$  reduziert. Dies ist möglich, weil die Bedingung für  $v_{\text{in}}$  nicht mehr erfüllt werden muss (solange die vorgeschaltete Maschine steht). Leere Bandabschnitte werden im Sinne einer Lärmreduzierung (Leerlaufgeräusch), einer Energieeinsparung (Abschaltung von Motoren) und einer Schonung von Ressourcen (zum Beispiel Abschaltung der Bandschmierung) abgeschaltet. Dies führt bei einem komplett leeren Puffer zu einer Abschaltung aller Transportbänder.

Läuft die vorgeschaltete Maschine bei komplett geleertem Puffer wieder an, wird sie auf maximale Ausbringung hochgefahren. Die Bänderabschnitte, auf denen die ersten Flaschen des neuen Behälterstroms ankommen, werden wieder eingeschaltet und mit maximaler Geschwindigkeit betrieben, um so die Puffertotzeit auf ein Minimum zu reduzieren. Kommen die Behälter am Ende des Transporteurs an, wird mit der Regelung für den „Kontinuierlichen Betrieb“ (siehe Fall AS I) weiter verfahren. Die nachgeschaltete Maschine wird wieder eingeschaltet, sobald genügend Behälter am Ende des Transporteurs vorhanden sind.

Läuft die vorgeschaltete Maschine wieder an, bevor der Puffer komplett leergefahren ist, werden die Lücken zugefahren, ohne jedoch erhöhte Lärmpegel durch hohe Differenzgeschwindigkeiten zwischen den Behälterströmen zu verursachen. Verlässt der in Flussrichtung vordere Behälterstrom einen Transporteurabschnitt, auf dem sich der hintere Behälterstrom befindet, werden die Bandgeschwindigkeit und die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht, so dass sich die Länge der Lücke reduziert. Erreicht der hintere Behälterstrom den nächsten Überschub, wird die Geschwindigkeit wieder reduziert, sofern sich der vordere Behälterstrom noch auf diesem befindet. Kompletzt geschlossen werden kann die Lücke erst, wenn der komplette vordere Behälterstrom in den Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen ist. In diesem Fall wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht, sowie die Geschwindigkeit aller Bänderabschnitte, auf denen sich der hintere Behälterstrom befindet. Die hohe Geschwindigkeit wird beibehalten, bis die Lücke fast geschlossen ist. Ist dies der Fall, wird die Geschwindigkeit wieder reduziert, um die Differenzgeschwindigkeit zwischen dem hinteren Flaschenstrom und dem am Ende des Transporteurs befindlichen Flaschenpulk so gering wie möglich zu halten und so die Lärmemission beim Zusammentreffen der beiden Flaschenströme zu reduzieren. Im Anschluss wird wieder mit dem unter AS I beschriebenen „Kontinuierlichen Betrieb“ fortgefahren.

Die genaue Funktion der Regelung wird in Abschnitt 5.3.5 beschrieben. Im Folgenden werden die drei Fälle für den Anti-Starve-Betrieb mit AS I, AS II und AS III bezeichnet.

#### **5.3.3.1.2 Umsetzung der Anforderungen für einen Anti-Block-Puffer**

Bei einem Anti-Block-Puffer (AB) verhält es sich in Bezug auf die Regelbarkeit der Maschine genau umgekehrt. Die nachgeschaltete Maschine und die Transportbänder können geregelt werden. Die vorgeschaltete Maschine wird als Master betrachtet, und gibt die Ausbringung des Systems vor (siehe Abbildung 87). Primäres Ziel ist es die vom Master produzierten Behälter aufzunehmen und so

einen Stillstand an der vorgeschalteten Maschine zu vermeiden. Bezogen auf die drei oben beschriebenen Betriebszustände bedeutet dies, dass bei der Regelung für den Anti-Block-Betrieb folgendermaßen vorgegangen wird:

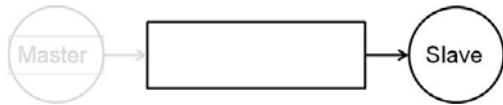


Abbildung 87: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Block-Puffer. Der nicht regelbare Master ist ausgegraut.

- AB I Kontinuierlicher Betrieb:** Der kontinuierlichen Betrieb unterscheidet sich lediglich im Bezug auf die nachzuregelnde Maschine vom Fall AS I für Anti-Starve-Puffer. Ist die Sollfüllung erreicht, wird diese gehalten, indem die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine (Slave) der vorgeschalteten Maschine (Master) angepasst wird. Ist die Sollfüllung überschritten, muss die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine erhöht werden. Ist die Sollfüllung unterschritten, muss die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine reduziert werden. Die Geschwindigkeit der Transportbänder muss den Maschinenausbringungen angepasst werden. Dabei müssen zum Einen die unter 5.3.5 aufgeführten Bedingungen für  $v_{in}$  und  $v_{out}$  eingehalten werden, zum Anderen wird die Geschwindigkeitsabstufung zwischen den einzelnen Transportbandabschnitten so gewählt, dass die Differenz möglichst gering ausfällt. Dies reduziert die durch kollidierende Flaschen verursachten Lärmemissionen.
- AB II Stillstand der nachgeschalteten Maschine:** Bei einem Stillstand der nachgeschalteten Maschine arbeitet die vorgeschaltete Maschine weiter. Auf ein Herunterregeln der Ausbringung, wie unter AS II beschrieben, wird beim Anti-Block-Betrieb verzichtet, weil es aus Effizienzgründen das Ziel sein muss, den Master möglichst lange mit der vorgegebenen Ausbringung zu betreiben. Durch dieses Vorgehen muss unter Umständen eine höhere Lärmemission in Kauf genommen werden, da bei zunehmender Füllung der Transporteurabschnitte weniger Überschübe zur Reduzierung der Geschwindigkeiten der Behälter zur Verfügung stehen. Die Transportbandgeschwindigkeiten werden wie bereits mehrfach beschrieben den Maschinenleistungen angepasst. Die hinteren Transportbandabschnitte werden abgeschaltet, sobald sie komplett gefüllt sind. Dies führt zu den bei den Anti-Starve-Puffern bereits beschriebenen positiven Effekten. Eine Abschaltung des Masters erfolgt erst, wenn eine kritische Füllung, die der Kapazität des Puffers entspricht, erreicht ist. Die Abschaltung, beziehungsweise der Entzug der Freigabe, ist das einzige Signal, das die Regelung für den Anti-Block-Betrieb an den Master übermitteln kann.
- AB III Stillstand der vorgeschalteten Maschine:** Hat die vorgeschaltete Maschine einen Stillstand, kommt es ebenfalls zu Lücken im Behälterstrom und die Sollfüllung des Puffers wird unterschritten. Die nachgeschaltete Maschine beginnt in diesem Fall herunter zu regeln. Dies hat den positiven Effekt, dass durch die Reduzierung der Geschwindigkeiten der Bänder die durch die zusammenstoßenden Behälter verursachten Lärmemissionen reduziert werden. Leere Abschnitte des Transporteurs werden abgeschaltet, um auch dadurch die Lärmemissionen zu reduzieren und den Energieverbrauch durch die Motoren zu senken. Die Ausbringung der nachfolgenden Maschine wird der Füllung des Transporteurs entsprechen herunter geregelt. Dies erfolgt bis zu einem Minimalwert, mit dem sie bis zur vollständigen Leerung des Transporteurs weiterarbeitet. Ist dieser Zustand erreicht, werden alle Transportbänder abgeschaltet.

Läuft die vorgeschaltete Maschine bei komplett geleertem Puffer wieder an, läuft sie mit der von der Regelung des vorgeschalteten Transporteurs vorgegebenen Ausbringung oder im Fall des Zentralaggregats mit der Einstellausbringung wieder an. Die Transporteure werden mit der auf die Ausbringung abgestimmten maximalen Geschwindigkeit betrieben, bis die Behälter das Ende des Transporteurs erreichen. Anschließend wird auf den „Kontinuierlichen Betrieb“, Fall AB I, umgeschaltete und der Sollfüllungsgrad wieder angefahren.

Läuft die vorgeschaltete Maschine wieder an, bevor der Puffer komplett leergefahren ist, werden die Lücken je nach Konstellation der Anlage zugefahren. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die vorgeschaltete Maschine (Master) nicht nachgeregelt werden kann. Das heißt die Geschwindigkeit des Einlaufbandes  $v_{in}$  kann nur soweit erhöht werden, dass keine Lücken in den Behälterstrom gefahren werden. Somit ist das oben beschriebene Verfahren AS III zum Schließen von Lücken nur begrenzt oder aber gar nicht bei Anti-Block-Puffern anwendbar. Es wurde jedoch trotzdem auch für den Anti-Block-Puffer umgesetzt, um es je nach Anlagenkonstellation anwenden zu können. Es hat den Vorteil, dass die nachgeschaltete Maschine besser mit Flaschen versorgt werden kann und somit ein gleichmäßigerer Lauf ermöglicht wird. Durch die entsprechende Wahl der Parameter kann die Aufholregelung jedoch komplett unterdrückt werden.

Die genaue Funktion der Regelung wird in Abschnitt 5.3.5 beschrieben. Im Folgenden werden die drei Fälle für den Anti-Block-Betrieb mit AB I, AB II und AB III bezeichnet.

### **5.3.3.2 Einfluss des Aufprallwinkels auf die Schallemission von Flaschen**

Am Übergang von Abschnitt 0 auf Abschnitt 1 der Flaschentransportstrecke (siehe Abbildung 15 auf Seite 20) wurde der Einfluss des Aufprallwinkels von Getränkeflaschen auf die dadurch verursachte Schallemission untersucht. Die Aufprallwinkel betragen zwischen  $34,5^\circ$  und  $19,9^\circ$ . Bei dieser Untersuchung konnte kein signifikanter Einfluss des Aufprallwinkels auf die Schallemission festgestellt werden, weder auf die Maximalwerte der Schallkarten, noch auf die Effektivwerte über die gesamte Messdauer von acht Sekunden.

Die Ergebnisse im Einzelnen sind im Anhang, Abschnitt 10.8 ab Seite 168ff, im „Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen“ aufgeführt.

### **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Mit dem oben beschriebenen Algorithmus zur stufenlosen Regelung von Behältertransporteuren und der Untersuchung des Aufprallwinkels, wurden zwei Maßnahmen zum primären Lärmschutz entwickelt beziehungsweise untersucht. Der Algorithmus dient dabei der Reduzierung der Schallabstrahlung von Behältertransporteuren und damit der Reduzierung einer der Hauptlärmquellen im Flaschenkeller. Die Umsetzung und genaue Funktion des Algorithmus wurde in AS 3.5 erarbeitet und wird in Abschnitt 5.3.5 den Projektpartnern in Form eines Leitfadens zur Verfügung gestellt.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.3.4 AS 3.4: Technische Maßnahmen – Sekundäre Lärmschutzmaßnahmen; Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen**

#### **Zielstellung**

Aus der Literatur bekannte, aber auch in Arbeitsschritt AS 2.3 untersuchte sekundäre Lärmschutzmaßnahmen (zum Beispiel Einhausungen, Abschirmung, Dämmung) sollen an der Versuchsförderstrecke nachgebildet und deren Lärmschutzeigenschaften untersucht werden. Parallel dazu sollen die in Abfüllbetrieben erforderlichen hygienischen Aspekte und die Reinigbarkeit der Maßnahmen bewertet werden. Mit Hilfe der Akustischen Kamera sollen eventuell vorhandene Schwachstellen der jeweiligen Maßnahme ermittelt und gegebenenfalls optimiert werden. Die Ergebnisse sollen als Katalog – Sekundäre Lärmschutzmaßnahmen veröffentlicht werden.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 1,00 MM; Forschungsstelle 1 – 1,00 MM (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 1 und 2). Der Arbeitsschritt hat bei Forschungsstelle 2 1,00 MM weniger in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war. Die in AS 3.1 entstandene Verzögerung konnte vollständig aufgeholt werden.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

##### **Literaturrecherche**

Ein zweiter Ansatz, der neben dem direkten Vorgehen gegen die Schallemittenten (primäre Schallschutzmaßnahmen) sehr häufig zum Einsatz kommt, ist die Verbesserung der Raumakustik (sekundäre Schallschutzmaßnahme). Hierzu werden schalldämpfende oder schallabsorbierende Materialien auf oder vor schallharten Oberflächen angebracht, um die Reflexion des Schalls zu verhindern oder zu reduzieren und so die mehrfache Beaufschlagung des Bedienpersonals durch die gleiche Schallquelle zu verhindern oder zumindest zu verringern. Zur Verbesserung der Raumakustik stehen im Bereich der Getränkeabfüllanlagen insbesondere schallabsorbierende Wandverkleidungen und sogenannte Baffeldecken zur Verfügung. Baffeldecken bestehen aus schallabsorbierenden Paneelen, die unter der Hallendecke installiert werden. Beiden Systemen gemein ist die Tatsache, dass eine schallharte Oberfläche (Hallendecke, Hallenwand) mit einem schallabsorbierenden Bauteil verkleidet wird. Näheres zu diesen sekundären Schallschutzmaßnahmen findet sich bei [30], [32], [33], [34], [35] und [36].

##### **Untersuchungen mit der Akustischen Kamera**

In einem ersten Versuch wurde anhand der Aufnahmen mit der Akustischen Kamera der Einfluss des Schallschutztores einer Flaschenreinigungsmaschine (Abbildung 88), als sekundäre Schallschutzmaßnahme, untersucht. Die Bildfolge in Abbildung 89 zeigt eine Auswahl (jedes fünfte Bild) der in einem Akustischen Film erstellten Schallkarten. In ausnahmslos jedem der Bilder ist die dominante Lärmquelle innerhalb des Flaschenpulk auf dem Zuführtisch zur Flaschenaufgabe. Der in den Schallkarten dargestellte Maximalwert liegt bei 89,1 dB(A). Gleichzeitig wird ein Effektivwert von  $E_s = 97,3$  dB(A) (Algorithmus RMS, Integrationszeit: 125 ms) erreicht.

Nach Schließen des Schallschutztores wurde die Aufnahme wiederholt und erneut ein Akustischer Film erstellt. In der Bildfolge in Abbildung 90 ist nun nicht mehr der Flaschenpulk auf dem Zuführtisch

zur Flaschenaufgabe der lauteste Bereich, da dieser durch das Lärmschutztor gegenüber der Akustischen Kamera, beziehungsweise gegenüber einem Bediener, abgeschirmt ist. Die nun dominante Lärmquelle befindet sich am jeweils rechten Bildrand, beim seitlichen Einlauf der Flaschen zur Flaschenreinigungsmaschine. An dieser Stelle kommt es zum Rückstau der Flaschen und zu Vibrationen von Flaschen im Flaschenpulk, die durch Reibung zwischen den Scharnierbandketten und den Flaschenböden hervorgerufen wird. Der in den Schallkarten dargestellte Maximalwert liegt bei 79,9 dB(A) und ist nach schließen des Tores um ca. 9 dB(A) reduziert worden, was in etwas einer Halbierung der empfundenen Lautstärke entspricht [44]. Gleichzeitig wird der Effektivwert ebenfalls um rund 9 dB(A), auf  $E_s = 88,2$  dB(A) reduziert.

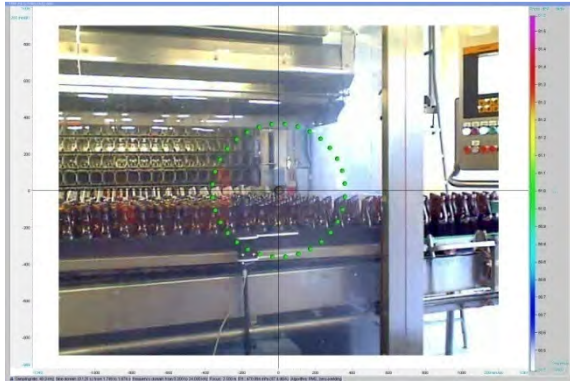


Abbildung 88: Zuführtisch zur Flaschenaufgabe der Flaschenreinigungsmaschine mit geschlossenem Schallschutztor

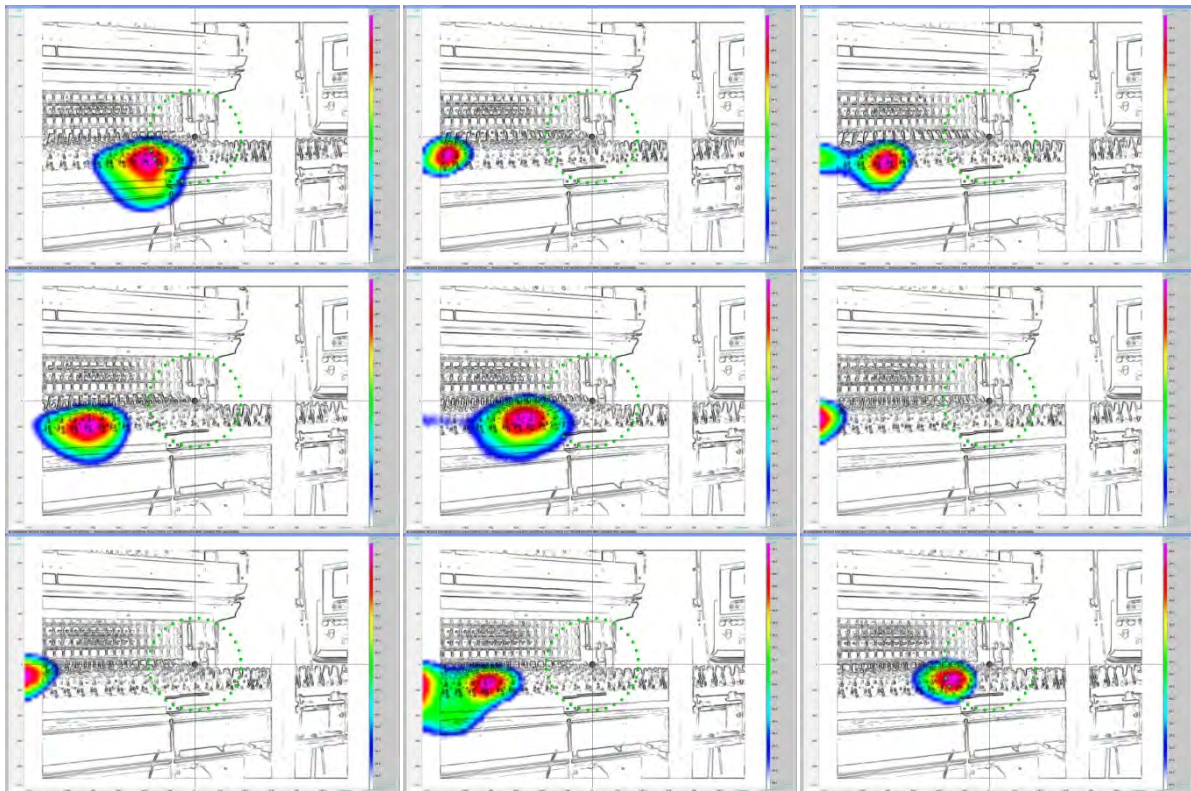


Abbildung 89: Screenshots aus dem Akustischen Film der Flaschenaufgabe mit geöffnetem Schallschutztor (Dauer der Filmsequenz: 1,8 Sekunden, Screenshots alle 0,2 Sekunden) – Hauptlärmquelle: Flaschenpulk auf dem Zuführtisch zur Flaschenaufgabe



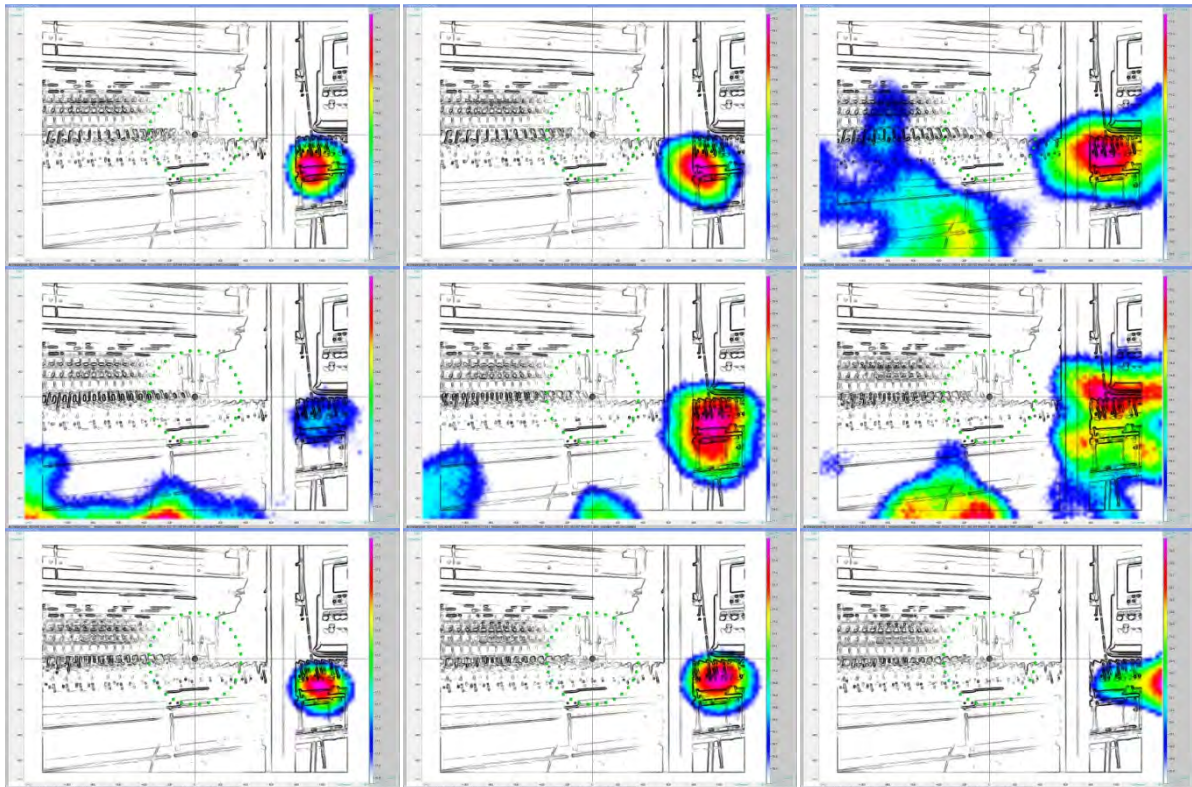


Abbildung 90: Screenshots aus dem Akustischen Film der Flaschenaufgabe mit geschlossenem Schallschutztor (Dauer der Filmsequenz: 1,8 Sekunden, Screenshots alle 0,2 Sekunden) – Hauptlärmquelle: Seitlicher Einlauf der Flaschen zur Flaschenreinigungsmaschine

Ein weiterer Versuch veranschaulicht die Möglichkeiten, mit der Akustischen Kamera die Schwachstellen von sekundären Lärmschutzmaßnahmen zu lokalisieren. Abbildung 91 zeigt die Einhausung einer Sortiermaschine, die gleichzeitig als sekundärer Schallschutz dient. Die Verkleidung ist nach oben offen. Zusätzlich hat sie je eine Öffnung am Ein- (Ellipse) und Auslauf der Kästen sowie einen Spalt zwischen Verkleidung und Boden (Pfeil). Abbildung 92 und Abbildung 93 zeigen die Schallemissionen, die durch die seitliche Öffnung und den Spalt zwischen Verkleidung und Boden beim Einsetzen der Flaschen in die Kästen beziehungsweise den Sortiertisch auf den Bediener einwirken. Diese Bereiche stellen die Schwachstellen der installierten sekundären Lärmschutzmaßnahme dar.



Abbildung 91: Spalt (Pfeil) und Öffnung (Ellipse) in der Schallschutzverkleidung einer Sortieranlage

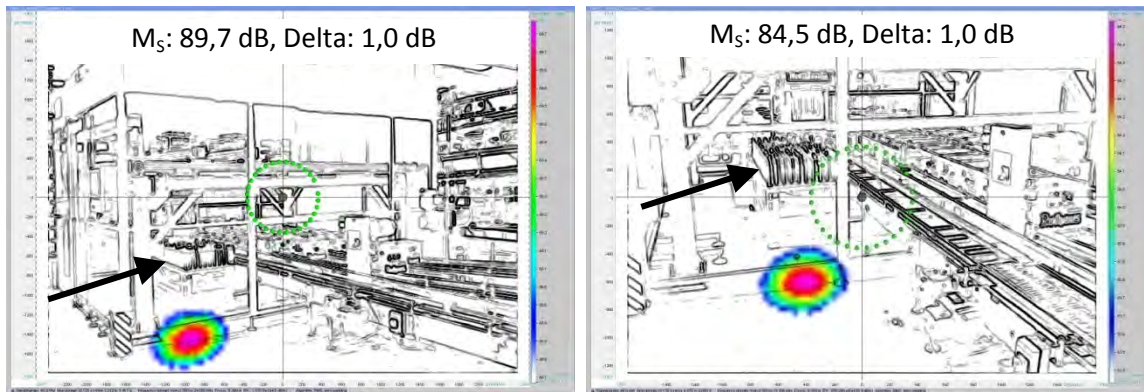


Abbildung 92: Schallemission durch den Spalt, beim Einsetzen der Flaschen in den Sortiertisch (Pfeil)

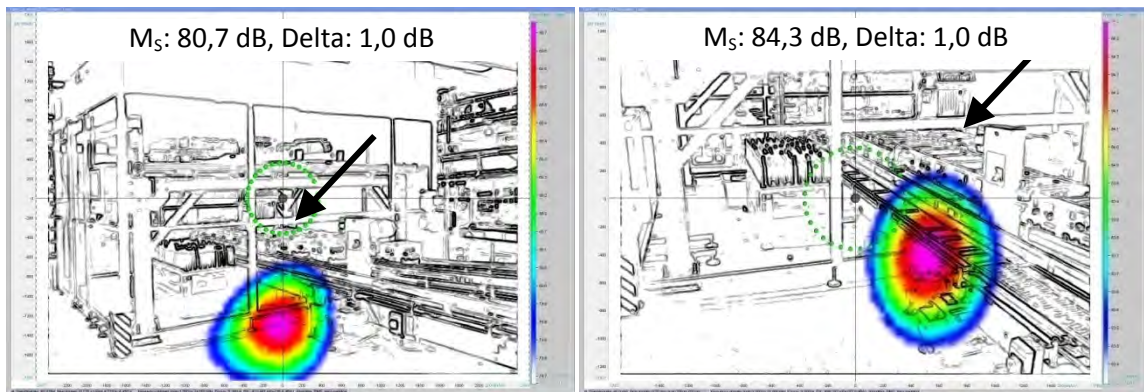


Abbildung 93: Schallemission durch die Öffnung beim Einsetzen der Flaschen in die Kästen (Pfeil)

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Auf Grund der Fülle an möglichen Maßnahmen, dem hohen finanziellen und personellen Aufwand bei der Installation und der großen Erfahrung der Industriepartner in diesem Bereich, wurde bei diesem Arbeitsschritt in erster Linie eine Literaturrecherche zu sekundären Schallschutzmaßnahmen durchgeführt. Zudem konnte gezeigt werden, dass mit der Akustischen Kamera die Wirkung von sekundären Schallschutzmaßnahmen visualisiert und Schwachstellen lokalisiert werden können.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### 5.3.5 AS 3.5: Entwicklung der Regelungsstrategie und Algorithmierung;

#### Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure

#### Zielstellung

Basierend auf den bei der physikalischen Modellierung und den in den Arbeitsschritten AS 3.2 und AS 3.3 erlangten Erkenntnissen soll eine Regelungsstrategie entwickelt werden, die die Schallemission der Behälter beim Transport in Abfüllanlagen reduziert.

#### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 1,00 Mannmonate (MM) (Einzelsatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 2).

## Ergebnisse

### 5.3.5.1 Grundlegende Anforderungen an die Transporteuregelung

Eine Regelung für Massentransporteure an Getränkeabfüllanlagen muss in erster Linie in der Lage sein, die grundlegenden Aufgaben zu erfüllen. Diese beinhalten die sichere Aufnahme der von der vorgeschalteten Maschine zur Verfügung gestellten Behälter, deren möglichst störungsfreien Transport zur nachfolgenden Maschine und die lückenlose Versorgung der nachgeschalteten Maschine mit Behältern. Diese Anforderungen lassen sich durch eine entsprechende Einstellung der Transportbandgeschwindigkeiten erreichen und müssen dementsprechend bei der Umsetzung der Regelung berücksichtigt werden.

Zur sicheren Aufnahme der Behälter ist es notwendig, eine gewisse Geschwindigkeit der Transportbänder nicht zu unterschreiten, da sonst ein Rückstau droht. Dieser kann sich bei geschlossener Geländerführung in die vorgeschaltete Maschine zurückstauen und dort Schäden oder zumindest einen ungewollten Stopp (bei Sicherung gegen Rückstau) verursachen. Bei offenen Geländerführungen, wie sie beispielsweise bei drucklosen Zusammen- oder Auseinanderführungen zu finden sind, kommt es zu umfallenden Flaschen oder Behälterbruch. Daher müssen bei der Wahl der Geschwindigkeit des Einlaufbandes ( $v_{in}$ ) die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine ( $q_{in}$ ), der Durchmesser der verarbeiteten Behälter ( $d$ ) und die gewünschte Anzahl an Behältern pro Reihe ( $n$ ), also die Breite des Behälterstroms berücksichtigt werden. Die breite des Behälterstroms auf dem ersten Transportbandabschnitt sollte dabei nicht kleiner sein, als die Breite des Behälterstroms, der die Maschine oder die Behälterauseinanderführung verlässt, da sonst Lücken in den kompakten Behälterstrom gefahren werden. Die Einstellung kann nach folgender Formel erfolgen.

$$v_{in} = \frac{q_{in} * d}{3600 \frac{s}{h} * n} = c_{in} * q_{in} \quad \text{Formel 12}$$

Zur einfacheren Handhabung wurden alle Faktoren, die sich bei gleichbleibendem System nicht ändern, in dem Faktor  $c_{in}$  zusammengefasst.

Die Einstellung der Geschwindigkeit auf dem Auslaufband ( $v_{out}$ ) kann analog erfolgen. Hier muss lediglich eine gewisse Erhöhung der Geschwindigkeit berücksichtigt werden ( $\Delta v_{slip}$ ), um den für den Betrieb vieler Maschinen oder drucklosen Zusammenführungen nötigen Staudruck aufzubauen.

$$v_{out} = \frac{q_{out} * d}{3600 \frac{s}{h} * n} + \Delta v_{slip} = c_{out} * q_{out} + \Delta v_{slip} \quad \text{Formel 13}$$

Auch hier wurden die Systemparameter Behälterdurchmesse und Behälterstrombreite zu einem Faktor ( $c_{out}$ ) zusammengefasst.

Beim Transport der Behälter muss darauf geachtet werden, dass eine bestimmte Geschwindigkeit nicht unterschritten wird, um die Versorgung der nachgeschalteten Maschine mit Behältern zu sichern. Dazu muss der Zustrom an Behältern in den Pulk am Ende des Transporteure gleich groß oder größer als die Entnahme an Behältern durch die nachfolgende Maschine sein. Hierzu muss die Geschwindigkeit des Transportbandes der Breite des Behälterstroms angepasst werden.

$$v_{Band} \geq \frac{q_{out} * d}{3600 \frac{s}{h} * n} \quad \text{Formel 14}$$

Diese Bedingung kann natürlich nur gelten so lange das System störungsfrei arbeitet. Treten Störungen oder Mangel an der vorgeschalteten Maschine auf, wird Formel 14 zwangsläufiger Weise nach einer gewissen Zeit verletzt und es kommt zum Mangel an der nachgeschalteten Maschine.

### 5.3.5.2 Aufbau und Umsetzung der stufenlosen Pufferregelung

Basierend auf den in Abschnitt 5.3.5.1 definierten Anforderungen und Methoden wurde der Algorithmus zur stufenlosen Pufferregelung modelliert. Das Bezugssystem stellt dabei der in Abbildung 15 auf Seite 20 dargestellte Transporteur dar. Prinzipiell soll die hier modellierte Regelung aber für alle Transporteure mit jeweils einem Ein- und Auslaufband und  $n = 1, \dots, \infty$  mittleren Transportbandabschnitten anwendbar sein.

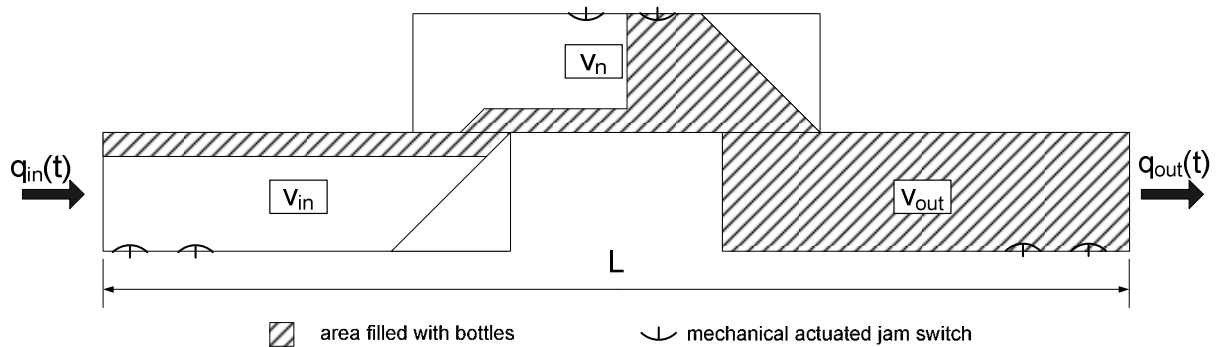


Abbildung 94: Skizze des betrachteten Systems mit jeweils einem Transportbandabschnitt für Ein- und Auslauf und einem mittleren Transportbandabschnitt

#### 5.3.5.2.1 Aufbau des Hauptprogramms

Das Programm gliedert sich in drei Teile, die den in Abschnitt 5.3.3 erwähnten Fällen I bis III entsprechen. Die Entscheidung, welcher dieser drei Fälle vorliegt, wird durch die Überwachung des Puffereinlaufs ( $q_{in}(t)$ ) und Pufferauslaufs ( $q_{out}(t)$ ) getroffen. Dazu werden diese beiden Werte in jedem Programmzyklus aktualisiert. Wird dabei erkannt, dass  $q_{in}(t) \leq 0$  ist, wird das Unterprogramm für den Lückenschluss ausgeführt (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer AB III oder für den Anti-Starve-Puffer AS III). Dies geschieht auch beim Vollfahren des Puffers, da in diesem Fall der erste gemessene Wert für  $q_{in}(t)$  gleich Null ist. Ist dies nicht der Fall wird  $q_{out}(t)$  abgefragt. Ist dieser Wert gleich Null, wird das Unterprogramm für den Rückstaubetrieb aufgerufen (je nach Pufferart für den Anti-Block-Puffer AB II oder für den Anti-Starve-Puffer AS II). Sind beide Werte größer Null, wird das Programm für den kontinuierlichen Betrieb aufgerufen (AS I oder AB I). Der Ablauf des Programms ist in Abbildung 95 dargestellt und unterscheidet sich für Anti-Starve- und Anti-BlockPuffer nicht.

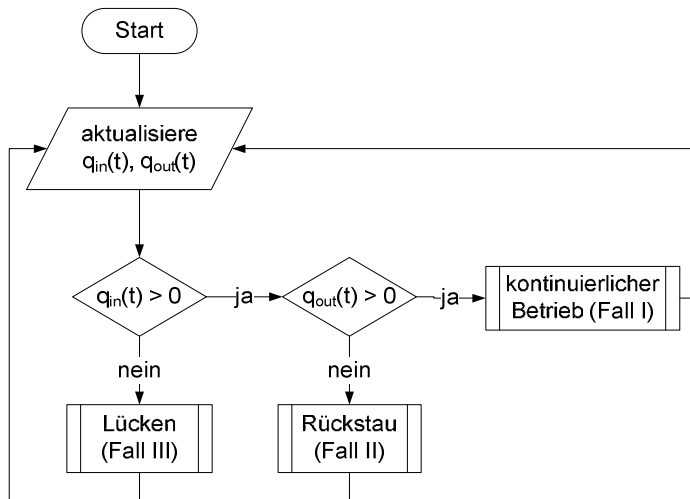


Abbildung 95: Flowchart des Hauptprogramms

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Unterprogramme jeweils für den Anti-Block- (AB) und den Anti-Starve-Betrieb (AS) dargestellt.

### 5.3.5.2.2 Aufbau des Unterprogramms für den kontinuierlicher Betrieb (AS I und AB I)

Das Unterprogramm für den kontinuierlichen Betrieb zielt darauf ab, die Pufferfüllung  $B(t)$  einer Sollfüllung  $B_{set}$  anzugleichen. Daher wird zunächst die Pufferfüllung nach der folgenden Formel berechnet:

$$B(t) = \int_0^t (q_{in}(\tau) - q_{out}(\tau)) d\tau \quad \text{Formel 15}$$

Es werden die von der vorgeschalteten Maschine in den Transporteur eingespeisten Behälter gezählt  $\int_0^t q_{in}(\tau) d\tau$  und am Ausgang des Puffers die Behälter, die den Puffer verlassen  $\int_0^t q_{out}(\tau) d\tau$ . Für die Zählung kann eine Lichtschranke zum Einsatz kommen. Handelt es sich allerdings um einen mehrsträngigen Ein- oder Auslauf, kommt das im AiF PRO INNO II Projekt mit der Nummer AiF KF0509701LF7 vorgestellte Sensorsystem zur Erfassung von im Pulk geförderten Behältern zum Einsatz. Auf diese Weise kann zu jedem Zeitpunkt der aktuelle Belegungszustand des Transporteurs in Anzahl an Behältern angegeben werden. Dieser Wert dient als zentrale Führungsgröße für die gesamte Regelung. Dazu wird  $B(t)$  zur Sollfüllung ins Verhältnis gesetzt.

#### AS I

Um  $B(t)$  dem Sollwert  $B_{set}$  angleichen zu können, wird beim Anti-Starve-Puffer die Ausbringung des vorgeschalteten Maschine  $q_{in\_set}(t)$  im Verhältnis zur nachfolgenden Maschine angepasst. Dies geschieht nach der folgenden Formel:

$$q_{in\_set}(t) = q_{out}(t) \cdot \left(\frac{B_{set}}{B(t)}\right)^p \quad \text{Formel 16}$$

Wird der angestrebte Füllungsgrad unterschritten ( $\frac{B_{set}}{B(t)} < 1$ ), wird der Sollwert der Ausbringung für die vorgeschaltete Maschine im Verhältnis zum Ist-Wert der nachgeschalteten Maschine reduziert. Tritt der umgekehrte Fall ein, hat dies zur Folge, dass der Bruch in Formel 16 größer eins wird und die vorgeschaltete Maschine im Verhältnis zur nachgeschalteten hochgeregelt wird. Der Faktor  $p$  dient zur Anpassung des Regelverhaltens. Durch seine Anpassung kann die Geschwindigkeit, mit der  $B_{set}$

angefahren wird, angepasst werden. Das oben beschriebene Regelverhalten der vorgeschalteten Maschine in Abhängigkeit von  $B(t)$  ist in Abbildung 96 dargestellt.

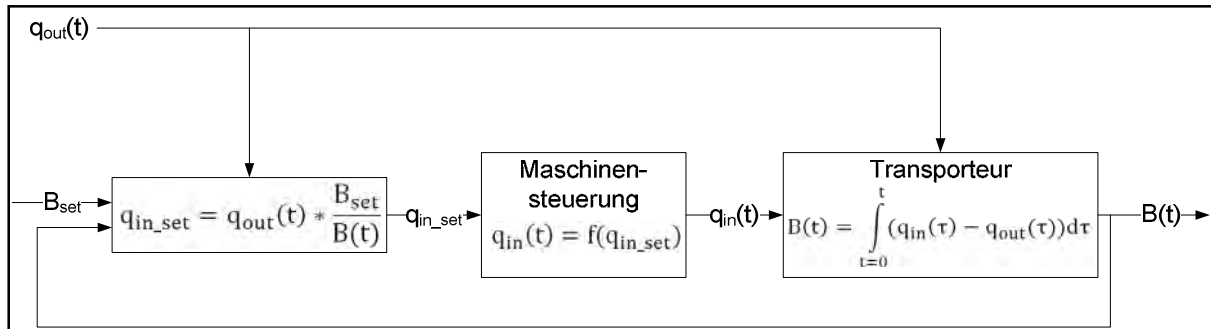


Abbildung 96: Regelkreis für den kontinuierlichen Betrieb des Anti-Starve-Puffers (AS I)

### AB I

Beim kontinuierlichen Betrieb des Anti-Block-Puffers wird anders vorgegangen. Hier darf nicht die vorgeschaltete Maschine geregelt werden, sondern nur die nachgeschaltete Maschine. Daher wurde die Formel 16 angepasst:

$$q_{out\_set}(t) = q_{in}(t) \cdot \left(\frac{B(t)}{B_{set}}\right)^p \quad \text{Formel 17}$$

Auch hier hat die aktuelle Füllung direkten Einfluss auf die Maschinenausbringung. Wird der Bruch größer eins, wird die nachgeschaltete Maschine im Verhältnis zur vorgeschalteten Maschine hochge-regelt. Tritt der umgekehrte Fall ein, wird die Ausbringung der nachgeschaltete Maschine reduziert.

Die Geschwindigkeiten der Transportbänder müssen an die Geschwindigkeiten der Maschinen ange-passt werden. Dies geschieht unter Berücksichtigung der in Abschnitt 5.3.5.1 aufgeführten Formel 12, Formel 13 und Formel 14.

Die Geschwindigkeit der Mittelsektion(-en) sollte so abgestimmt sein, dass die minimal möglichen Geschwindigkeitsunterschiede zwischen den einzelnen Transportbandabschnitten bestehen. So kön-nen Behälterzusammenstöße mit hohen Differenzgeschwindigkeiten vermieden werden. Die Abstuf-ung erfolgt daher nach der Formel 18:

$$v_{n\_set}(t) = v_{in}(t) - n \cdot \left(\frac{v_{in}(t) - v_{out}(t)}{N + 1}\right) \quad \text{Formel 18}$$

Begonnen wird dabei mit der ersten Mittelsektion, die der Einlaufsektion folgt ( $n = 1$ ). Die Berechnung erfolgt dann für alle Sektionen bis zum vorletzten Transportbandabschnitt  $n = N - 1$ .

### 5.3.5.2.3 Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb bei Rückstau (AS II und AB II)

Muss die dem Puffer nachgeschaltete Maschine auf Grund eines Rückstaus oder einer Störung ste-hen bleiben, kommt es auf dem Transporteur zu einem Rückstau. Da  $q_{out}(t) \leq 0$  ist, wird das Unter-programm für den Betrieb bei Rückstau aufgerufen (AS II und AB II) (siehe Abbildung 95). Die ent-sprechende Situation ist in Abbildung 97 dargestellt.

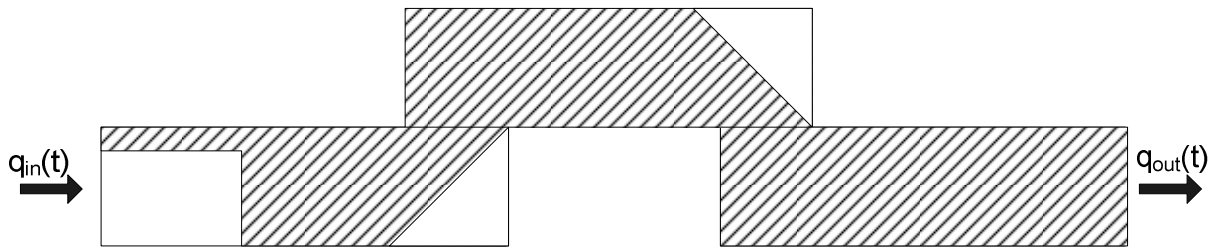


Abbildung 97: Rückstau auf dem Puffer, verursacht durch einen Stillstand der nachgeschalteten Maschine ( $q_{out}(t) \leq 0$ )

Auf diesen Fall wird die Regelung bei Anti-Starve- und Anti-Block-Puffern unterschiedlich reagieren, daher sollen diese hier getrennt dargestellt werden.

### AS II

Steht die nachgeschaltete Maschine (Slave), kann die dem Puffer vorgeschaltete Maschine (Master) nicht mehr auf Basis der Ausbringung des Masters nachgeregelt werden. Daher wird in diesem Fall auf eine alternative Führungsgröße zurückgegriffen. Dazu wird die Sollausbringung ( $q_{in\_set}(t)$ ) des Slaves auf Basis der Einstellausbringung des Masters ( $q_{out\_max}$ ) nach der folgenden Formel nachgeregelt:

$$q_{in\_set}(t) = q_{out\_max} \cdot \left(\frac{B_{set}}{B(t)}\right)^p \quad \text{Formel 19}$$

Dies führt dazu, dass die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine kontinuierlich reduziert wird. Dies kann aber nur so lange erfolgen, bis eine kritische Füllung des Puffers erreicht ist. Daher wird die aktuelle Füllung ( $B(t)$ ) permanent mit der Kapazität ( $C$ ) des Puffers, abgeglichen. Ist diese erreicht oder überschritten, muss die dem Puffer vorgeschaltete Maschine angehalten werden.

Die Geschwindigkeiten der Transporteure werden analog dem Fall AS I nach Formel 12 und Formel 18 angepasst. Der einzige Unterschied besteht darin, dass  $v_{out\_set}(t)$  auf Basis von  $q_{out\_max}$  berechnet werden muss, da  $q_{out}(t) = 0$ .

$$v_{out\_set}(t) = c_{out} \cdot q_{out\_max} \quad \text{Formel 20}$$

Zusätzlich werden komplett gefüllte Abschnitte des Transporteurs abgeschaltet. Dazu werden feste Werte der Pufferfüllung vorgegeben, ab denen einzelne Abschnitte abgeschaltet werden.

Läuft die nachgeschaltete Maschine wieder an, wird das Unterprogramm AS II beendet, das Programm wechselt in das Hauptprogramm und von dort in den kontinuierlichen Betrieb AS I.

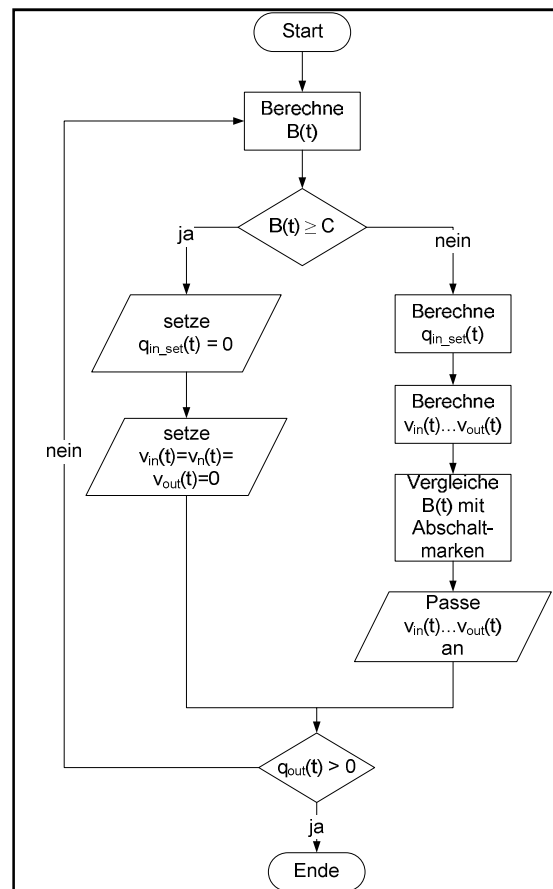


Abbildung 98: Flowchart für den Rückstau-Modus im Anti-Starve-Betrieb

**AB II**

Bei Anti-Block-Puffern wird im Sinne einer effizienten Nutzung der Pufferfläche anders vorgegangen. Hier befindet sich der Master vor dem Puffer. Dieser sollte möglichst nicht in seiner Ausbringung

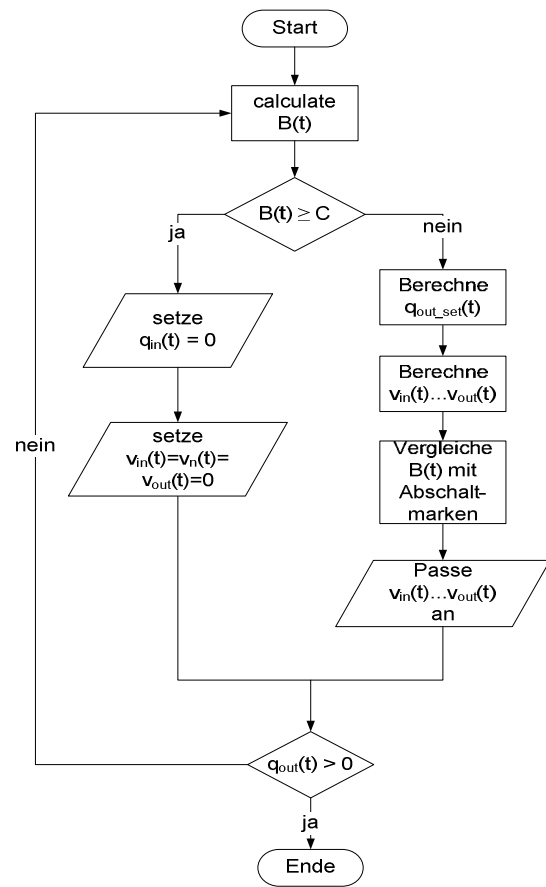


Abbildung 99: Flowchart für den Rückstau-modus im Anti-Block-Betrieb

beeinträchtigt werden. Daher wird diesem die Freigabe erst entzogen, wenn  $B(t)$  die Kapazität des Puffers ( $C$ ) nahezu erreicht hat (siehe Formel 21). Hierbei wird berücksichtigt, dass der Master nach dem Entzug der Freigabe herunter regelt und die in der Maschine vorhandenen Flaschen in dem Puffer einspeist ( $f(q_{in})$ ) werden. Der Platz für diese muss auf dem Puffer noch zur Verfügung stehen.

$$q_{in\_set}(t) = 0 \text{ if } C \leq B(t) + f(q_{in}) \quad \text{Formel 21}$$

Die Bändergeschwindigkeit wird für den Einlauf ( $v_{in}(t)$ ) und die mittleren Transporteurabschnitte ( $v_n(t)$ ) analog dem Fall AB I eingestellt (Formel 12 und Formel 18). Die Geschwindigkeit für die Auslaufbänder wird der Einstellausbringung der nachgeschalteten Maschine angepasst.

$$v_{out\_set}(t) = c_{out} \cdot q_{out\_max} \quad \text{Formel 22}$$

Auch bei der Anti-Block-Regelung werden komplett gefüllte Transporteurabschnitte abgeschaltet und erst wieder zugeschaltet, wenn die nachfolgende Maschine wieder anläuft. In diesem Fall wechselt das Programm zurück in das Unterprogramm AB I.

**5.3.5.2.4 Aufbau des Unterprogramms für den Betrieb beim Auftreten von Lücken (AS III und AB III)**

Bei Stillständen der vorgeschalteten Maschine kommt es zu Lücken im Behälterstrom und, sofern der letzte Stillstand der nachgeschalteten Maschine länger zurück liegt, zu einer Unterschreitung der Sollfüllung des Puffers. Beides gilt es im Sinne eines gleichmäßigen Betriebs der Maschinen und der gesamten Anlage zu vermeiden. Die Lücken im Behälterstrom sollten daher geschlossen werden, bevor sie die nachgeschaltete Maschine erreichen und somit einen Stillstand verursachen. Die Sollfüllung sollte nach der Störung möglichst schnell wieder angefahren werden, um den Transporteur für die nächste Störung in den richtigen Betriebszustand zu versetzen.

Dazu wird die Situation auf dem Transporteur für die Steuerung der Anlage möglichst genau abgebildet. In diesem Fall heißt das, dass die Behälterströme, die sich auf dem Transporteur befinden, möglichst genau erfasst werden müssen. Sobald die vorgeschaltete Maschine stehen bleibt, wird die Position der letzten Flaschen, die die Maschine verlassen hat, fortlaufend berechnet ( $x_{1Band}(t)$ ). Dazu muss die Geschwindigkeit des Transportbandabschnitts bekannt sein, auf dem sich der letzte Behälter des ersten Flaschenstroms befindet. Außerdem müssen die Längen der einzelnen Transportbandabschnitte bekannt sein. Auf Basis der aktuellen Position des Behälters wird dann entschieden, welche Geschwindigkeit zur Berechnung herangezogen wird. Genauso wird beim Wiederanlaufen der vorge-



schalteten Maschine verfahren. Allerdings wird in diesem Fall die erste Flasche, die die Maschine verlässt, verfolgt. Die berechnete Position entspricht somit der ersten Flasche des zweiten Behälterstroms  $x_2(t)$ . Beide Positionsrechnungen erfolgen nach den folgenden Formeln.

$$x(t) = \int_{t_0}^t v_{in}(\tau) d\tau \quad \text{wenn } x(t-1) < l_0 \quad \text{Formel 23}$$

$$x(t) = \sum_{i=0}^{n-1} l_i + \int_{t_0}^t v_n(\tau) d\tau \quad \text{wenn } x(t-1) \geq \sum_{i=0}^{n-1} l_i \wedge x(t-1) < \sum_{i=0}^n l_i \quad \text{Formel 24}$$

$$x(t) = \sum_{i=0}^{N-1} l_i + \int_{t_0}^t v_{out}(\tau) d\tau \quad \text{wenn } x(t-1) \geq \sum_{i=0}^{N-1} l_i \wedge x(t-1) < \sum_{i=0}^N l_i \quad \text{Formel 25}$$

Die Berechnung erfolgt für jeden Abschnitt auf Grund der unterschiedlichen Längen ( $l_0, l_1, \dots, l_n, \dots, l_N$ ) und unterschiedlichen Geschwindigkeiten ( $v_{in}, \dots, v_n, \dots, v_{out}$ ) einzeln. Die Positionsberechnung erfolgt durch die Integration der jeweiligen Geschwindigkeit über die Zeit. Als Integrationsgrenzen dienen der Zeitpunkt des Abschnittswechsels ( $t_0$ ) und die aktuelle Zeit ( $t$ ). Zur aktuell auf dem jeweiligen Transportabschnitt berechneten Position müssen jeweils die Längen der vorhergehenden Abschnitte addiert werden ( $\sum_{i=0}^{n-1} l_i$ ), um die Position in Bezug auf den Puffereinlauf zu berechnen.

Bei der Berechnung der Position des ersten Behälterstroms ( $x_1(t)$ ) ist ein weiterer Fall zu berücksichtigen. Der erste Behälterstrom kann in den Pulk am Ende des Transporteurs übergehen. Ist dies der Fall, muss die Berechnung der Position  $x_1(t)$  auf andere Art und Weise erfolgen, da sich die letzte Flasche des ersten Behälterstroms nicht mehr mit der Geschwindigkeit des Transportbandes bewegt, auf dem sie sich befindet, sondern mit Pulkgeschwindigkeit. Zur Berechnung der Position muss bekannt sein, wie viele Behälter sich am Ende des Transporteurs befinden, welchen Flächenbedarf die Behälter in der dichtesten Zylinderpackung haben, welche Geometrie der Transporteur aufweist (Breite  $b_n$  und Länge  $l_n$ ) und welche Länge der gesamte Transporteur hat ( $L = \sum_{i=0}^N l_i$ ). Die Berechnung erfolgt nach den folgenden Formeln.

$$x_{1Pulk}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_n} * \left( \int_0^{t_{stillstand}} q_{in}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{out}(\tau) d\tau \right) \quad \text{Formel 26}$$

für  $\left( \int_0^{t_{stillstand}} q_{in}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{out}(\tau) d\tau \right) - \frac{b_n \cdot l_N}{e \cdot d} \leq 0$

$$x_{1Pulk}(t) = L - \frac{e \cdot d}{b_n} * \left( \left( \int_0^{t_{stillstand}} q_{in}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{out}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n+1}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} \right) \quad \text{Formel 27}$$

für  $\left( \int_0^{t_{stillstand}} q_{in}(\tau) d\tau - \int_0^t q_{out}(\tau) d\tau \right) - \sum_{i=n}^N \frac{b_i \cdot l_i}{e \cdot d} > 0$

Im ersten Integral der beiden Formeln werden die Behälter berücksichtigt, die bis zum Zeitpunkt des Stillstands der vorgeschalteten Maschine ( $t_{stillstand}$ ) auf den Transporteur gelangt sind. Im zweiten Integral werden alle Behälter erfasst, die den Transporteur bis zum Zeitpunkt der Berechnung verlassen haben. Die Differenz der beiden Integrale ergibt die Anzahl an Behältern, die sich am Ende des Transporteurs befindet. Multipliziert man diese Anzahl mit ihrem Platzbedarf ( $e \cdot d$ ), erhält man die mit Flaschen belegte Fläche. Dividiert man die Fläche durch die Breite des Puffers, erhält man eine Länge. Bei dieser handelt es sich um den Abstand des Endes des Flaschenpulks zum Pufferende. Hierbei muss allerdings berücksichtigt werden, auf welchem Pufferabschnitt ( $n$ ) sich das Ende des Fla-

schenpulks befindet, da diese unterschiedliche Breiten ( $b_n$ ) aufweisen können<sup>1</sup>. Zieht man diese ermittelte Länge nun von der Gesamtlänge des Transporteurs ( $L$ ) ab, erhält man die Position des Endes des Flaschenpulks in Bezug auf den Pufferanfang ( $x_{1Pulk}(t)$ ). Der Unterschied zwischen Formel 26 und Formel 27 besteht in der Position des Endes des Behälterpulks. Befindet sich der Behälterpulk nicht auf dem letzten Transportbandabschnitt (mit dem Index  $N$ ), müssen die Behälter, die sich auf den hinteren Transportbandabschnitten befinden bei der Berechnung berücksichtigt werden. In Formel 27 wird daher die Anzahl an Behältern, die sich auf den hinteren komplett gefüllten Abschnitten befindet, von der Gesamtanzahl an Behältern auf dem Transporteur abgezogen.

Nach der Berechnung der Positionen, sowohl für den freien Transport ( $x_{1Band}(t)$ ), als auch für den Transport im Pulk ( $x_{1Pulk}(t)$ ), entscheidet der Algorithmus, welche für  $x_1(t)$  berechnete Position die richtige ist. Dazu werden die beiden berechneten Positionen miteinander verglichen. Ist  $x_{1Band}(t)$  kleiner  $x_{1Pulk}(t)$ , ist  $x_{1Band}(t)$  die richtige Position, da der letzte Behälter des ersten Behälterstroms das theoretisch berechnete Pulkende noch nicht erreicht hat. Tritt der umgekehrte Fall ein und  $x_{1Pulk}(t)$  ist kleiner gleich  $x_{1Band}(t)$ , ist  $x_{1Pulk}(t)$  die richtige Position, da sich die letzte Flasche des vorderen Behälterstroms nicht hinter dem berechneten Pulkende befinden kann.

$$x_1(t) = x_{1Band}(t) \quad \text{wenn } x_{1Band}(t) < x_{1Pulk}(t) \quad \text{Formel 28}$$

$$x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad \text{wenn } x_{1Band}(t) \geq x_{1Pulk}(t) \quad \text{Formel 29}$$

Mit Hilfe der Positionen können die entsprechenden Eingriffe in die Maschinenausbringungen und Bändergeschwindigkeiten vorgenommen werden, um die durch Stillstände entstandenen Lücken möglichst schnell zu schließen.

Auch in diesem Fall werden der Anti-Starve- und der Anti-Block-Puffer auf Grund unterschiedlicher Anpassungen der Transportbandgeschwindigkeiten und Maschinenausbringungen getrennt voneinander betrachtet.

---

<sup>1</sup> In realen Anlagen muss beachtet werden, dass sich die Breite des Puffers, speziell an den Ein- bzw. Ausläufen, über die Länge des Pufferabschnitts ändern kann. Dies muss bei der Berechnung berücksichtigt werden.



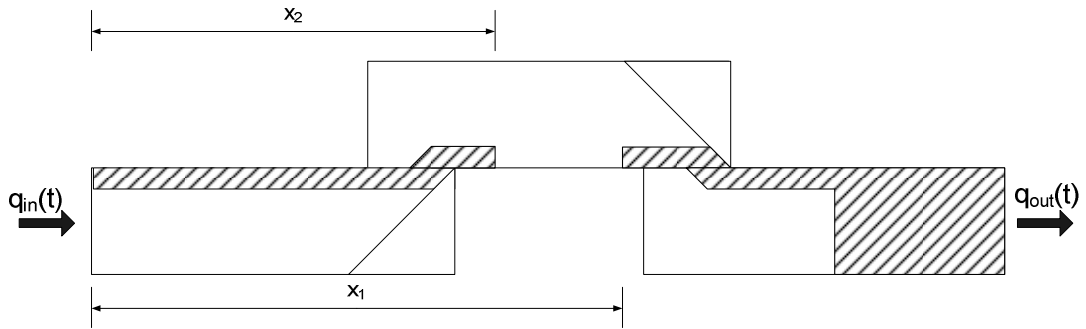


Abbildung 101: Beide Behälterströme befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt

- a) Die beiden Behälterströme mit den Positionen  $x_1(t) = x_{1\text{Band}}(t)$  und  $x_2(t)$  befinden sich auf verschiedenen Transportbandabschnitten (siehe Abbildung 102). Daher wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine auf das Maximum erhöht (Einstellausbringung). Die Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnitts  $v_{in}(t)$  wird entsprechend Formel 12 an die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine angepasst. Anschließend wird die Position  $x_2(t)$  mit den Längen der einzelnen Abschnitte verglichen. Alle Abschnitte, die sich vor der aktuellen Position befinden sowie der Abschnitt auf dem sich  $x_2(t)$  befindet, werden in ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit  $v_{in}(t)$  angeglichen.

$$v_{in\_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t) \text{ wenn } x_2(t) \leq l_0 \wedge x_{1\text{Band}}(t) > l_0 \quad \text{Formel 31}$$

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t) \text{ if } x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_{1\text{Band}}(t) > \sum_{i=0}^n l_i \quad \text{Formel 32}$$

Die hinteren Abschnitte werden mit der oben beschriebenen Geschwindigkeit weiterbetrieben. Auf diese Weise wird die Länge der Lücke reduziert.

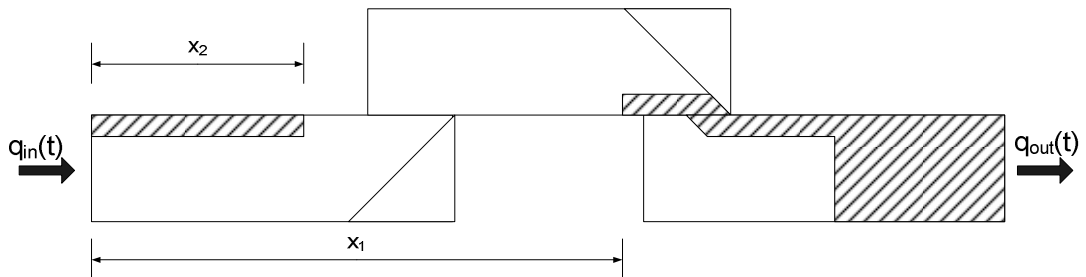


Abbildung 102: Vorderer und hinterer Behälterstrom befinden sich auf unterschiedlichen Transporteurabschnitten.

- b) Der hintere Behälterstrom ist komplett in den Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen (siehe Abbildung 103). Daher wird die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine  $q_{in}(t)$  auf das Maximum hochgeregelt (Einstellausbringung). Alle Transportbänder, auf welchen sich der hintere Behälterstrom mit der Position  $x_2(t)$  befindet, werden in Ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnittes  $v_{in}(t)$  angepasst.

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t) \text{ wenn}$$

$$x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t)$$

Formel 33

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = v_{out\_set}(t) = c_{in} * q_{in}(t) \text{ wenn}$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} l_i \geq x_2(t) \leq L \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t)$$

Formel 34

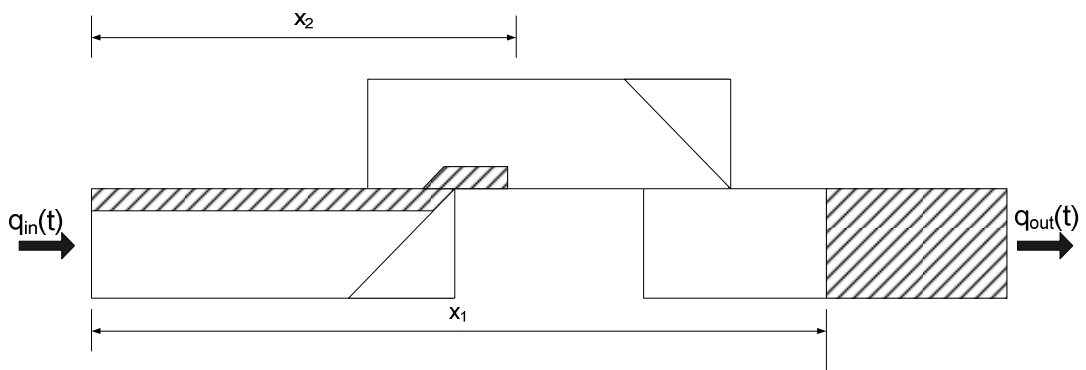


Abbildung 103: Der hintere Behälterstrom ist komplett in dem Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen

Leere Transporteurabschnitte werden abgeschaltet. Die Abschnitte, auf welchen sich der Pulk befindet, werden mit der für  $v_{out}(t)$  nach der Formel 13 oder Formel 34 berechneten Geschwindigkeit betrieben.

### AB III

Bei Anti-Block-Puffer wird die nachgeschaltete Maschine bei einer Störung der vorgeschalteten Maschine entsprechend der Pufferfüllung heruntergeregelt.

$$q_{out\_set}(t) = q_{in\_max} \cdot \left( \frac{B(t)}{B_{set}} \right)^p$$

Formel 35

Allerdings kann  $q_{in}(t)$  nicht zur Berechnung herangezogen werden, da dieser auf Grund des Stillstands Null ist. Daher wird die Einstellausbringung  $q_{in\_max}$  der vorgeschalteten Maschine verwendet. Diese wird von der Transporteurregelung/-steuerung des vorgeschalteten Transporteurs vorgegeben oder entspricht der Einstellausbringung des Zentralaggregats, wenn es sich um die dem Zentralaggregat nachgeschaltete Pufferstrecke handelt. Die Geschwindigkeit des Einlaufbandes wird ebenfalls über diesen Wert eingestellt.

$$v_{in\_set}(t) = c_{in} \cdot q_{in\_max} \quad \text{Formel 36}$$

Läuft die vorgeschaltete Maschine wieder an, versucht die Regelung auch im Anti-Block-Betrieb die Lücken zuzufahren. Der Unterschied zwischen der Anti-Block und der Anti-Starve-Regelung ist dabei allerdings, dass bei der Anti-Block-Regelung die vorgeschaltete Maschine (Master) nicht mitgeregelt werden kann. Die Bandbreite der Geschwindigkeitsanpassungen der Transportbänder ist damit begrenzt. Die maximale Geschwindigkeit, die gewählt werden kann ergibt sich aus Formel 14. Diese stellt die maximale Geschwindigkeit dar, bei der keine Lücken in den Behälterstrom gefahren werden.

Auch in diesem Fall wird zwischen den bereits oben erwähnten Fällen unterschieden:

Die beiden Behälterströme mit den Positionen  $x_1(t) = x_{1Band}(t)$  und  $x_2(t)$  befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt (siehe Abbildung 101). Die Lücke kann nicht zugefahren werden, da sich beide mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Die Ausbringung der nachgeschalteten Maschine wird wie in Formel 35 beschrieben über die Pufferfüllung berechnet und angepasst. Die Geschwindigkeiten der Bänder werden, wie unter AB I beschrieben, berechnet und angepasst.

- a) Die beiden Behälterströme mit den Positionen  $x_1(t) = x_{1Band}(t)$  und  $x_2(t)$  befinden sich auf verschiedenen Transportbandabschnitten (siehe Abbildung 102). Daher wird die Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnitts  $v_{in}(t)$  auf die maximal mögliche Geschwindigkeit erhöht. Anschließend wird die Position  $x_2(t)$  mit den Längen der einzelnen Abschnitte verglichen. Alle Abschnitte, die kleiner gleich der aktuellen Position sind, werde in ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit  $v_{in}(t)$  angeglichen.

$$v_{in\_set}(t) = v_{max} \quad \text{wenn} \quad x_2(t) \leq l_0 \wedge x_{1Band}(t) > l_0^2 \quad \text{Formel 37}$$

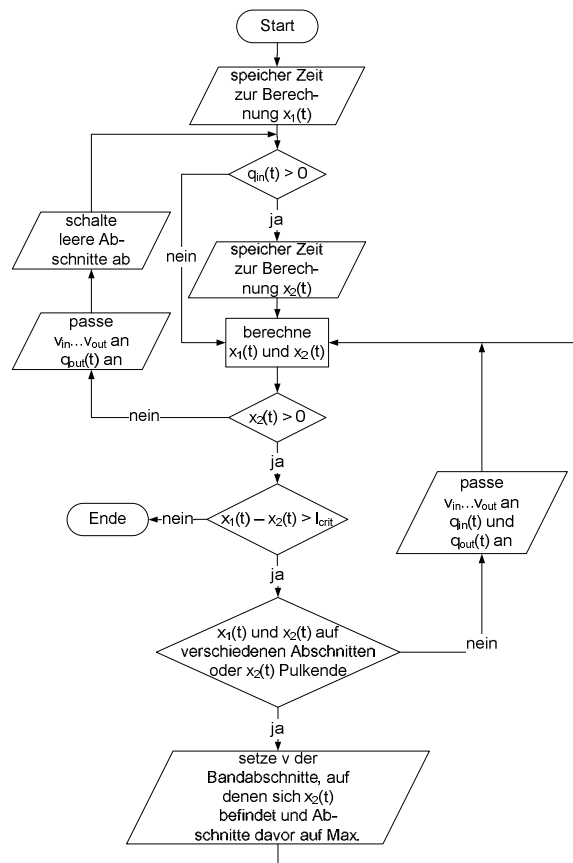


Abbildung 104: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Block-Betrieb

<sup>2</sup>  $v_{max}$  muss hier nach der Formel 12 bestimmt werden, um keine Lücken in den Behälterstrom zu fahren.

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = v_{max} \quad \text{wenn} \quad x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_{1Band}(t) > \sum_{i=0}^n l_i \quad \text{Formel 38}$$

Die hinteren Abschnitte werden mit der auf das nachgeschaltete Aggregat abgestimmten Geschwindigkeit weiterbetrieben. Auf diese Weise kann die Länge der Lücke reduziert werden. Abschnitte auf denen sich keine Behälter befinden werden abgeschaltet.

- b) Der hintere Behälterstrom ist komplett in den Pulk am Ende des Transporteurs übergegangen (siehe Abbildung 103). All Transportbänder, auf denen sich der hintere Behälterstrom mit der Position  $x_2(t)$  befindet, werden in Ihrer Geschwindigkeit der Geschwindigkeit des ersten Transportbandabschnittes  $v_{in}(t)$  angepasst.

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = v_{max} \quad \text{wenn} \quad x_2(t) \leq \sum_{i=0}^n l_i \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad \text{Formel 39}$$

$$v_{in\_set}(t) = \dots = v_{n\_set}(t) = v_{out}(t) = v_{max} \quad \text{wenn} \quad \sum_{i=0}^{N-1} l_i \geq x_2(t) \leq L \wedge x_1(t) = x_{1Pulk}(t) \quad \text{Formel 40}$$

Leere Transporteurabschnitte werden abgeschaltet. Die Abschnitte, auf denen sich der Pulk befindet werden mit der für  $v_{out}(t)$  berechneten Geschwindigkeit betrieben.

### Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

In diesem Arbeitsschritt wurde, aufbauend auf den bei der physikalischen Modellierung und den in den Arbeitsschritten AS 3.2 und AS 3.3 erlangten Erkenntnissen, eine Regelungsstrategie entwickelt, die in den folgenden beiden Arbeitsschritten in die Technikumsanlage implementiert und auf ihre Eignung zur Reduzierung der Schallemissionen bei Behälterzusammenstößen überprüft werden kann.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### 5.3.6 AS 3.6: Implementierung in die Technikumsanlage

#### Zielstellung

Um Versuche zur Funktionsfähigkeit des neuen Regelungsalgorithmus durchführen zu können sollte dieser an der umgebauten Technikumsanlage umgesetzt werden.

#### Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 1,50 MM; (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 2).

#### Ergebnisse

Der in Abschnitt 5.3.5 vorgestellte Algorithmus zur stufenlosen Regelung wurde an der umgebauten Versuchsanlage in der Programmiersprache AWL umgesetzt. Zusätzlich wurde als Referenz eine stauschalterbasierte Regelung des Transporteurs umgesetzt.

## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Es wurden zwei alternative Regelungskonzepte an der Versuchsanlage umgesetzt. Diese werden in AS 3.7 auf ihre akustischen Eigenschaften untersucht und verglichen.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

### **5.3.7 AS 3.7: Test und Bewertung**

#### **Zielstellung**

Zum Nachweis der Verbesserungen durch das neue Regelungskonzept soll dieses mit einem an heutigen Anlagen umgesetzten, stauschalterbasierten Regelungskonzept verglichen werden.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 2 – 2,00 MM; Forschungsstelle 1 – 0,95 MM (Einzelansatz A.1 der Finanzierungspläne für Forschungsstelle 1 und 2). Der Arbeitsschritt hat bei Forschungsstelle 1 0,50 MM weniger in Anspruch genommen, als im Arbeitsdiagramm vorgesehen war. Die in den AS 2.1 und AS 2.2 entstandene Verzögerung konnte vollständig aufgeholt werden.

Geräte: Akustische Kamera mit Ring-Array (Einzelansatz B des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse**

Neben dem Erhalt oder der Verbesserung der Anlageneffizienz stand die Reduktion des Schalldruckpegels bei der Entwicklung der stufenlosen Regelung im Vordergrund. Dies soll durch die Reduktion der Differenzgeschwindigkeiten der Behälter beim Zusammenstoß erreicht werden. Zur Bestimmung der Schallemissionen der stufenlosen Regelung wurde diese an der in Abschnitt 4.6 beschriebenen Flaschentransportstrecke umgesetzt. Als Vergleich zum heutigen Stand der Technik dient eine fünfstufige stauschalterbasierte Steuerung.

In den Versuchsreihen wurden die Schallemissionen der Versuchsanlage bei Auftreten der drei Fälle störungsfreier Betrieb, Störung der nachgeschalteten Maschine und Störung der vorgeschalteten Maschine gemessen. Alle Messungen erfolgten dabei im Anti-Starve-Betrieb der Transportstrecken.

Zur ortsgenauen Bestimmung der Schalldruckpegel wurden dazu die in Abbildung 105 dargestellten Messpunkte definiert. Diese befinden sich an den Überschüben der Transporteure (Messpunkte 1, 2 und 5) sowie im Bereich, in dem sich das Pulkende während der Versuche bewegt (Messpunkte 3 und 4). Die Messpunkte wurden in die Bereiche gelegt, an denen die größten Schallemissionen zu erwarten waren. An den Überschüben kommt es zum Einen durch das Umformieren des Flaschenpulk durch die Geländerführungen, zum Anderen durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten, mit denen die Transporteure betrieben werden, zu erhöhten Lärmemissionen. Im Bereich des Pulkendes ist mit Lärmemissionen zu rechnen, da sich der Behälterpulk langsamer bewegt, wie die im freien Transport befindlichen Behälter. Neben den ortsfesten Messungen wurde ein Messpfad zur Bestimmung der Schalldruckpegel im Bereich des Pulkendes angelegt. Auf diesem wurde das Schallpegelmessgerät parallel zur Versuchstrecke im Bereich des Pulkendes bewegt. Auf diese Weise konnte speziell der vom Pulkende ausgehende Schalldruck erfasst werden.

Sämtliche Versuche wurden auf Basis der in DIN EN ISO 11200 vorgeschriebenen Messbedingungen durchgeführt. Zur Bestimmung der Impulshaltigkeit der Lärmemissionen wurden die Messungen



sowohl in der Messeinstellung „Fast“, als auch „Impuls“ durchgeführt (Messgerät siehe Abschnitt 4.7).

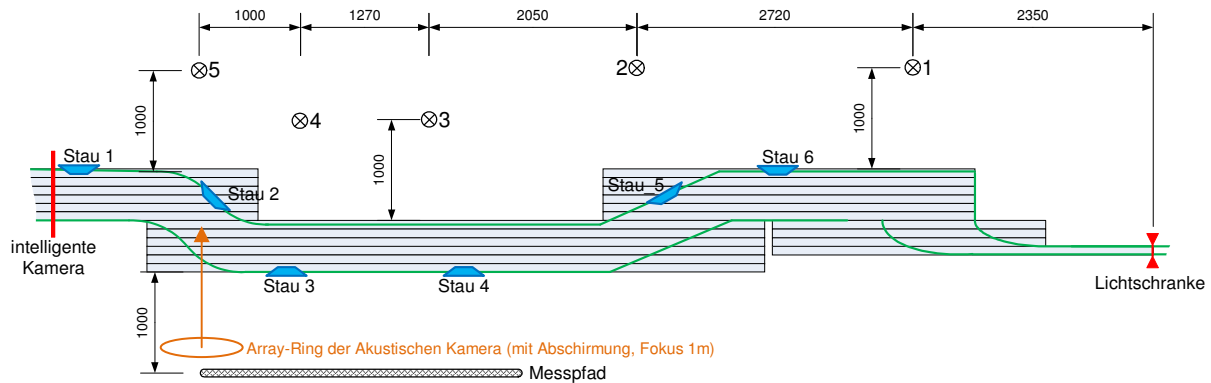


Abbildung 105: Darstellung der Versuchsstrecke mit verbauter Sensorik. Zusätzlich sind die Messpunkte 1 bis 5 eingezeichnet und der Messpfad zur Bestimmung des Schalldruckpegels am Pulkende

Die Ergebnisse der Messungen bei den unterschiedlichen Betriebszuständen der Anlage sind in Abbildung 106 bis Abbildung 108 dargestellt. Im linken Diagramm sind jeweils die Messwerte in der Einstellung „Fast“ des Messgerätes dargestellt. Dies ist die Standardeinstellung, mit der die meisten Schallmessungen zur Beurteilung des Schalldruckpegels in der Praxis erfolgen (siehe [23]). Das rechte Diagramm stellt die Messungen mit der Messeinstellung „Impuls“ dar, die insbesondere die Impulshaltigkeit von Schallereignissen berücksichtigt. Auf der vertikalen Achse der Diagramme ist der Schalldruckpegel in der Einheit dB(A) aufgetragen. Auf der horizontalen Achse sind die Nummern der Messpunkte, die der Nummerierung in Abbildung 105 entsprechen, aufgetragen. Zu jedem Messpunkt wurden sowohl Schallmessungen der fünfstufigen Steuerung, als auch der stufenlosen Regelung durchgeführt. Auf die Vermessung der deutlich lautereren dreistufigen Steuerung wurde verzichtet. Die Darstellung basiert auf einer fünffachen Bestimmung im Fall der Einstellung „Fast“ und auf einer dreifachen Bestimmung der Einstellung „Impuls“. Alle Werte sind mit einem Konfidenzintervall versehen, das auf Basis des Vertrauensniveaus 0,95 berechnet wurde.

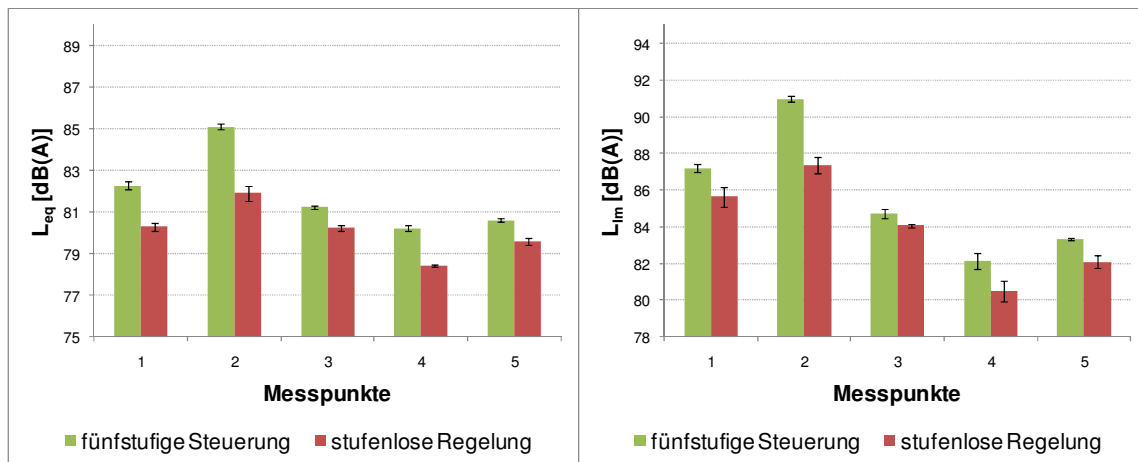


Abbildung 106: Die Diagramme basieren auf den Messungen während des störungsfreien Betriebs der Versuchsanlage. Der Sollzustand des Systems ist erreicht und wird von der stufenlosen Regelung beziehungsweise der fünfstufigen Steuerung gehalten. (linkes Diagramm: n = 5;  $\alpha = 0,05$ ), (rechtes Diagramm: n = 3;  $\alpha = 0,05$ )

In Abbildung 106 ist der Schalldruckpegel an den fünf Messpunkten bei störungsfreiem Betrieb der Anlage dargestellt. Das bedeutet, dass die Sollfüllung von 500 Flaschen angefahren wurde und konstant gehalten wird. Jede der Messungen erfolgt über 60 Sekunden, so dass leichte Schwanken während der Messung ausgeglichen werden. Wie in dem linken Diagrammen zu sehen ist, kommt es in jedem der Messpunkte zu einer Reduzierung des Schalldruckpegels bei Einsatz der stufenlosen Regelung. Die größte Differenz ergibt sich dabei an den Messpunkten 1 ( $\Delta L_{eq} = 1,98 \text{ dB(A)} \pm 0,41 \text{ dB(A)}$ ), 2 ( $\Delta L_{eq} = 3,22 \text{ dB(A)} \pm 0,59 \text{ dB(A)}$ ) und 4 ( $\Delta L_{eq} = 1,78 \text{ dB(A)} \pm 0,17 \text{ dB(A)}$ ). Das Pulkende liegt bei diesen Versuchen im Bereich zwischen den Messpunkten 3 und 4.

Auch die Impulshaltigkeit der Lärmemissionen konnte signifikant reduziert werden. Besonders stark ist die Abnahme hierbei am Messpunkt 2 ( $\Delta L_{im} = 3,60 \text{ dB(A)} \pm 0,58 \text{ dB(A)}$ ).

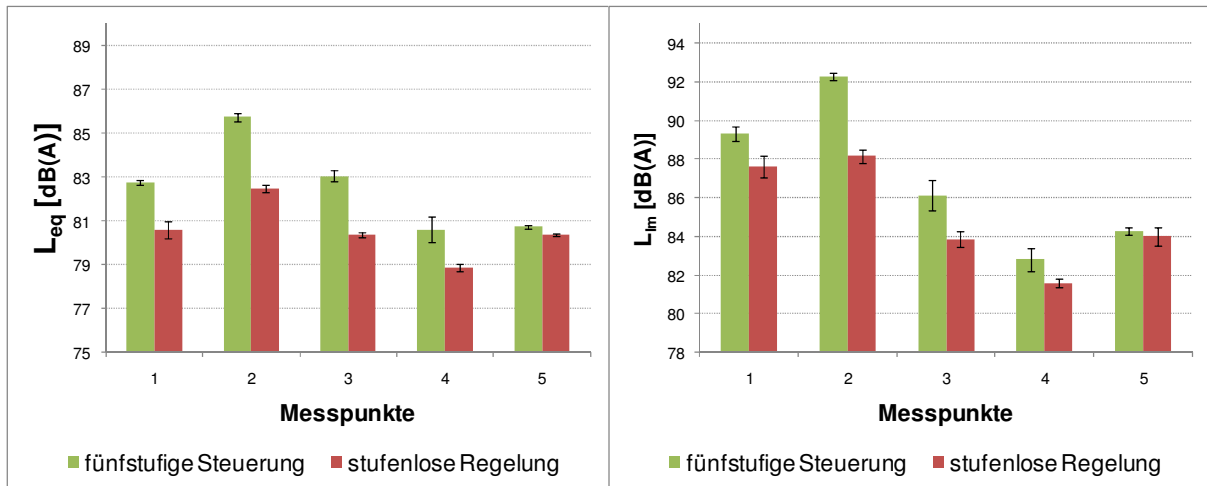


Abbildung 107: Die Diagramme basieren auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine. Das System befindet sich nicht im Sollzustand. Dieser wird von der stufenlosen Regelung beziehungsweise der fünfstufigen Steuerung während der Versuchsdauer angefahren. (linkes Diagramm:  $n = 5$ ;  $\alpha = 0,05$ ), (rechtes Diagramm:  $n = 3$ ;  $\alpha = 0,05$ )

In den Diagrammen der Abbildung 107 ist die Schallemission der Transportstrecke nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine dargestellt. Die Schallmessung beginnt bei den dargestellten Versuchsläufen in dem Moment, in dem die nachgeschaltete Maschine wieder anläuft und dauert 150 s. Nach dieser Zeitspanne ist das System in den Sollzustand zurückgekehrt.

In jedem der fünf Messpunkte ist die stufenlose Regelung signifikant leiser, als die fünfstufige Steuerung. Die größten Differenzen des  $L_{eq}$  ergeben sich bei diesem Versuch an den Messpunkten 1 ( $\Delta L_{eq} = 2,16 \text{ dB(A)} \pm 0,51 \text{ dB(A)}$ ), 2 ( $\Delta L_{eq} = 3,26 \text{ dB(A)} \pm 0,38 \text{ dB(A)}$ ), und 3 ( $\Delta L_{eq} = 2,68 \text{ dB(A)} \pm 0,37 \text{ dB(A)}$ ) sowie in geringerem Maße an dem Messpunkt 4 ( $\Delta L_{eq} = 1,74 \text{ dB(A)} \pm 0,73 \text{ dB(A)}$ ). Der Schalldruckpegel am Messpunkt 5 ( $\Delta L_{eq} = 0,36 \text{ dB(A)} \pm 0,16 \text{ dB(A)}$ ) wird, wie bereits bei dem oben dargestellten Versuch, kaum durch die Art der Regelung/Steuerung beeinflusst. Das Pulkende befindet sich auch bei diesem Versuch im Bereich zwischen den Messpunkten 3 und 4. Am Anfang des Versuchs befindet es sich näher an Messpunkt 3 und wandert dann beim Anfahren der Sollfüllung Richtung Messpunkt 4.

Die Differenz der in der Einstellung „Impuls“ gemessenen Werte ist in allen Messpunkten außer dem Messpunkt 5 signifikant. Die größte Differenz zwischen stufenloser Regelung und fünfstufige Steuerung ergibt sich wiederum an Messpunkt 2 ( $\Delta L_{im} = 4,10 \text{ dB(A)} \pm 0,56 \text{ dB(A)}$ ).

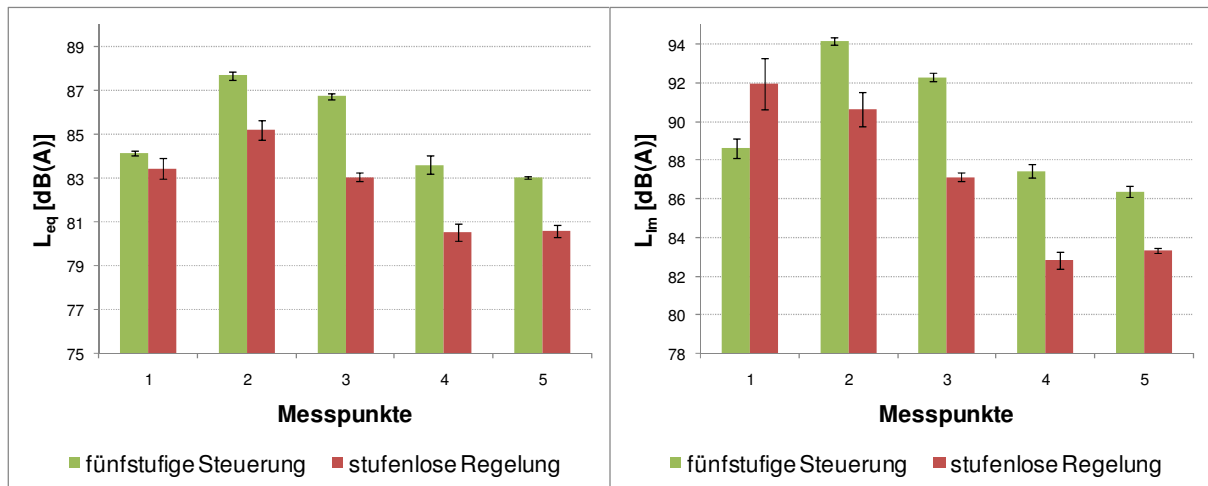


Abbildung 108: Die Diagramme basieren auf den Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine. Das System befindet sich nicht im Sollzustand. Dieser wird von der stufenlosen Regelung beziehungsweise der fünfstufigen Steuerung während der Versuchsdauer angefahren. (linkes Diagramm:  $n = 5$ ;  $\alpha = 0,05$ ), (rechtes Diagramm:  $n = 3$ ;  $\alpha = 0,05$ )

In den Diagrammen der Abbildung 108 sind die Messwerte des dritten Falls, die Schalldruckpegel nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine, dargestellt. Die Störung der vorgeschalteten Maschine dauert 30 s. Jede der Messungen erfolgte über einen Zeitraum von 90 s ab Beginn der Störung. Nach diesem Zeitraum hat die Regelung beziehungsweise Steuerung den Sollzustand des Systems wieder hergestellt.

Die Differenz des  $L_{eq}$  ist bei dieser Versuchsreihe an allen Messpunkten signifikant. An den Messpunkten 2 ( $\Delta L_{eq} = 2,48 \text{ dB(A)} \pm 0,62 \text{ dB(A)}$ ), 3 ( $\Delta L_{eq} = 3,69 \text{ dB(A)} \pm 0,33 \text{ dB(A)}$ ), 4 ( $\Delta L_{eq} = 3,08 \text{ dB(A)} \pm 0,80 \text{ dB(A)}$ ) und 5 ( $\Delta L_{eq} = 2,44 \text{ dB(A)} \pm 0,31 \text{ dB(A)}$ ) tritt dabei ein deutlicher Unterschied auf. An diesen Messpunkten ist der Schalldruckpegel der fünfstufigen Steuerung um den in Klammern angegebenen Wert höher, als jener der stufenlosen Regelung. Am Messpunkt 1 ( $\Delta L_{eq} = 0,7 \text{ dB(A)} \pm 0,58 \text{ dB(A)}$ ) ist nur ein geringer Unterschied messbar.

Bei den Impulsschalldruckpegeln fällt auf, dass die stufenlose Regelung in den Punkten 2 ( $\Delta L_{im} = 3,50 \text{ dB(A)} \pm 1,05 \text{ dB(A)}$ ), 3 ( $\Delta L_{im} = 5,17 \text{ dB(A)} \pm 0,47 \text{ dB(A)}$ ), 4 ( $\Delta L_{im} = 4,60 \text{ dB(A)} \pm 0,81 \text{ dB(A)}$ ) und 5 ( $\Delta L_{im} = 3,04 \text{ dB(A)} \pm 0,39 \text{ dB(A)}$ ) geringere Impulsschalldruckpegel erzeugt. Jedoch ist der  $L_{im}$  der fünfstufigen Steuerung am Messpunkt 1 ( $\Delta L_{im} = -3,34 \text{ dB(A)} \pm 1,84 \text{ dB(A)}$ ) signifikant niedriger, als jener der stufenlosen Regelung.

Tabelle 7: Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen ( $L_{eq}$ ) im Bereich des Pulkendes. Das Schallpegelmessgeräte wurde parallel zur Versuchsstrecke auf dem in Abbildung 105 dargestellten Messpfad bewegt. (n = 5;  $\alpha = 0,05$ )

	störungsfreier Betrieb	Lückenschluss nach einer Störung der vM	Rückstau nach einer Störung der nM
fünfstufige Steuerung	83,98 dB(A) ( $\pm 0,60$ dB(A))	85,90 dB(A) ( $\pm 0,38$ dB(A))	81,52 dB(A) ( $\pm 0,84$ dB(A))
stufenlose Regelung	79,24 dB(A) ( $\pm 0,12$ dB(A))	80,84 dB(A) ( $\pm 0,23$ dB(A))	79,18 dB(A) ( $\pm 0,31$ dB(A))
$\Delta L_{eq}$	<b>4,74 dB(A) (<math>\pm 0,72</math> dB(A))</b>	<b>5,06 dB(A) (<math>\pm 0,61</math> dB(A))</b>	<b>2,34 dB(A) (<math>\pm 1,15</math> dB(A))</b>

Tabelle 8: Ergebnisse der Impulsschalldruckpegelmessungen ( $L_{im}$ ) im Bereich des Pulkendes. Das Schallpegelmessgeräte wurde parallel zur Versuchsstrecke auf dem in Abbildung 105 dargestellten Messpfad bewegt. (n = 3;  $\alpha = 0,05$ )

	störungsfreier Betrieb	Lückenschluss nach einer Störung der vM	Rückstau nach einer Störung der nM
fünfstufige Steuerung	89,03 dB(A) ( $\pm 0,62$ dB(A))	90,97 dB(A) ( $\pm 0,79$ dB(A))	85,93 dB(A) ( $\pm 0,43$ dB(A))
stufenlose Regelung	82,67 dB(A) ( $\pm 0,56$ dB(A))	84,97 dB(A) ( $\pm 0,59$ dB(A))	83,33 dB(A) ( $\pm 0,96$ dB(A))
$\Delta L_{im}$	<b>6,36 dB(A) (<math>\pm 1,18</math> dB(A))</b>	<b>6,00 dB(A) (<math>\pm 1,38</math> dB(A))</b>	<b>2,60 dB(A) (<math>\pm 1,39</math> dB(A))</b>

In Tabelle 7 und Tabelle 8 werden die Ergebnisse der Messungen auf dem Messpfad dargestellt. Bei diesen Versuchen wurde das Schallpegelmessgerät parallel zur Versuchsstrecke auf einem Messpfad bewegt. Es wurde so ausgerichtet, dass es sich im Bereich des Behälterpulkendes befand. Dadurch wurden die Schallemissionen der auf das Pulkende treffenden Flaschen erfasst. Es ist zu erwähnen, dass aus technischen Gründen die Erfassung auf der in Flussrichtung der Behälter gesehen linken Seite des Transporteurs durchgeführt werden musste. Die Messpunkte 1 bis 5 befanden sich aber auf der rechten Seite des Transporteurs. Daher sind die Ergebnisse der beiden Messmethoden nicht direkt miteinander vergleichbar.

In allen Betriebsmodi erreichte die stufenlose Regelung im Vergleich zur fünfstufigen Steuerung geringere Schalldruckpegel im Bereich des Pulkendes. Dies zeigen die Differenzen der Schalldruckpegel  $\Delta L_{eq}$  und  $\Delta L_{im}$ . Besonders ausgeprägt sind dabei die Unterschiede nach einer Störung der vorgeschalteten Maschine und im geringeren Maße während des störungsfreien Betriebs.

Abbildung 109 zeigt eine Auswahl von Aufprallvorgängen auf das Ende des Flaschenpulks im Bereich von Messpunkt 5, aufgenommen mit der Akustischen Kamera.

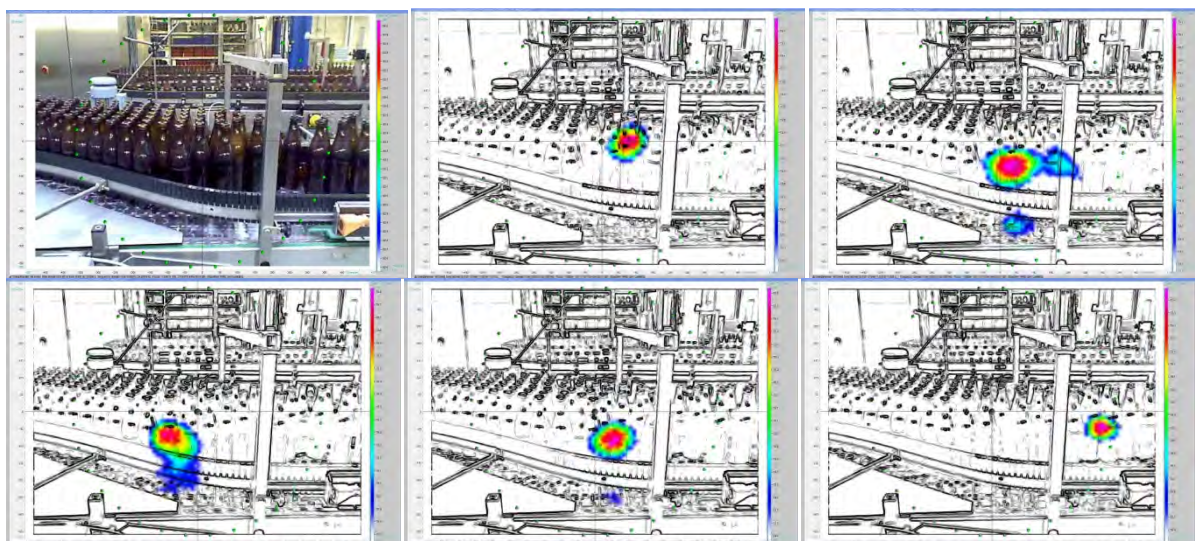


Abbildung 109: Visualisierung des Aufpralls von Flaschen auf das Pulkende an Messpunkt 5

## Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden sollen die vorgestellten Ergebnisse diskutiert und eingeordnet werden. Dabei sollen insbesondere die Ursachen für die unterschiedlichen Schalldruckpegel der beiden Steuerungs- beziehungsweise Regelungskonzepte erläutert werden. Jeder der drei oben erwähnten Fälle wird dabei einzeln betrachtet.

**Störungsfreier Betrieb:** Im störungsfreien Betrieb konnte an den Messpunkten 1, 2 und 4 die Lärmemission besonders stark reduziert werden. Die Reduktion an den Punkten 1 und 2 ist auf die bessere Anpassung der Maschinen und Bändergeschwindigkeiten der vorgeschalteten Maschine, beziehungsweise der Transportbandabschnitte eins und zwei zurückzuführen. Die stufenlose Regelung kann durch geringfügige Anpassungen Schwankungen in der Füllung des Transporteurs ausgleichen und jede eingestellte Füllung mit der richtigen Abstimmung der Maschine und Transportbänder betreiben. Die fünfstufige Steuerung reagiert mit stärkeren Eingriffen auf Abweichungen, da diese zum Zeitpunkt der Erkennung (durch wechselnde Schaltsignale der Stauschalter) schon ausgeprägter sind. Ein ähnliches Bild zeigt sich im Bereich des Pulkendes, das während der Versuche im Bereich des Messpunkts 3 und 4 liegt. Die an dieser Stelle registrierten Reduktionen des Schalldruckpegels sind auf geringere Differenzgeschwindigkeiten zwischen im Pulk geförderten Behältern und den Behältern, die im freien Transport das Pulkende erreichen, zurückzuführen. Auch hier ist eine bessere Anpassung an die aktuelle Füllung als Ursache für die Schalldruckpegelreduktion zu nennen.

Die Reduktion des Impulsschalldruckpegels im Punkt 2 wird durch eine bessere Anpassung der Differenzgeschwindigkeiten am Überschub zwischen dem ersten und zweiten Transportbandabschnitt verursacht. Die Behälter stoßen hier mit geringeren Differenzgeschwindigkeiten zusammen.

Ein weiterer Punkt, der den beiden Diagrammen zu entnehmen ist, ist die Impulshaltigkeit der Schalldruckpegel. Von einer Impulshaltigkeit eines Schallereignisses spricht man nach DIN EN ISO 11201 ab einer Differenz zwischen den Messwerten, gemessen in der Einstellung „Fast“ und „Impuls“, von 2 dB(A). Fallen diese Geräuschquellen bei einer Bestimmung der „Geräuschmissionen am Arbeitsplatz“ nach DIN 45645-2 besonders ins Gewicht, ist ein Impulzzuschlag zu dem in der Einstellung „Fast“ gemessenen Wert zu addieren, beziehungsweise die Messung in der „Impuls“ Einstellung durchzuführen. Dies verschärft die Lärmproblematik zusätzlich, da auf diese Weise die Lärmmission auf den Arbeiter höher ausfällt. Die Impulshaltigkeit der Geräusche konnte durch die stufenlose Regelung abgesenkt werden. Dies kann bei einer Ermittlung der Lärmbelastung am Arbeitsplatz Vorteile bringen.

**Störung der nachgeschalteten Maschine:** Nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine verhalten sich die Schalldruckpegel, die an den verschiedenen Messpunkten der Versuchsstrecke aufgezeichnet wurden sehr ähnlich, wie in dem oben beschriebenen Fall des störungsfreien Betriebs der Anlage. Dies ist auf die gleichen Ursachen zurückzuführen, da das Regelungs- beziehungsweise Steuerungsverhalten der beiden Konzepte bei Rückstau durch eine Störung der nachgeschalteten Maschine und störungsfreiem Betrieb sehr ähnlich ist. Der Unterschied, der sich zwischen dem störungsfreien Betrieb und der Störung der nachgeschalteten Maschine ergibt, ist die Reduktion der Ausbringung der vorgeschalteten Maschine und der Transportbandgeschwindigkeiten auf Grund einer Auslenkung der Führungsgröße (Füllung der Transportstrecke). Durch die Reduktion dieser beiden Werte ist ohnehin mit einer Reduktion des Schalldruckpegels zu rechnen. Diese tritt beim Vergleich der Werte von störungsfreiem Betrieb und dem Betrieb nach einer Störung der nachgeschalteten Maschine auch ein. Die Differenzen, die nach dieser situationsbedingten Reduzierung der Lärmemission erzielt werden können, sind daher deutlich geringer.

Der auffälligste Unterschied zwischen den beiden Versuchen ist der nach einer Störung höhere Schalldruckpegel an den Messpunkten 3 und 4. Dies ist auf die Position des Flaschenpulks zurückzuführen. Dieser befindet sich bei Beginn des Versuchslaufs im Bereich des Messpunkts 3 und wandert dann durch den Wiederanlauf der nachgeschalteten Maschine in seine Ausgangslage zwischen Messpunkt 3 und Messpunkt 4 zurück.

**Störung der vorgeschalteten Maschine:** Im Betrieb während und nach der Störung der vorgeschalteten Maschine fallen die Unterschiede zwischen den beiden Regelungs-/ Steuerungskonzepten am deutlichsten aus. Die deutlich geringeren  $L_{eq}$ -Pegel an den Messpunkten 2 bis 5 werden durch die situationsgerechte Anpassung der Geschwindigkeiten verursacht. Während die stauschalterbasierte fünfstufige Steuerung die Maschinenausbringung der vorgeschalteten Maschine erhöht und über zwei Stufen der Ausbringung und Transporteurgeschwindigkeit den Sollzustand anfährt, regelt die stufenlose Regelung bedarfsgerecht. Die Ausbringung der vorgeschalteten Maschine wird an die aktuelle Füllung angepasst und nur bei nicht belegtem Überschub zwischen Abschnitt eins und zwei beziehungsweise beim Lückenschluss zwischen Pulk und Behälterstrom gezielt erhöht. Dieses Regelverhalten vermeidet unnötige Flaschenkollisionen an den Überschüben, beziehungsweise am Ende des Flaschenpulks und fährt den Sollzustand darüber hinaus auch schneller an. Die geringere Differenzgeschwindigkeit der Behälter bei den Stößen drückt sich auch in den Impulsschalldruckpegeln der Messpunkte zwei bis fünf aus. Diese sind bei der stufenlosen Regelung deutlich niedriger, wie jene der fünfstufigen Steuerung. Der  $L_{im}$  am Messpunkt eins stellt hier eine Ausnahme dar. An dieser Stelle ist die stufenlose Regelung lauter, als die fünfstufige Steuerung. Dies ist auf eine über den abgefahrenen Geschwindigkeitsbereich nicht optimale Anpassung der Einlaufbandgeschwindigkeit zurückzuführen. Speziell beim hoch beziehungsweise herunter Regeln kommt es zum Verspringen der einreihig an der Geländerführung geführten Behälterreihe, was zu starken Schallimpulsen führt. Dies ließe sich durch eine bessere Abstimmung der Antriebe abstellen. Allerdings wurde im Rahmen dieser Arbeit darauf verzichtet, da es sich bei dem an der Versuchsanlage verbauten einbahnigen Einlauf um keine in der Praxis mehr anzutreffende Lösung der Verteilung von Flaschen handelt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die stufenlose Regelung bei den überprüften Fällen in der Lage ist die Versuchsstrecke signifikant leiser zu betreiben, als die stauschalterbasierte fünfstufige Steuerung. Besonders ins Auge fällt auch, dass die Messwerte zwischen den verschiedenen Versuchen/Betriebsmodi bei der stufenlosen Regelung deutlich weniger schwanken. So kann der in Tabelle 7 dargestellte Schalldruckpegel am Ende des Pulks bei allen Betriebszuständen in einem Bereich von ca. 80 dB(A) gehalten werden.

### **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Durch die stufenlose Regelung konnten im Vergleich zur stauschalterbasierten Regelung unter allen Transportbedingungen eine signifikante Reduzierung der Schallemissionen durch den Transporteur erzielt werden.

Fazit: Das Ziel dieses Arbeitsschritts wurde erreicht.

## **5.4 Arbeitsschritt 4: Allgemeine Arbeiten**

### **5.4.1 AS 4.1: Projektmanagement**

#### **Zielstellung**

Koordination der Arbeitsschritte zwischen den Forschungsstellen.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,00 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans von Forschungsstelle 1).

#### **Ergebnisse und Bewertung**

Über den gesamten Bewilligungszeitraum wurden die Arbeitsschritte der beiden Forschungsstellen aufeinander abgestimmt.

### **5.4.2 AS 4.2: Projektbegleitender Ausschuss**

#### **Zielstellung**

Organisation und Durchführung von vier Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses während des Bewilligungszeitraumes.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,30 Mannmonate (MM); Forschungsstelle 2 – 1,30 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans der Forschungsstellen 1 und 2).

#### **Ergebnisse**

Innerhalb des Bewilligungszeitraums wurden zwei Treffen, 27. April 2010 und am 31. August 2011, mit dem Projektbegleitenden Ausschuss durchgeführt.

### **5.4.3 AS 4.3: Leitfäden und Kataloge**

#### **Zielstellung**

Die Leitfäden sollen sämtliche notwendigen Informationen enthalten, um Messungen mit einer Akustischen Kamera nach dem Messverfahren durchzuführen beziehungsweise um die lärmreduzierende Regelungsstrategie an bestehenden Anlagen zu implementieren oder bei Neuanlagen direkt einzusetzen.

Die Leitfäden beziehungsweise Kataloge sollen parallel zum Schlussbericht veröffentlicht und der Industrie zur Verfügung gestellt werden.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,50 Mannmonate (MM); Forschungsstelle 2 – 1,50 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans der Forschungsstellen 1 und 2)

## **Ergebnisse**

Im Folgenden wird auf die erarbeiteten Leitfäden und Kataloge verwiesen. Von einer Veröffentlichung parallel zum Schlussbericht wird abgesehen. Vielmehr werden die Leitfäden und Kataloge als integraler Bestandteil dieses Schlussberichtes veröffentlicht. Dies erscheint notwendig, da der Schlussbericht wesentliche Informationen zum Verständnis sowohl der Leitfäden als auch der Kataloge bereitstellt.

### **5.4.3.1 Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen**

An dieser Stelle wird auf Arbeitsschritt AS 2.5 (siehe Abschnitt 5.2.5, ab Seite 63ff) verwiesen, der gleichzeitig den „Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen“ darstellt.

### **5.4.3.2 Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure**

Es sei hier auf die in Arbeitsschritt AS 3.5 (siehe Abschnitt 5.3.5, ab Seite 89ff) entwickelte Regelungsstrategie und Algorithmierung verwiesen. Diese entspricht in Gänze dem „Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure“.

### **5.4.3.3 Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen**

Die bei der Entwicklung des Messverfahrens gewonnenen Informationen über lärmtechnische Schwachstellen von Einzelaggregaten und ganzen Abfüllanlagen wurden in einer Übersicht zusammengestellt und anhand von Aufnahmen der Akustischen Kamera veranschaulicht. Der „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ ist im Anhang, Abschnitt 10.6, ab Seite 129ff einzusehen. Als Grundlage für den Katalog dient die in Arbeitsschritt AS 1.1 erarbeitete Aufstellung potentieller Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie (siehe Tabelle 1, auf Seite 23ff).

### **5.4.3.4 Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke**

Der „Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke“, der in Arbeitsschritt AS 3.2 (siehe Abschnitt 5.3.2) erarbeitet wurde, ist im Anhang, Abschnitt 10.7, ab Seite 165ff einzusehen.

### **5.4.3.5 Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen**

Die Ergebnisse zur Untersuchung der Schallemissionen in Abhängigkeit des Aufprallwinkels sind im Anhang, Abschnitt 10.8, ab Seite 168ff, im „Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen“ aufgeführt. Der ebenfalls in Arbeitsschritt AS 3.3 entworfene Algorithmus zur Reduzierung der Schallabstrahlung von Behältertransporteuren wird nicht im Katalog aufgeführt, da er bereits in Arbeitsschritt AS 3.5 als „Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure“ (siehe Abschnitt 5.3.5, ab Seite 89ff) eingebunden wurde.

### **5.4.3.6 Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen**

Die Ergebnisse der Literaturrecherche und der Versuche mit der Akustischen Kamera wurden bereits in Arbeitsschritt AS 3.4 (siehe Abschnitt 0, Seite 86ff) dargestellt, der gleichzeitig den „Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen“ darstellt.



## **Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse**

Die beiden Leitfäden und die vier Kataloge sind im Anhang aufgeführt und stehen wie vorgesehen der Industrie zur Verfügung.

### **5.4.4 AS 4.4: Berichterstattung**

#### **Zielstellung**

Erstellung des Zwischen- und Schlussberichtes.

#### **Wichtige Positionen im zahlenmäßigen Nachweis**

Wissenschaftlich-technisches Personal: Forschungsstelle 1 – 1,50 Mannmonate (MM); Forschungsstelle 2 – 0,75 Mannmonate (MM) (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans der Forschungsstellen 1 und 2).

#### **Ergebnisse**

Zwischen- und Schlussbericht wurden fristgerecht erstellt und an die AiF gesendet.

## 6 Gegenüberstellung von Zielsetzung und Ergebnissen

In Kapitel 5 „Verwendung der Zuwendung und Ergebnisse“, wurden die Verwendung der Zuwendung sowie die durch die Förderung erzielten Ergebnisse im Einzelnen dargestellt und jeweils den vorgegebenen Zielen gegenübergestellt. Dabei wurde auch auf die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises eingegangen: Dies sind der Einsatz von wissenschaftlich-technischem Personal und der Akustischen Kamera, als Gerät mit einem Beschaffungswert über 2.500 €. Leistungen Dritter sind in diesem Vorhaben nicht angefallen.

Im Folgenden werden die Projektziele und Ergebnisse nochmals zusammengefasst gegenübergestellt sowie die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit erläutert.

### 6.1 Zielsetzung

Der bewilligte Forschungsantrag widmet sich der Lärmreduzierung in Getränkeabfüllanlagen. Hierfür sollten zwei wesentliche Forschungsziele umgesetzt werden.

Zum Einen sollte ein neues Verfahren, auf Basis einer Akustischen Kamera, mit den folgenden Fähigkeiten entwickelt und in Form eines Leitfadens veröffentlicht werden:

- Ortsgenaue Lokalisierung von Schallemissionsquellen in Abfüllanlagen.
- Darstellung und Aufzeichnung der Bewegungen der Emissionsquellen auf den Behältertransporteuren und der zeitlichen Schallpegeländerungen.
- Abschirmung gegen, beziehungsweise Ausblenden von Störgeräuschen.
- Einsatzfähigkeit und Handhabbarkeit im Produktionsumfeld der Getränkeindustrie.

Mit diesem Messverfahren sollten lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen identifiziert und in Form eines Katalogs der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Das zweite Ziel des Forschungsprojekts war die Untersuchung und Optimierung bestehender sowie die Entwicklung neuer Maßnahmen zur Lärmreduzierung in Getränkeabfüllanlagen. Zur Umsetzung sollten:

- die lärmtechnischen Eigenschaften unterschiedlicher Behälter für Getränke bei unterschiedlichen Aufprallgeschwindigkeiten untersucht und in einem Katalog zusammengestellt werden.
- primäre und sekundäre technische Maßnahmen zur Lärmvermeidung respektive Lärmabschirmung an der Versuchsförderstrecke untersucht und ebenfalls in Katalogen zusammengestellt werden.
- eine neue Regelungsstrategie für die Behälterförderung im Pulk entwickelt werden,
  - die auf den gängigen Förderstreckentypen, möglichst ohne bauliche Veränderungen umgesetzt werden kann.
  - die eine einfache Platzierung notwendiger Sensoren und Busanbindung über Standardprotokolle ermöglicht.
  - deren Algorithmus einfach mit den gängigen Steuerungstypen (zum Beispiel Simatic S7 und Allen Bradley Control Logix) implementiert werden kann.

- die eine deutlich wahrnehmbare Lärmreduzierung erreicht, ohne die Puffereffizienz der Förderstrecken und somit die Gesamteffizienz der Getränkeabfüllanlagen wesentlich zu verringern.

## **6.2 Ergebnisse**

Das erste Forschungsziel wurde mit dem „Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen“, in Arbeitsschritt AS 2.5 umgesetzt. Die geforderten Eigenschaften des Messverfahrens konnten in den Arbeitsschritten AS 2.1 bis AS 2.4 überprüft, gegebenenfalls optimiert und bestätigt werden. Die mit diesem Messverfahren identifizierten, lärmtechnischen Schwachstellen von Abfüllanlagen wurden im „Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen“ (AS 4.3) veröffentlicht.

Das zweite Forschungsziel, die Untersuchung und Optimierung bestehender sowie die Entwicklung neuer Maßnahmen zur Lärmreduzierung in Getränkeabfüllanlagen, wurden mit dem „Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure“ (Arbeitsschritte AS 3.3, AS 3.5 und AS 3.6) und den Katalogen „Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke“ (AS 3.2), „Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen“ (AS 3.3) sowie dem „Katalog – Sekundäre Schallschutzmaßnahmen“ (AS 3.4) erreicht.

### **Fazit**

Die erzielten Ergebnisse entsprechen in allen Arbeitspaketen den Zielsetzungen des Forschungsantrages. Mit Bereitstellung der beiden Leitfäden und der Kataloge, wurden alle wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Ziele dieses IGF-Vorhabens erfolgreich umgesetzt.

**Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.**

## **6.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Die geleistete Arbeit entspricht dem begutachteten und bewilligten Antrag und war daher für die Durchführung des Vorhabens notwendig und angemessen.

## 7 Nutzen der erzielten Ergebnisse

### 7.1 Wissenschaftlich-technischer Nutzen für KMU

Aufgrund der verschärften Rechtslage durch die Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 [49] sind Getränkeabfüllbetriebe auf neue Maßnahmen zur Schallreduzierung bei ihren Abfüllanlagen angewiesen. Ihre Unternehmensgrößen ermöglichen aber nur selten eigene Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten hierzu. Die Verordnung betrifft in Deutschland rund 1.300 Brauereien (KMU-Anteil 94 %, [8]), 250 Mineralbrunnen (KMU-Anteil 92 %, [48]) und 200 Fruchtsaft-Betriebe [47]. Hinzu kommen noch zahlreiche reine Abfüllbetriebe ohne eigene Produktion und die ebenfalls fast ausschließlich mittelständisch geprägten Wein abfüllenden Betriebe. Von dem durchgeführten, vorwettbewerblichen Forschungsvorhaben kann deshalb eine Vielzahl kleinerer Abfüllbetriebe profitieren.

Der wesentliche wissenschaftlich-technische Nutzen besteht in den mit diesem Schlussbericht veröffentlichten Leitfäden und Katalogen:

- Leitfaden – Messverfahren zur Lokalisierung von Lärmquellen in Getränkeabfüllanlagen (Arbeitsschritt AS 2.5, siehe Abschnitt 5.2.5, ab Seite 63ff)
- Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategie für Behältertransporteure (Arbeitsschritt AS 3.5, siehe Abschnitt 5.3.5, ab Seite 89ff)
- Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen (Anhang, Abschnitt 10.6, ab Seite 129ff)
- Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke (Anhang, Abschnitt 10.7, ab Seite 165ff)
- Katalog – Primäre Lärmschutzmaßnahmen (Anhang, Abschnitt 10.8, ab Seite 168ff und Arbeitsschritt AS 3.3, Algorithmus zur Reduzierung der Schallabstrahlung von Behältertransporteuren, siehe Abschnitt 5.3.3 ab Seite 81ff)
- Katalog – Sekundäre Lärmschutzmaßnahmen (Arbeitsschritt AS 3.4, siehe Abschnitt 0, Seite 86ff)

### 7.2 Wirtschaftlicher Nutzen für KMU

Das Messverfahren und die stufenlose Regelung der Behälterförderstrecken werden zum Bau lärm- armer Abfüll- und Verpackungsanlagen beitragen und somit die Wettbewerbssituation des in diesem Bereich weltführenden deutschen Spezialmaschinenbaus für Abfüllanlagen weiter stärken (ca. 300 Unternehmen mit einem KMU-Anteil von über 80 % (laut Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.). Durch die neuen Grenzwerte wird die Lärmemission als Kaufkriterium für Maschinen und Anlagen noch wichtiger. Firmen, die lärmarme Maschinen und Anlagen anbieten, werden im internationalen Wettbewerb einen Vorsprung haben.

Mit dem Messverfahren steht, insbesondere für viele kleine und mittelständische Abfüllbetriebe, ein Werkzeug zur Lokalisierung lärmtechnischer Schwachstellen zur Verfügung, mit dem ergriffenen

Schallschutzmaßnahmen zudem unmittelbar validiert werden können. Die Lärmschutzmaßnahmen, zu denen auch die stufenlose Regelung der Behälterförderstrecken zählt, werden dazu beitragen, die erhebliche Lärmbelastung des Personals in Getränkeabfüllanlagen zu Reduzieren und die gesundheitlichen, wie auch wirtschaftlichen Folgen von Lärmschwerhörigkeit zu minimieren.

### **7.3 Innovativer Beitrag der Ergebnisse**

#### **Messverfahren auf Basis der Akustischen Kamera**

Das zum Einsatz kommende Messgerät, die Akustische Kamera und deren Software zur Signalauswertung, ermöglicht in dem entwickelten Messverfahren die innovative Verknüpfung von Akustik und Optik. Mit dem Messverfahren auf Basis der Akustischen Kamera ist es möglich, in Abfüllbetrieben sowohl mit einem Screening der gesamten Anlage als auch gezielt nach starken Lärmemissionen zu suchen, diese zu visualisieren, um sie schließlich beseitigen oder abschirmen zu können. Das bildgebende Verfahren bietet zudem die Möglichkeit, den Erfolg der Lärminderungsmaßnahmen unmittelbar zu kontrollieren. Das Messverfahren erlaubt zudem erstmals, Schallemissionen zeitlich und örtlich aufgelöst zu verfolgen. Dies ist vor allem beim Betrachten und Optimieren von Behälterförderstrecken wichtig, da Behälter nun als bewegliche Emissionsquellen detektiert und sichtbar gemacht werden können.

#### **Stufenlose Geschwindigkeitsregelung von Behälterförderstrecken**

In dem Forschungsvorhaben wurde ein stufenloses Konzept für die Geschwindigkeitsregelung von Behälterförderstrecken entwickelt und erfolgreich in eine Technikumsanlage implementiert. Dies ist, bei gleichbleibender Effizienz der Förderstrecke, in Bezug auf die Lärmemission eine deutliche Weiterentwicklung von Behälterförderstrecken im Vergleich zum derzeitigen Stand der Technik. Mit dieser Regelung kann in Zukunft die seit Jahrzehnten übliche, stufengeregelte Bandgeschwindigkeit von Behälterförderstrecken abgelöst werden.

### **7.4 Industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

#### **Messverfahren auf Basis der Akustischen Kamera**

Das Messverfahren kann, zum Beispiel von Ingenieur- oder Akustikbüros, als bildgebendes Verfahren ergänzend zur klassischen Schallpegelmessung angeboten werden, um Lärmquellen in Abfüllanlagen gezielt lokalisieren und beseitigen zu können. Darüber hinaus kann es vom Maschinenbau, durch gezielte lärmtechnische Optimierung einzelner Maschinenkomponenten, bereits bei der Konstruktion von Abfüllanlagen zur Anwendung kommen, um mit lärmarmen Maschinen zur Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen beizutragen.

#### **Stufenlose Geschwindigkeitsregelung von Behälterförderstrecken**

Das stufenlose Regelungskonzept kann von Unternehmen des Anlagenbaus übernommen und als innovatives Produkt zur Lärmreduzierung und somit zur kostensparenden Erfüllung gesetzlicher Bestimmungen angeboten werden. Es kann bei zukünftigen Neuanlagen Verwendung finden. Bestehende Behälterförderstrecken in Abfüllanlagen können durch das stufenlose Regelungskonzept verbessert werden. Der Austausch der Steuerungssoftware und die Umgestaltung der Sensoren können dabei zu einer Reduzierung der Lärmemission bei mindestens gleich bleibend hoher Anlageneffizienz führen.

## **8 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft**

Im Folgenden werden die bereits durchgeführten Transfermaßnahmen aufgelistet. Des Weiteren werden konkret geplante und weitere Transfermaßnahmen aufgeführt. Die Einschätzungen zur Realisierbarkeit dieser Transfermaßnahmen werden in den jeweiligen Abschnitten erläutert.

### **8.1 Bereits durchgeführten Transfermaßnahmen**

Folgende Transfermaßnahmen wurden bis zum Zeitpunkt der Schlussberichterstellung bereits realisiert:

- Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses, am 27. April 2010 in 85354 Freising.
- Sorgatz, A., Gabler, F., Voigt, T.: Low Noise Control Algorithm for Multi-lane Conveyors; 2nd International Symposium for Young Scientists and Technologists in Malting, Brewing and Distilling, 19. bis 21. Mai 2010 in 85354 Freising.
- Sorgatz, A.: Regelung und Lärmreduzierung bei Massentransporteurern; 17. Flaschenkellerseminars (Fortbildungsseminar für Getränkeabfülltechnik, 07. und 08. Dezember 2010 in 85354 Freising).
- Sorgatz, A., Gabler, F., Voigt, T.: A New Stepless Control Concept for Multi-Lane Bottle Conveyors; BrewingScience, 2010, Vol. 63, pp. 80-91.
- Sorgatz, A., Gabler, F., Voigt, T.: Low noise control algorithm for multi-lane conveyors; Journal of the Institute of Brewing, 2010, Vol. 116, Issue 4, pp.
- Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses, am 31. August 2011 in 85354 Freising.
- Wenk, G.: Einsatz einer akustischen Kamera im Umfeld einer Getränkeabfüllanlage; 18. Flaschenkellerseminars (Fortbildungsseminar für Getränkeabfülltechnik, 06. und 07. Dezember 2011 in 85354 Freising).

### **8.2 Konkret geplante Transfermaßnahmen**

Die folgenden Transfermaßnahmen sind konkret geplant und werden in den angegebenen Zeiträumen durchgeführt werden:

- Veröffentlichung des Schlussberichtes mit den Leitfäden und Katalogen auf der Internetseite der Forschungsvereinigung und der Forschungsstelle 2, in Verbindung mit einer Kurzinformation in der VLB Fachzeitschrift „Brauerei Forum“ über die Verfügbarkeit des Schlussberichts für die interessierte Öffentlichkeit in der Bundesrepublik Deutschland (voraussichtlich im Januar 2012).
- Wenk, G.: Einsatz einer akustischen Kamera im Umfeld einer Getränkeabfüllanlage; 99. Brau- und maschinentechnische Arbeitstagung der VLB Berlin vom 05. bis 07.03.2012 in 57080 Siegen.

### **8.3 Weitere Transfermaßnahmen**

Die Durchführung der folgenden Transfermaßnahmen nach Projektende ist vorgesehen. Zum jetzigen Zeitpunkt können jedoch keine Angaben zum Zeitpunkt der Durchführung gemacht werden, da dieser nicht ausschließlich im Einflussbereich der Forschungsstellen liegt.

- Mindestens eine Veröffentlichung in einer Fachzeitschriften für die Getränke-, die Verpackungs- und die Automatisierungsindustrie (zum Beispiel: „Brauwelt“, „Getränkeindustrie“, „PackReport“, „neue Verpackung“, „openautomation“).
- Präsentation der Ergebnisse auf den bekannten Veranstaltungen für Fachpublikum, wie der jährlich stattfindenden „Brau Bevale“ in Nürnberg, der Fachpack in Nürnberg oder der Interpack in Düsseldorf.

## 9 Durchführende Forschungsstellen

Das Forschungsvorhaben 16291 N wurde durchgeführt, in Zusammenarbeit von:

### **Forschungsstelle 1**

Versuchs- und Lehranstalt für Brauerei in Berlin (VLB) e.V.

Forschungsinstitut für Maschinen- und Verpackungstechnik (FMV)

Seestraße 13, 13353 Berlin (Berlin-West)

Leiter der Forschungsstelle 1: Dr.-Ing. Roland Pahl

Projektleiter: Dr.-Ing. Georg Wenk

### **Forschungsstelle 2**

Technische Universität München

Wissenschaftszentrum Weihenstephan WZW

Lehrstuhl für Lebensmittelverpackungstechnik (LVT)

Weihenstephaner Steig 22, 85350 Freising-Weihenstephan

Leiter der Forschungsstelle 2: Prof. Dr. Horst-Christian Langowski

Projektleiter: Dr.-Ing. Tobias Voigt



## 10 Anhang

### 10.1 Literaturhinweise

- 1 Anlagenplan Getränkeabfüllanlage: Ausbringung – 55.000 Fl/h. Hersteller – Krones AG. Stand – 22.02.2011.
- 2 Anlagenplan Getränkeabfüllanlage: Ausbringung – 36.000 Fl/h. Hersteller – Krones AG. Stand – 06.01.2009.
- 3 Anlagenplan Getränkeabfüllanlage: Ausbringung – ca. 50.000 Fl/h. Hersteller – KHS AG. Stand – 30.05.2007.
- 4 Anlagenplan Getränkeabfüllanlage: Ausbringung – unbekannt. Hersteller – KHS AG. Stand – ca. 2005.
- 5 BERUFGENOSSENSCHAFT HANDEL UND WARENDISTRIBUTION: Informationen zum Arbeitsschutz - Heben und Tragen. Ausgabe September 2010 : BGHW - Prävention, 2010 – Bestell-Nr. M103.
- 6 CHRISTENSEN, J.J., HALD, J.: „Beamforming“, Brüel & Kjær Technical Review, 1 – 2004.
- 7 CZUCHAJ, Jan; SLIWINSKI, Antoni; SRODECKI, Krzysztof: Noise sources and acoustic properties of workrooms in the plants of food-processing and pharmaceutical industry. in: Applied Acoustics, Vol. 62 (2001), S. 1141–1156.
- 8 DEUTSCHER BRAUER-BUND E.V. (Hrsg.): Die Deutsche Brauwirtschaft in Zahlen : Die wichtigsten Zahlen im Überblick. URL.: <http://www.brauer-bund.de/index2.html>, 10.01.2008.
- 9 FUHRMANN, Peter: Lärmreduzierung bei Getränkeanlagen, Freising.
- 10 GFAI TECH GMBH: Array-Ring 32-75. URL.: [http://www.acoustic-camera.biz/images/stories/\\_docs/Dat\\_Ring32\\_d.pdf](http://www.acoustic-camera.biz/images/stories/_docs/Dat_Ring32_d.pdf), 2011-08-09. – Firmenschrift.
- 11 GFAI E.V. – GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG ANGEWANDTER INFORMATIK E.V.: NoiseImage Help & Manual. Berlin, 2009. – Firmenschrift.
- 12 GOELZER, Berenice; HANSEN, Colin H.; SEHRNDT, Gustav A.: Occupational exposure to noise: evaluation, prevention and control.
- 13 GÖTZ, Joachim; FUHRMANN, Peter; HIERL, Andreas; HESS, Manfred; REISS, Heinz: Schallminderung im Flaschenkeller (1). in: Brauwelt, Vol. 2003, S. 1719–1723.
- 14 GÖTZ, Joachim; FUHRMANN, Peter; HIERL, Andreas; HESS, Manfred; REISS, Heinz: Schallminderung im Flaschenkeller (2). in: Brauwelt (2004), S. 66–70.
- 15 HENZE, W., LIESEGANG, M., OPPERMAN, N., RÖPKE, P. „Einfluss des Mikrofonarrays auf die Ortungsgenauigkeit – Messergebnisse eines Tests mit verschiedenen Mikrofonarrays“ in Tschöke, H. / Henze, W. (Hrsg.): Motor- und Aggregate-Akustik II, Haus der Technik Fachbuch 51, expert verlag Essen 2005.
- 16 KHS AG: KHS Anlagentechnik Simulation - Lärmprognose mit Cadna SAK, Firmenschrift, 2008.
- 17 KILIUS, H.: Der Gesundheit zuliebe. In: Getränkeindustrie (2002), Nr. 11, S. 38–4.

- 18 LIESEGANG, M.: Schallquellenortung in akustisch ungünstigen Industrieumgebungen. In: Tagungsschrift Maschinenakustik 2010 - Wettbewerbsvorteil durch geräuscharme Produkte. Leonberg : VDI Wissenforum, 2010.
- 19 MAUE, J.: Bestimmen der Lärmexposition an Arbeitsplätzen – Messstrategien und Messunsicherheit. In: Sicherheitsingenieur (2006), Nr. 5, S 12–17.
- 20 MÖSER, Michael: Technische Akustik. 8. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2009.
- 21 Nickel, Willi: Schallpegelmesser, Aufbau, Wirkungsweise, Eichpflicht und Genauigkeiten. Brüel & Kjær (Juni 2010) – Firmenschrift.
- 22 Norm DIN EN 61252: Elektroakustik, Anforderungen an Personenschallexposimeter (Mai 2003).
- 23 Norm DIN EN 61672-1 Oktober 2003. Elektroakustik Schallpegelmesser Teil 1: Anforderungen; Teil 2: Baumusterprüfung (August 2004); Teil 3: Periodische Einzelprüfung (Entwurf Februar 2005).
- 24 Norm DIN EN ISO 3744 November 2009. Bestimmung der Schallleistungspegel von Geräusquellen aus Schalldruckmessungen.
- 25 Norm DIN EN ISO 9612 September 2009. Akustik – Bestimmung der Lärmexposition am Arbeitsplatz – Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 (Ingenieurverfahren).
- 26 OSIPOV, P.: Akustische Kamera - Praxisbericht zu Erfahrungen aus Messungen an Getriebemotoren. Ein innovatives Messsystem für Geräuschanalyse.
- 27 PROBST, Wolfgang: Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Handlungsanleitung für die Praxis Lärminderung - Getränkeabfüllung. Lärmarme Flaschentransportsysteme, Dortmund.
- 28 PROBST, Wolfgang: Geräuschemissionswerte von ausgewählten Maschinengruppen (Holzverarbeitung-, Gießerei-, Getränkeabfüll- und Industrienähmaschinen). 1. Aufl. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW GmbH, 2003 – Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Forschungsbericht Fb 978.
- 29 PROBST, Wolfgang: Geräuschemission von Getränkeabfüllanlagen und Maßnahmen zur Lärminderung. 1. Aufl. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag NW GmbH, 1977 – Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Unfallforschung: Forschungsbericht Nr. 172.
- 30 PROBST, Wolfgang: Physikalische Modellvorstellungen und Bausteine zur numerischen Beschreibung der Schallausbreitung.
- 31 PROBST, Wolfgang: Planung lärmarmer Transportsysteme für Flaschen und Gläser, Bremerhaven.
- 32 PROBST, Wolfgang: Schallabsorbierende Bauteile. Anforderungen und Prüfverfahren, Bremerhaven.
- 33 PROBST, Wolfgang: Schallabstrahlung und Schallausbreitung. Berechnungsmodelle u. Schallleistungsbestimmung, Bremerhaven.
- 34 PROBST, Wolfgang: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [1], Bremerhaven.
- 35 PROBST, Wolfgang: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [2], Bremerhaven.
- 36 PROBST, Wolfgang: Schallausbreitung in Arbeitsräumen/ [3]. Einbeziehung von Richtwirkung, Abschirmung, großen Maschinen und gekoppelten Räumen, Bremerhaven.

- 37 PINTA ACOUSTIC GMBH: pinta WAFFEL DÄMM. URL.: [http://www.pinta-elements.com/x\\_acoustic/content/e62/e66/e4995/pinta\\_waffel\\_daemm\\_0311\\_ger.pdf](http://www.pinta-elements.com/x_acoustic/content/e62/e66/e4995/pinta_waffel_daemm_0311_ger.pdf), 2010-08-19. – Firmenschrift.
- 38 RADANDT, S.: Analyse des Lärmproblems im Flaschenkeller der Brauerei. Dissertation, TU München, Fachbereich für Brauwesen und Lebensmitteltechnologie, 1975.
- 39 RICHARDS, E. J.; LENZI A.; CUCHIERI, J.: On the prediction of impact noise. VI: Distribution of acceleration noise with frequency with application to bottle impacts. in: Journal of Sound and Vibration, Vol. 90 (1983), S. 59–80.
- 40 Richtlinie 2002/44/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002, Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Vibrationen) (16. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG).
- 41 Richtlinie 2003/10/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Februar 2003; Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm), erschienen im Amtsblatt der Europäischen Union am 15.2.2003.
- 42 SHANNON, Claude Elwood: Communication in the Presence of Noise. Nachdruck in: Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 2 (Februar 1998), S. 447-457.
- 43 SENGPIEL, Eberhard: Berechnen der Schallgeschwindigkeit c in Luft und die wirksame Temperatur. URL.: <http://www.sengpielaudio.com/Rechner-schallgeschw.htm>, 2011-08-29.
- 44 SENGPIEL, Eberhard: Die psychoakustische Lautstärke (Lautheit). URL.: <http://www.sengpielaudio.com/TabelleDerSchallpegel.htm>, 2011-08-29.
- 45 SIVAK, R.F.: Noise Control Design for Packaging, Vol. 19 (1982), S. 115–121.
- 46 Unfallverhütungsvorschrift Lärm, Berufsgenossenschaftliche Vorschrift für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit BGV B3, vom 1. Januar 1990, aktualisierte Fassung Januar 2005.
- 47 VERBAND DER DEUTSCHEN FRUCHTSAFT-INDUSTRIE E. V. (VdF) (Hrsg.): Die Branchenstruktur der deutschen Fruchtsaft-Industrie. URL.: [http://www.fruchtsaft.net/index.php?menu\\_sel=13&menu\\_sel2=3&menu\\_sel3=&menu\\_sel4=&msg=45](http://www.fruchtsaft.net/index.php?menu_sel=13&menu_sel2=3&menu_sel3=&menu_sel4=&msg=45), 10.01.2008.
- 48 VERBAND DEUTSCHER MINERALBRUNNEN E.V. (Hrsg.): Willkommen beim VDM. URL.: <http://www.vdm-bonn.de/>, 10.01.2008.
- 49 Verordnung zur Umsetzung der EG-Richtlinie 2002/44/EG und 2003/10/EG zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibration, erschienen im Bundesgesetzblatt Jahrgang 2007 Teil I Nr. 8 am 8.3.2007.
- 50 WOOD, Richard; HILL, John: Noise Control in Breweries. In: MBAA Technical Quarterly, Vol. 15 (1978), S. 232–235.

## 10.2 Abkürzungen und Symbole

AB	Anti-Block-Puffer
$\alpha_{\max}$	Maximaler vertikaler Kippwinkel der akustischen Abschirmung
amo	Dateiformat von Noiselmage, Acoustic Movie
AS	Anti-Starve-Puffer
avi	Dateiformat, Audio Video Interleave
$c$	Schallgeschwindigkeit
CAD	Computer Aided Design
dB	Dezibel
dB(A)	Dezibel (A-Bewertung)
DLZ	Drucklose Behälterzusammenführung
$E_M$	Effektivwert über die gesamte Messdauer
EPP	Enhanced Parallel Port
$E_S$	Effektivwert der Schallkarte
$f$	Frequenz in Hertz
Fl/h	Flaschen pro Stunde
FRM	Flaschenreinigungsmaschine
Hz	Hertz (Frequenz) = 1 / Sekunde
jpg	Dateiformat, Joint Photographic Experts Group
kg	Kilogramm
KMU	Kleinere und mittlere Unternehmen
L:B	Verhältnis Länge zu Breite
Lfd.Nr.	Laufende Nummer
$L$	Schalldruckpegel
$L_{\text{eq}}$	Energie-äquivalente Dauerschallpegel (Zeitbewertung 'Fast', Zeitkonstante: 125 ms)
$L_{\text{EX},8\text{h}}$	Tages-Lärmexpositionspegels
$L_{\text{Im}}$	Energie-äquivalente Dauerschallpegel (Zeitbewertung 'Impuls')
$L_{\text{pA}}$	Emissions-Schalldruckpegel am Arbeitsplatz des Bedieners
$L_{\text{pC,peak}}$	Spitzenschalldruckpegel
$L_{\text{WA}}$	Schalleistungspegel der gesamten Maschine
m	Meter
$M_S$	Maximalwert in der dargestellten Schallkarte
MSL	Maximum-Sidelobe-Level

$N$	Newton
$N$	Anzahl
Nr.	Nummer
$p$	Schalldruck
$p_0$	atmosphärischen Ruhedruck
Pa	Pascal
$s$	Abtastrate (Sampling rate in S/s)
$s$	Sekunde
$S$	Strecke
$S$	Sample
$t$	Zeit
$T$	Integrationszeit
$\vartheta$	Temperatur

### 10.3 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Messpfade beim Hüllflächen-Verfahren nach .....	8
Abbildung 2: A-, B-, C- und D-Filterkurven .....	10
Abbildung 3: Prinzip der Richtungsanalyse eines „Delay and Sum“-Beamforming-Systems.....	12
Abbildung 4: Beispiel für die Richtwirkung eines Beamforming-Arrays mit Haupt- / Nebenkeule .....	12
Abbildung 5: Inneres Aluminiumgerüst und U-Profileschienen auf der Rückseite.....	14
Abbildung 6: Vorderseite der akustischen Abschirmung und Unterlegscheiben .....	14
Abbildung 7: Vorder- und Rückseite der akustischen Abschirmung.....	15
Abbildung 8: L-Profil mit Schnellwechselplatte.....	15
Abbildung 9: Befestigung der Akustischen Kamera an der Abschirmung.....	16
Abbildung 10: Steckverbindung zwischen Ring-Array und Abschirmung .....	16
Abbildung 11: Stativ SABA ST100 mit Rollen und Zugseil .....	17
Abbildung 12: Maximaler vertikaler Kippwinkel $\alpha_{\max}$ der Akustischen Kamera mit Abschirmung.....	17
Abbildung 13: Messwagen – Bedienerseite und Rückseite .....	18
Abbildung 14: Schallkarte.....	19
Abbildung 15: CAD-Plan der Pilotanlage .....	20
Abbildung 16: Qualitatives Modell einer Getränkeabfüllanlage.....	29
Abbildung 17: Mittlere Richtcharakteristik von Füllmaschinen .....	30
Abbildung 18: Ring-Array mit USB-Kamera auf Stativ.....	32
Abbildung 19: Fingerschuppen vor dem Ring-Array – ohne Abschirmung .....	33
Abbildung 20: Fingerschuppen hinter dem Ring-Array – ohne Abschirmung.....	33
Abbildung 21: Fingerschuppen hinter dem Ring-Array – mit Abschirmung.....	34
Abbildung 22: In Abbildung 19 bis Abbildung 21 dargestellte Peaks.....	34
Abbildung 23: Kanaldaten des Motors mit Klickgeräusch des Kalibriertesters .....	36
Abbildung 24: Kanaldaten des Motors mit Klickgeräusch und Reflektion an der Abschirmung.....	36
Abbildung 25: Antrieb und Klicker und Grundgeräusch des Antriebs .....	36
Abbildung 26: Klickgeräusch und Reflektion.....	37
Abbildung 27: Versuchsaufbau mit Antrieb der Flaschentransportstrecke als Schallquelle .....	40
Abbildung 28: Schallkarte ohne Vorverstärkung mit $\Delta = 0,1$ dB und $\Delta = 1,0$ dB .....	40
Abbildung 29: Schallkarte mit 21 dB Vorverstärkung und 42 dB Vorverstärkung .....	40
Abbildung 30: Kanaldaten des intermittierenden Geräusches vor und nach der A-Bewertung .....	43
Abbildung 31: Emissionsort des ersten und zweiten Peaks des intermittierenden Geräusches.....	43
Abbildung 32: Getriebemotor der Flaschenzuführung zur Flaschenreinigungsmaschine .....	44
Abbildung 33: Dominante Lärmquellen bei geschlossenem und geöffnetem Schallschutztor .....	44
Abbildung 34: Spektrum der aufgezeichneten Kanaldaten bei geschlossenem Schallschutztor.....	44
Abbildung 35: Motorengeräusch im Frequenzbereich um 8.000 Hz .....	45
Abbildung 36: Schallemissionsquelle an der Kasten-Umlenkung .....	45
Abbildung 37: Schallquelle im Vordergrund und außerhalb des Bildbereichs.....	45
Abbildung 38: Provisorischer Arbeitsplatz .....	47
Abbildung 39: Test der Akustischen Kamera mit Aktivlautsprechern im Freifeld .....	49
Abbildung 40: Mit Audio Sweep Generator erzeugte Tonfolge.....	50
Abbildung 41: Skizze Versuchsaufbau und Kamerapositionen .....	50
Abbildung 42: Test der Akustischen Kamera und Abschirmung mit Aktivlautsprechern .....	51
Abbildung 43: Originalbild der USB-Kamera mit den Lautsprechern L1 und L2A, Positionsskizze .....	51
Abbildung 44: Lautsprecher L1 und L2A sind aktiv .....	52

Abbildung 45: Lautsprecher L1 und L2B sind aktiv.....	53
Abbildung 46: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv.....	53
Abbildung 47: Nur Lautsprecher L2E ist aktiv .....	54
Abbildung 48: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv, L2E wird abgeschirmt .....	54
Abbildung 49: Lautsprecher L1 und L2E sind aktiv, L2E wird abgeschirmt .....	55
Abbildung 50: Nur Lautsprecher L2E ist aktiv, jedoch hinter der Abschirmung .....	56
Abbildung 51: Lautsprecher L1 und L2C sind aktiv.....	56
Abbildung 52: Lautsprecher L1 und L2C sind aktiv (links), nur Lautsprecher L2C ist aktiv (rechts).....	57
Abbildung 53: Untersucher Antrieb im Teilstück der Flaschentransportstrecke.....	60
Abbildung 54: Position <i>Ab</i> in 3,2 m Entfernung zum Antrieb .....	61
Abbildung 55: Position <i>Bc</i> in 2,8 m Entfernung zum Antrieb .....	61
Abbildung 56: Position <i>Dd</i> in 3,0 m Entfernung zum Antrieb .....	61
Abbildung 57: Position <i>Fc</i> in 2,8 m Entfernung zum Antrieb .....	61
Abbildung 58: Position <i>Gb</i> in 3,2 m Entfernung zum Antrieb .....	62
Abbildung 59: Position <i>Cb</i> in 1,4 m Entfernung zum Antrieb.....	62
Abbildung 60: Position <i>Db</i> in 1,0 m Entfernung zum Antrieb .....	62
Abbildung 61: Position <i>Eb</i> in 1,4 m Entfernung zum Antrieb.....	62
Abbildung 62: Messaufbau – gesamt .....	65
Abbildung 63: Messaufbau – Stativkopf.....	65
Abbildung 64: ① Kalibriertester (Klicker), ② Ring-Array .....	66
Abbildung 65: Kippschalter am Datenlogger und ③ EPP am Datenlogger .....	66
Abbildung 66: Screenshot der Aufnahmeeinstellungen .....	67
Abbildung 67: Screenshot der aufgenommenen Kanaldaten mit Video-Vorschaufenster ② .....	68
Abbildung 68: Abstand Kalibriertester – 0,5 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung) .....	69
Abbildung 69: Abstand Kalibriertester – 1,5 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung) .....	69
Abbildung 70: Abstand Kalibriertester – 5,0 m (links: Originalbild, rechts: Konturerkennung) .....	69
Abbildung 71: Ausrichtung des Ring-Arrays (links) zum beobachteten Objekt (rechts).....	70
Abbildung 72: Ausrichtung des Ring-Arrays (links) zum beobachteten Objekt (rechts).....	70
Abbildung 73: „Project Manager“ mit abgeschlossenen und offenen Projekten .....	72
Abbildung 74: Einstellung für die akustischen 2D Filme – „Dataview Properties“ .....	73
Abbildung 75: Einstellung für die akustischen 2D Filme – „Photo2D – Non Real-Time Mode“ .....	73
Abbildung 76: Berechnung eines akustischen 2D Films über die Funktion „Movie2D (Template)“ .....	74
Abbildung 77: Schnappschüsse aus Filmen der automatisierten Verarbeitung .....	75
Abbildung 78: Kanaldatenansicht zur untersuchten Maschine in Abbildung 77 .....	75
Abbildung 79: Spektrum der untersuchten Maschine in Abbildung 77 .....	76
Abbildung 80: Spektrogramm der untersuchten Maschine in Abbildung 77.....	76
Abbildung 81: Schnappschüsse einer Flaschenzusammenführung .....	77
Abbildung 82: Maschine „2“ im Frequenzbereich 2.072 Hz bis 2.094 Hz und 6.236 Hz bis 6.240 Hz... 78	
Abbildung 83: Maschine „1“ im Frequenzbereich 2.058 Hz bis 2.105 Hz und 6.203 Hz bis 6.279 Hz... 78	
Abbildung 84: CAD-Plan des Versuchsrundläufers vor dem Umbau.....	80
Abbildung 85: Schallemissionen von NRW-Flaschen dar .....	81
Abbildung 86: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Starve-Puffer .....	82
Abbildung 87: Schematische Abbildung des Systems für einen Anti-Block-Puffer .....	84
Abbildung 88: Zuführtisch zur Flaschenaufgabe mit geschlossenem Schallschutztor .....	87
Abbildung 89: Flaschenaufgabe mit geöffnetem Schallschutztor.....	87
Abbildung 90: Flaschenaufgabe mit geschlossenem Schallschutztor .....	88

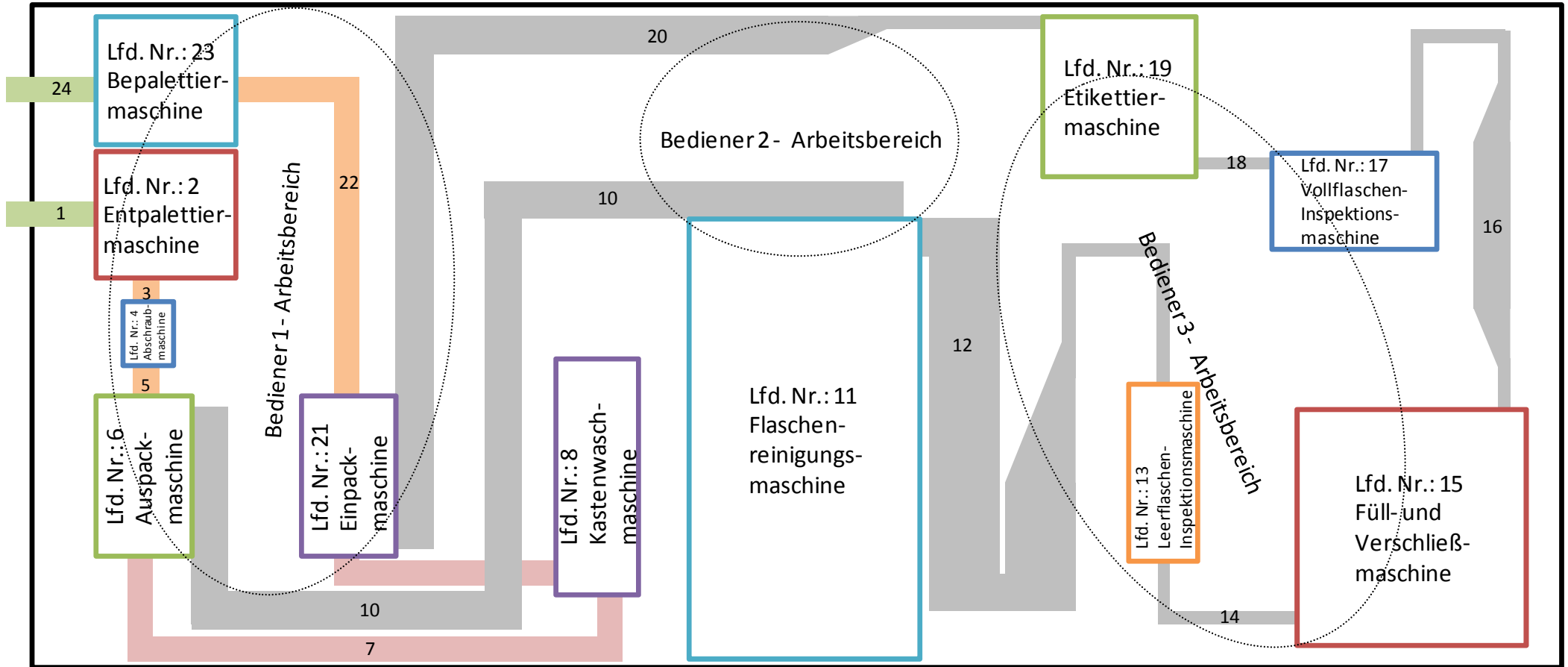
Abbildung 91: Spalt und Öffnung in der Schallschutzverkleidung einer Sortieranlage .....	88
Abbildung 92: Schallemission durch den Spalt, beim Einsetzen der Flaschen in den Sortiertisch .....	89
Abbildung 93: Schallemission durch die Öffnung beim Einsetzen der Flaschen in die Kästen .....	89
Abbildung 94: Skizze des betrachteten Systems mit jeweils einem Transportbandabschnitt.....	91
Abbildung 95: Flowchart des Hauptprogramms .....	92
Abbildung 96: Regelkreis für den kontinuierlichen Betrieb des Anti-Starve-Puffers (AS I) .....	93
Abbildung 97: Rückstau auf dem Puffer, durch einen Stillstand der nachgeschalteten Maschine .....	94
Abbildung 98: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Starve-Betrieb .....	94
Abbildung 99: Flowchart für den Rückstaumodus im Anti-Block-Betrieb.....	95
Abbildung 100: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Starve-Betrieb.....	98
Abbildung 101: Beide Behälterströme befinden sich auf dem gleichen Transportbandabschnitt.....	99
Abbildung 102: Vorderer und hinterer Behälterstrom auf unterschiedl. Transporteurabschnitten....	99
Abbildung 103: Hintere Behälterstrom komplett in Pulk am Transporteursende übergegangen.....	100
Abbildung 104: Flowchart für den Lückenschlussmodus im Anti-Block-Betrieb .....	101
Abbildung 105: Darstellung der Versuchsstrecke mit verbauter Sensorik .....	104
Abbildung 106: Messungen während des störungsfreien Betriebs der Versuchsanlage.....	104
Abbildung 107: Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der nachgeschalteten Maschine...	105
Abbildung 108: Messungen nach einer 30 s dauernden Störung der vorgeschalteten Maschine .....	106
Abbildung 109: Visualisierung des Aufpralls von Flaschen auf das Pulkende an Messpunkt 5 .....	107
Abbildung 110: NRW-Flasche – leer .....	165
Abbildung 111: NRW-Flasche – gefüllt .....	165
Abbildung 112: Longneck Flasche – leer .....	166
Abbildung 113: Longneck Flasche – gefüllt .....	166
Abbildung 114: Aufprallwinkel 34,5°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten) .....	168
Abbildung 115: Aufprallwinkel 27,0°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten) .....	169
Abbildung 116: Aufprallwinkel 19,9°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten) .....	169

## 10.4 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Aufstellung potentieller Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie.....	23
Tabelle 2: Effektivwerte des Antriebs ohne und mit Abschirmung .....	37
Tabelle 3: Amplifiziereinstellungen und Effektivwerte im Versuchsaufbau.....	41
Tabelle 4: Messwerte Schallpegelmessgerät Brüel & Kjær, Typ 2236 .....	60
Tabelle 5: Messwerte Akustische Kamera.....	60
Tabelle 6: Mögliche Aufnahmedauer in Abhängigkeit der Samplingrate .....	67
Tabelle 7: Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen ( $L_{eq}$ ) im Bereich des Pulkendes .....	107
Tabelle 8: Ergebnisse der Impulsschalldruckpegelmessungen ( $L_{im}$ ) im Bereich des Pulkendes.....	107
Tabelle 9: Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen.....	130
Tabelle 10: Visualisierung von Behälterstößen in Abhängigkeit der Bandgeschwindigkeit .....	167
Tabelle 11: Maximalwerte $M_5$ und Effektivwerte in Abhängigkeit des Aufprallwinkels.....	168



### 10.5 Detaildarstellung des qualitativen Gesamtmodell einer idealisierten Getränkeabfüllanlage



## 10.6 Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen

Die bei der Entwicklung des Messverfahrens gewonnenen Informationen über lärmtechnische Schwachstellen von Einzelaggregaten und ganzen Abfüllanlagen wurden in der folgenden Übersicht in Tabelle 9 zusammengestellt und anhand von Aufnahmen der Akustischen Kamera veranschaulicht. Als Grundlage für diesen Katalog dient die in Arbeitsschritt AS 1.1 erarbeitete Aufstellung potentieller Schallquellen in Abfüllanlagen der Getränkeindustrie (siehe Tabelle 1, auf Seite 23ff). Aggregate und Emissionsquellen, die im Rahmen von AS 2.3 nicht untersucht werden konnten, wurden nicht in den Katalog übernommen.

Die Bilder sind in der Konturdarstellung abgebildet, um die farbliche Darstellung der Schallkarte vor einem dunklen Hintergrund zu ermöglichen und um gleichzeitig die Aufnahmen zu anonymisieren. Bei den Aufnahmen wurde ein Schwellwert von 75 dB(A) eingestellt, so dass Lärmquellen, die diesen Wert nicht erreichen, nicht in der Schallkarte dargestellt werden.

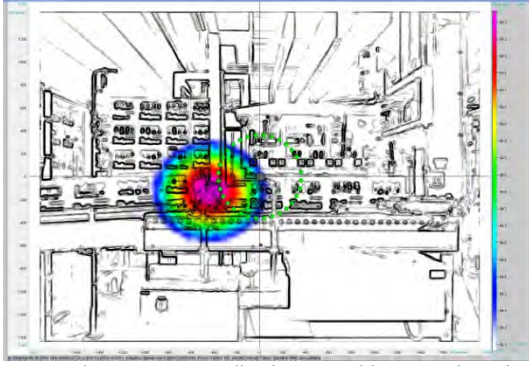
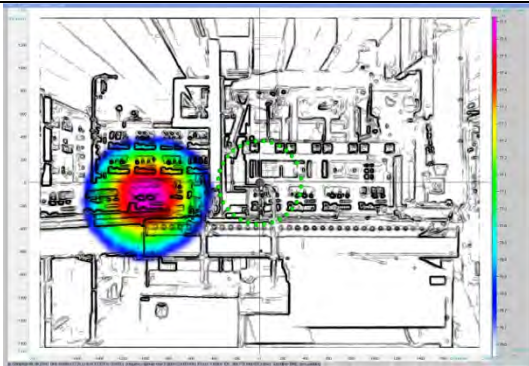
Abkürzungen im Kopf der Tabelle 9:

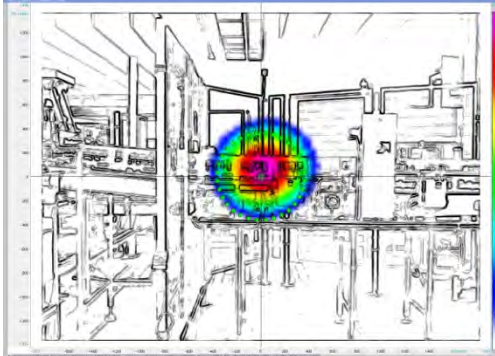
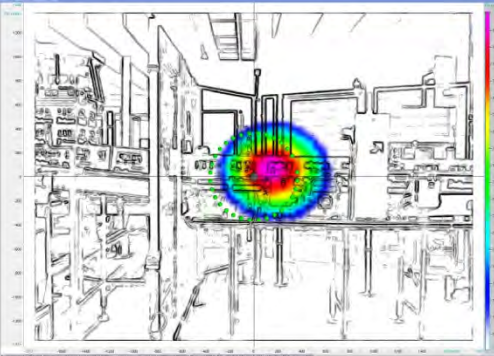
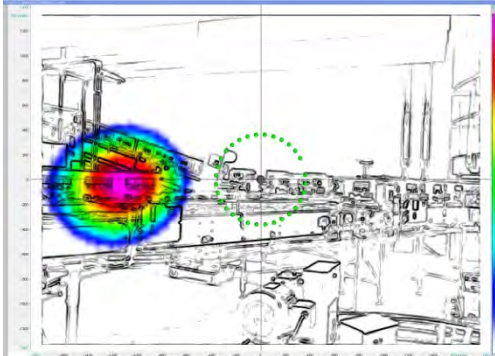
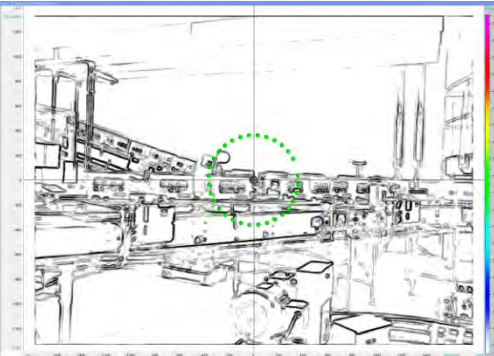
- $M_S$  = Maximalwert in der dargestellten Schallkarte
- $E_S$  = Effektivwert der Schallkarte (Integrationszeit = 125 ms, Algorithmus: RMS)
- $E_M$  = Effektivwert über die gesamte Messdauer (Integrationszeit = Messdauer (4 s bis 16 s), Algorithmus: RMS)

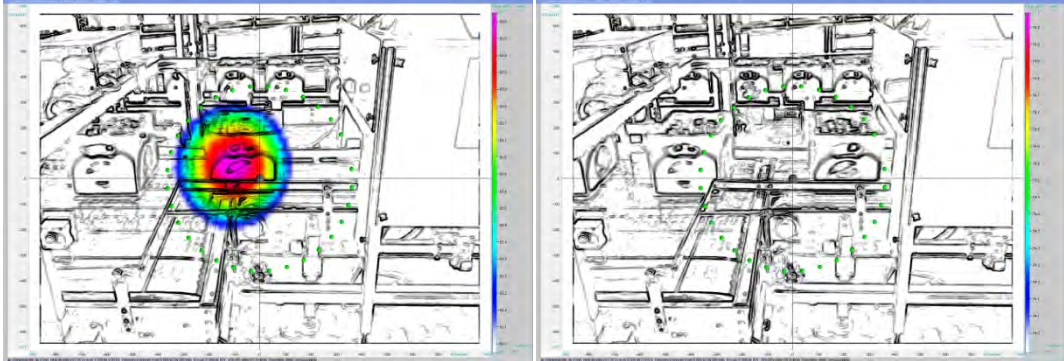
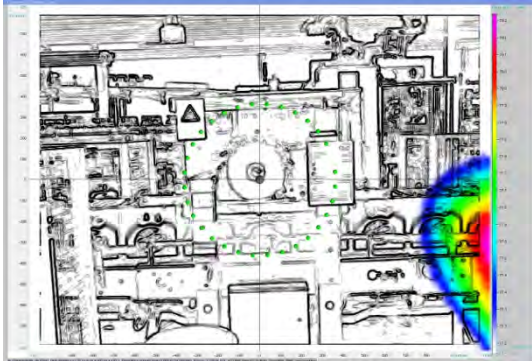
Anmerkung: Die Akustische Kamera zeigt die lauteste Stelle auf einer Schallkarte.  $M_S$ ,  $E_S$  und  $E_M$  sind nicht mit den angegebenen Schalleistungspegeln  $L_{WA (50.000 \text{ Fl/h})}$  und Emissions-Schalldruckpegeln  $L_{pA (50.000 \text{ Fl/h})}$  vergleichbar.

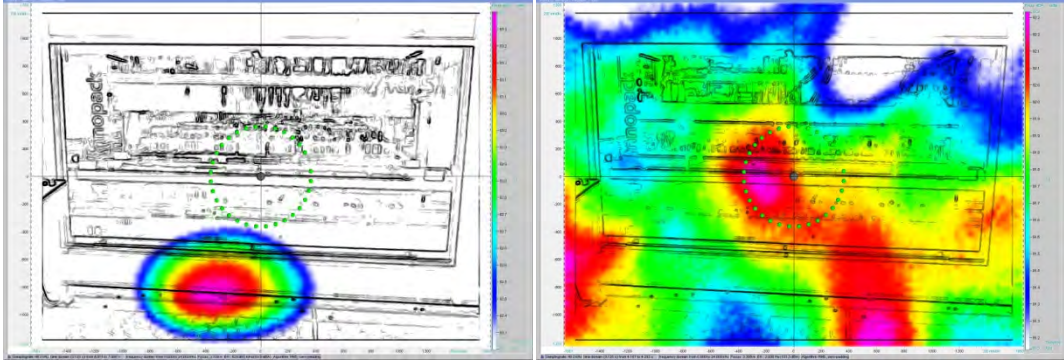
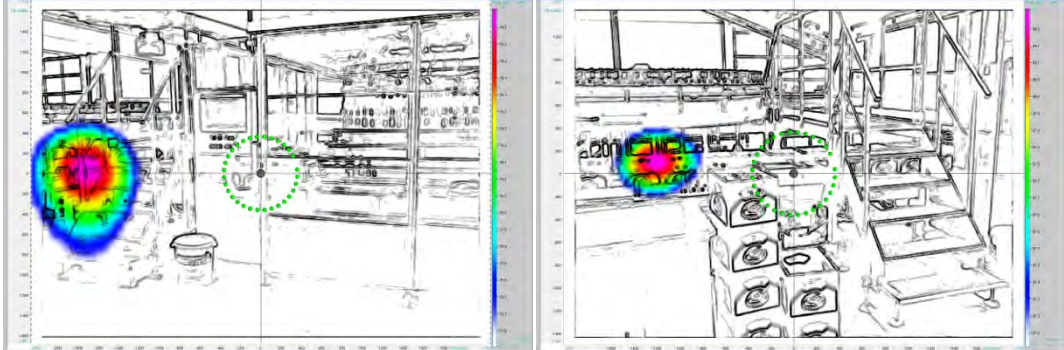
- $L_{1(85 \%)}$  = Der angegebene Schalleistungspegel  $L_{WA (50.000 \text{ Fl/h})}$  beziehungsweise Emissions-Schalldruckpegel  $L_{pA (50.000 \text{ Fl/h})}$  ist bei 85 % der untersuchten Maschinen kleiner oder gleich dem angegebenen Pegel.
- $L_{2(15 \%)}$  = Der angegebene Schalleistungspegel  $L_{WA (50.000 \text{ Fl/h})}$  beziehungsweise Emissions-Schalldruckpegel  $L_{pA (50.000 \text{ Fl/h})}$  ist bei 15 % der untersuchten Maschinen kleiner oder gleich dem angegebenen Pegel.

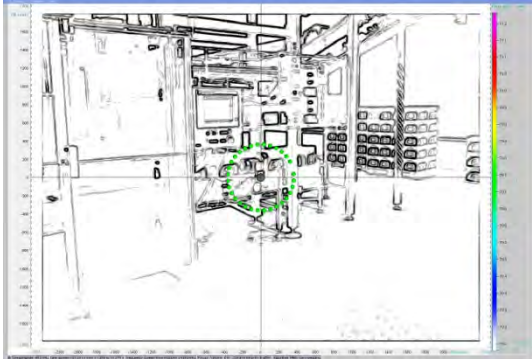
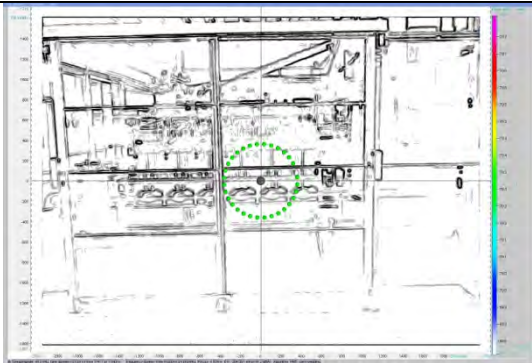
Tabelle 9: Katalog – Lärmtechnische Schwachstellen in Abfüllanlagen


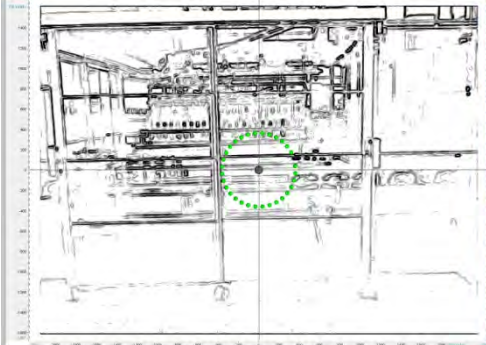
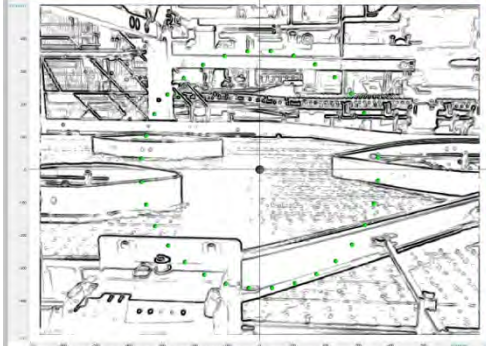
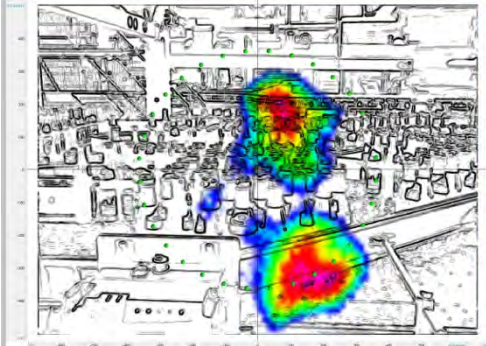
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>s</sub> E <sub>s</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
1	Transportstrecke Paletten (Zur Entpalettierung)	1.1	Transport	 <p>Angetriebene Transportrollen beim Beschleunigen der Palette</p>	Links: 85,3 dB(A) 88,7 dB(A) 84,6 dB(A) 4,0 m				[28]
2	Entpalettiermaschine	2.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			95,0 dB(A)	93,5 dB(A)	92,0 dB(A)	[28]
		2.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			85,0 dB(A)	83,5 dB(A)	82,0 dB(A)	[28]
		2.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Gleiten der Kästen auf Transportrollen - Rollengeräusche</p>	Links: 77,6 dB(A) 85,3 dB(A) 84,8 dB(A) 4,0 m				[1, 2, 3, 4]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen		M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
3	Transportstrecke Kasten (Entpalettierung zur Abschraubmaschine)	3.2	Rückstauzonen			Links: 80,1 dB(A) 85,4 dB(A) 84,8 dB(A) 3,8 m  Rechts: 76,3 dB(A) 84,8 dB(A) 84,4 dB(A) 3,8 m			[28, 29]	
		3.3	Überschübe			Links: 79,5 dB(A) 83,5 dB(A) 83,9 dB(A) 3,7 m  Rechts: 72,5 dB(A) 82,8 dB(A) 84,5 dB(A) 3,7 m			[1, 2, 3, 4]	

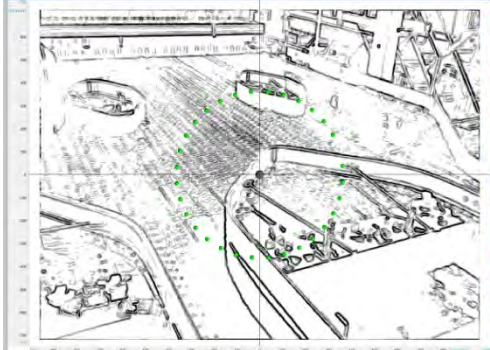
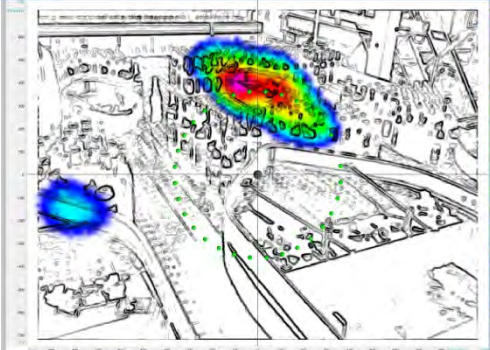
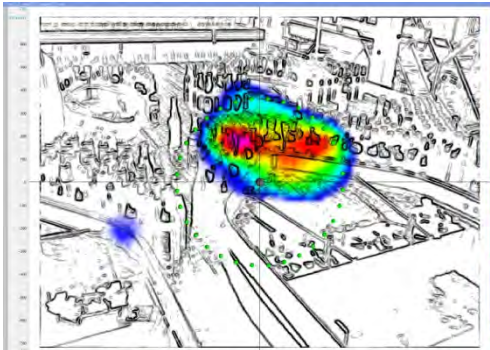
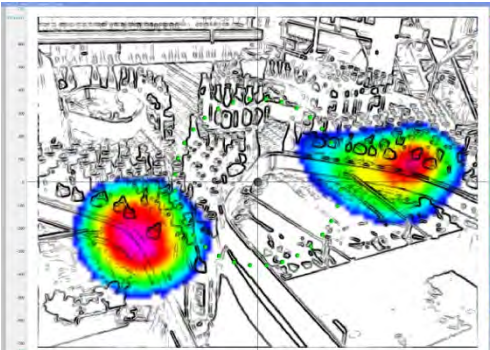
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		3.3	Überschübe	 <p>Kasten auf Überschub: Kasten wird in Schwingung versetzt    Kein Kasten auf Überschub</p>	Links: 83,0 dB(A) 87,5 dB(A) 86,1 dB(A) 1,8 m  Rechts: 74,9 dB(A) 85,5 dB(A) 86,1 dB(A) 1,8 m				[1, 2, 3, 4]
4	Abschraubmaschine	4.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			109,0 dB(A)	106,0 dB(A)	103,0 dB(A)	[28]
		4.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			91,0 dB(A)	88,0 dB(A)	85,0 dB(A)	[28]
		4.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Dominante Lärmquelle: Antrieb rechts neben dem Aggregat</p>	Links: 78,2 dB(A) 87,5 dB(A) 89,8 dB(A) 2,2 m				[1, 2, 3, 4]
6	Auspackmaschine	6.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			104,0 dB(A)	103,0 dB(A)	102,0 dB(A)	[28]
		6.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			86,5 dB(A)	85,3 dB(A)	84,0 dB(A)	[28]

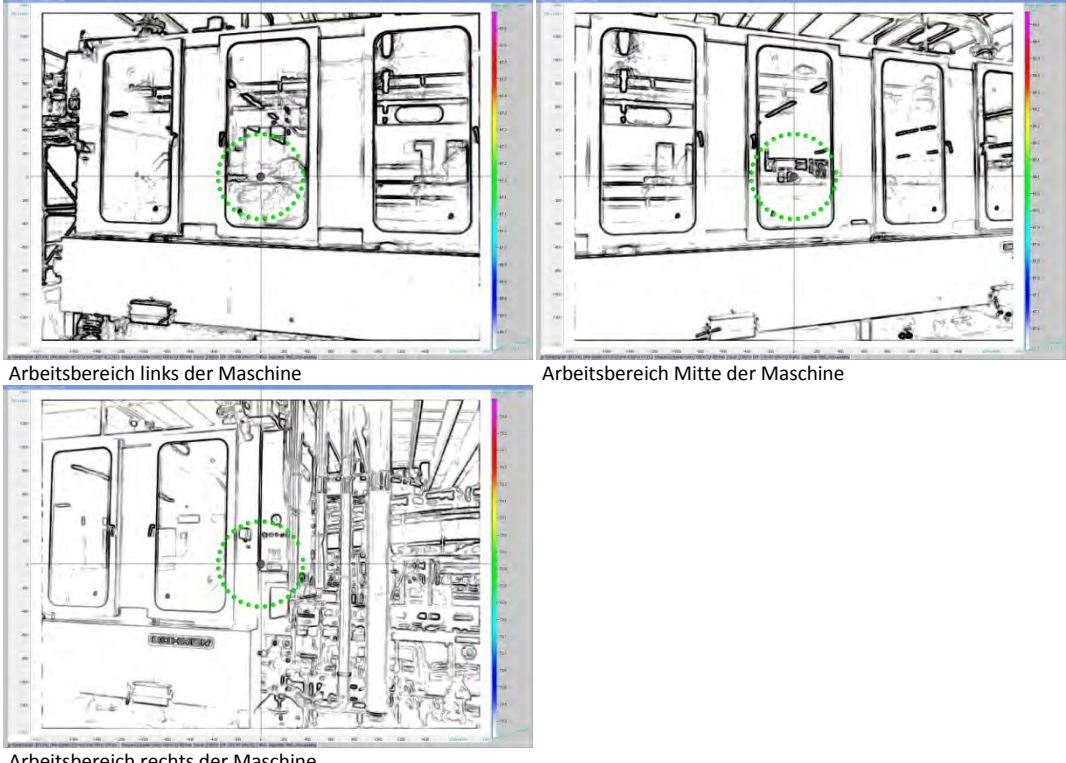
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		6.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Kastenstoß beim Stoppen der Kästen hinter der Verkleidung    Reflektion an der Schallschutzwand, Quelle unbekannt</p>	Links: 83,3 dB(A) 89,8 dB(A) 83,4 dB(A) 3,3 m  Rechts: 92,2 dB(A) 103,3 dB(A) 105,5 dB(A) 3,3 m			[1, 2, 3, 4]	
		6.4	Kasteneinlauf	 <p>Kastenstoß    Kastenstoß</p>	Links: 76,6 dB(A) 80,9 dB(A) 78,6 dB(A) 4,5 m  Rechts: 88,2 dB(A) 90,6 dB(A) 83,3 dB(A) 4,0 m			[1, 2, 3, 4]	

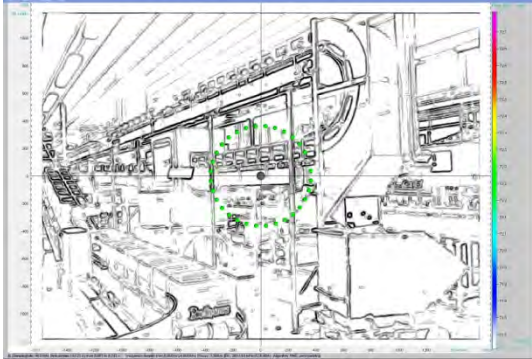
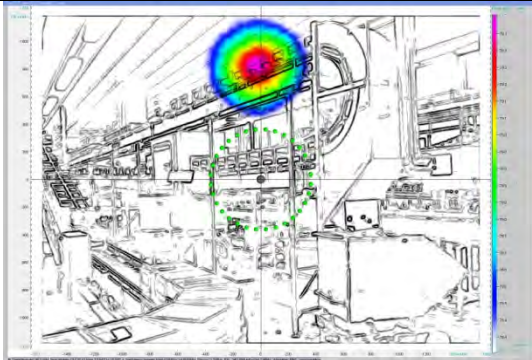
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		6.5	Kastenauslauf	 <p>Kein Kastenstoß</p>	Links: 71,2 dB(A) 81,6 dB(A) 81,8 dB(A) 5,0 m				[1, 2, 3, 4]
		6.6	Heben der Flaschen		Links: 70,8 dB(A) 80,2 dB(A) 79,7 dB(A) 4,5 m				[28, 29]

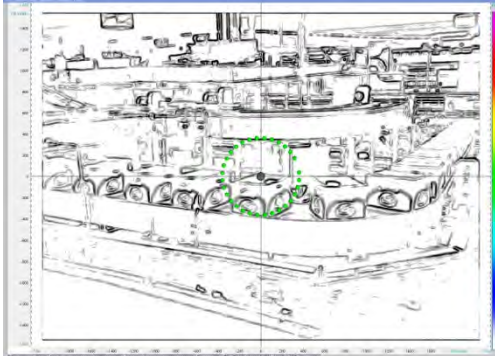
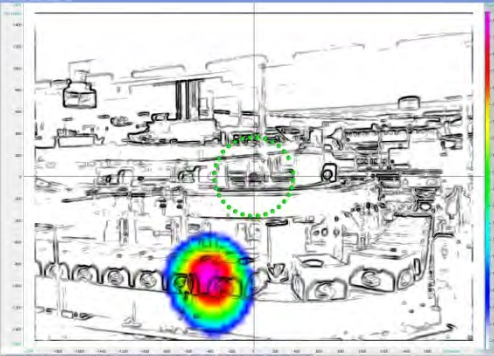
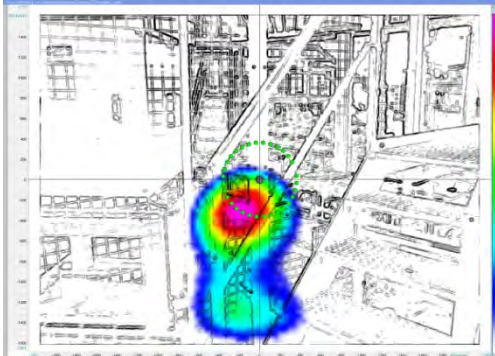
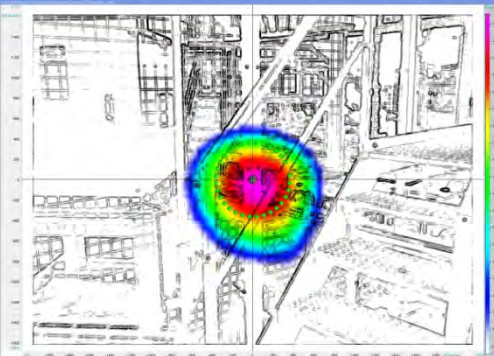
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen		M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		6.7	Absetzen der Flaschen			Links: 72,7 dB(A) 80,9 dB(A) 85,4 dB(A) 2,0 m  Rechts: 71,3 dB(A) 78,4 dB(A) 79,7 dB(A) 4,5 m				[28, 29]
		6.8	Ausschub der Flaschen			Links: 73,6 dB(A) 84,2 dB(A) 82,4 dB(A) 1,4 m  Rechts: 80,3 dB(A) 88,1 dB(A) 87,4 dB(A) 1,4 m				[28, 29]
				Flaschenauslauf im Leerlauf	Flaschenstoß an Bande im Flaschenauslauf					

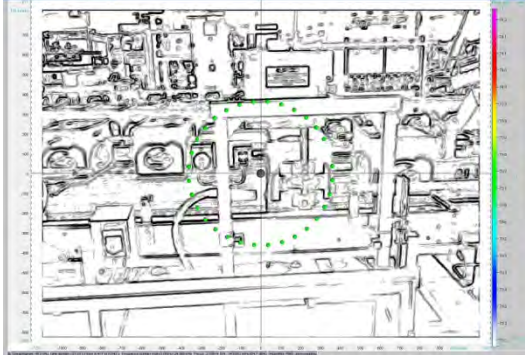
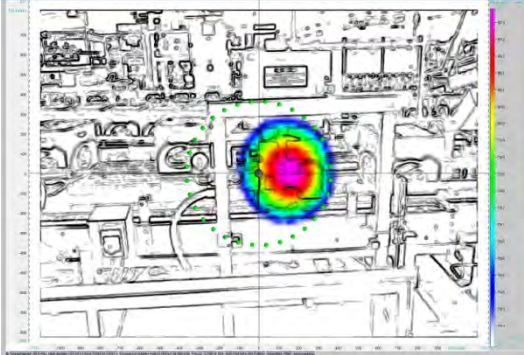
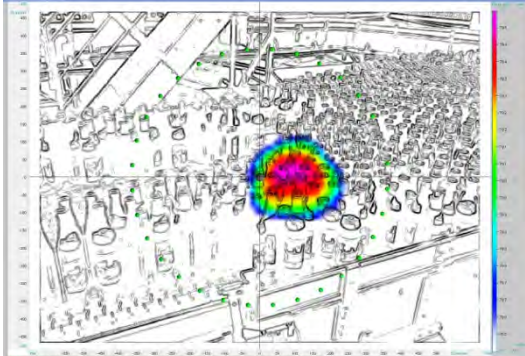


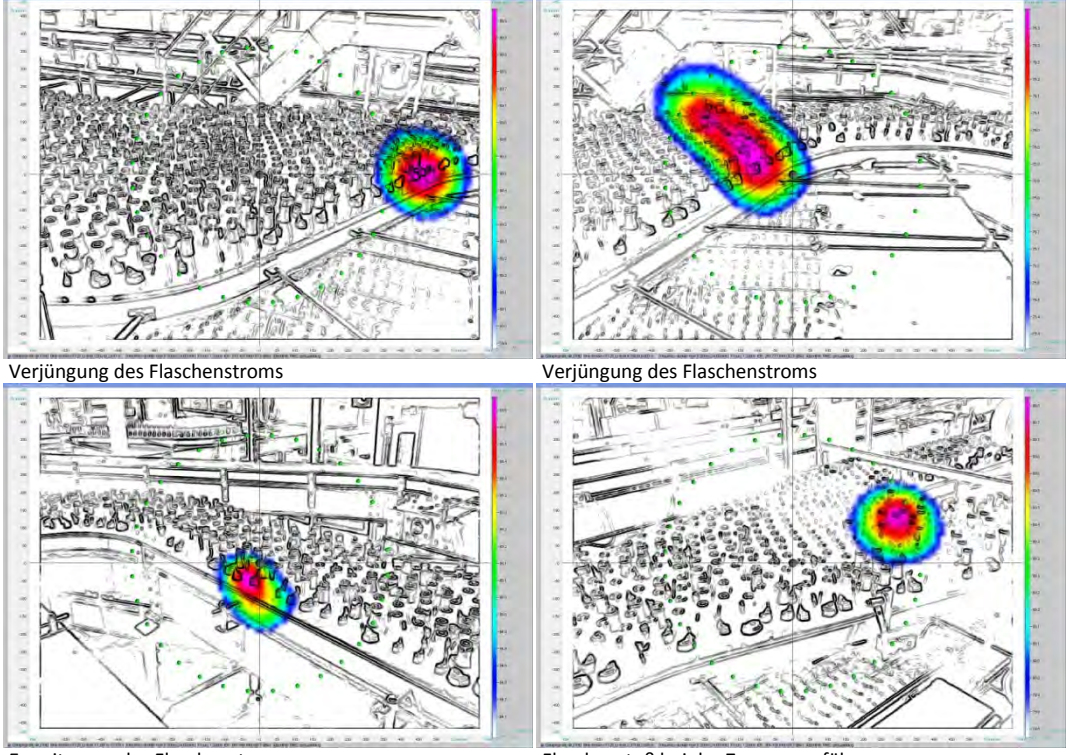
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		6.8	Ausschub der Flaschen	    <p>Flaschenauslauf im Leerlauf</p> <p>Flaschenstoß an Bande im Flaschenauslauf</p> <p>Flaschenstoß an Bande im Flaschenauslauf</p> <p>Flaschenzusammenführung</p>	<p>Links: 68,7 dB(A) 79,5 dB(A) 85,4 dB(A) 2,0 m</p> <p>Rechts: 80,3 dB(A) 88,7 dB(A) 85,4 dB(A) 2,0 m</p> <p>Links: 77,0 dB(A) 84,3 dB(A) 85,4 dB(A) 2,0 m</p> <p>Rechts: 75,9 dB(A) 83,2 dB(A) 85,4 dB(A) 2,0 m</p>				[28, 29]
8	Kastenreinigungsmaschine	8.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			---	---	---	[1, 2, 3, 4]
		8.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			---	---	---	[1, 2, 3, 4]

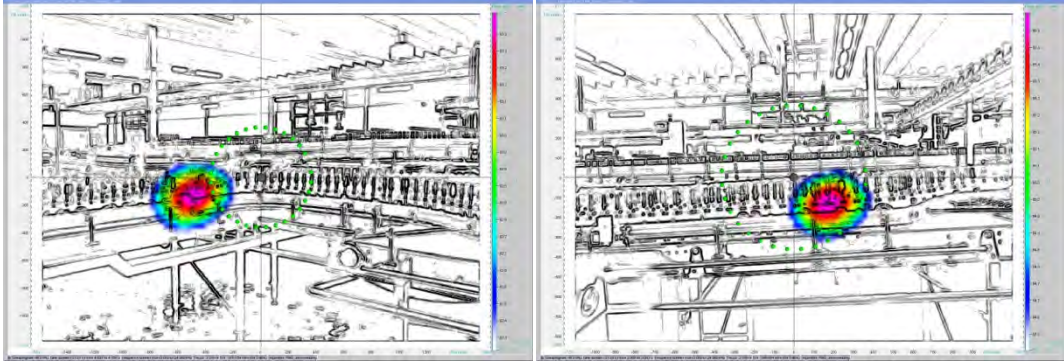
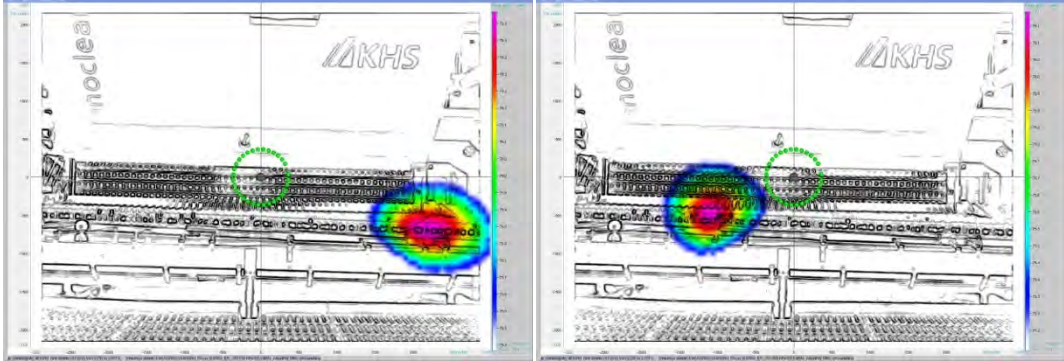
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		8.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Arbeitsbereich links der Maschine</p> <p>Arbeitsbereich Mitte der Maschine</p> <p>Arbeitsbereich rechts der Maschine</p>	<p>Links: 67,6 dB(A) 77,7 dB(A) 78,1 dB(A) 3,9 m</p> <p>Rechts: 68,5 dB(A) 76,3 dB(A) 76,1 dB(A) 3,9 m</p> <p>Links: 73,4 dB(A) 82,1 dB(A) 82,1 dB(A) 3,9 m</p>				[1, 2, 3, 4]

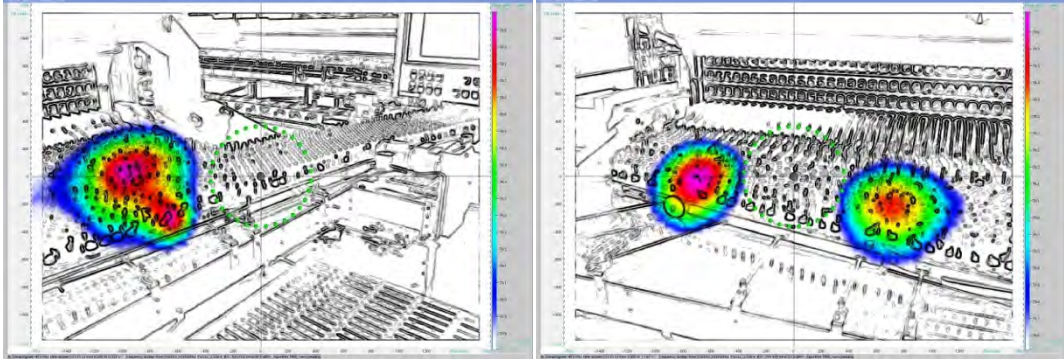
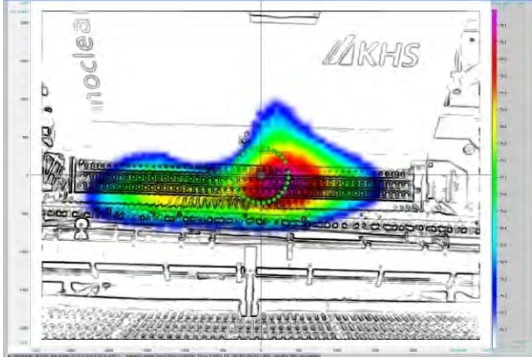
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		8.4	Umlenkung der Kästen	 <p>Umlenkung stets mit Kästen gefüllt</p>	Links: 72,7 dB(A) 82,6 dB(A) 83,4 dB(A) 3,3 m				[1, 2, 3, 4]
		8.5	Rückstauzonen	 <p>Kastenstoß</p>	Links: 79,4 dB(A) 84,7 dB(A) 83,4 dB(A) 3,3 m				[1, 2, 3, 4]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen		M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
9	Transportstrecke Kasten (Kastenwaschmaschine zur Einpackmaschine)	9.2	Rückstauzonen			Links: 71,1 dB(A) 81,6 dB(A) 82,5 dB(A) 4,3 m  Rechts: 79,5 dB(A) 84,4 dB(A) 81,8 dB(A) 4,2 m				[1, 2, 3, 4]
		9.3	Überschübe			Links: 76,1 dB(A) 83,8 dB(A) 83,8 dB(A) 4,5 m  Rechts: 78,5 dB(A) 84,1 dB(A) 83,3 dB(A) 4,5 m				[1, 2, 3, 4]

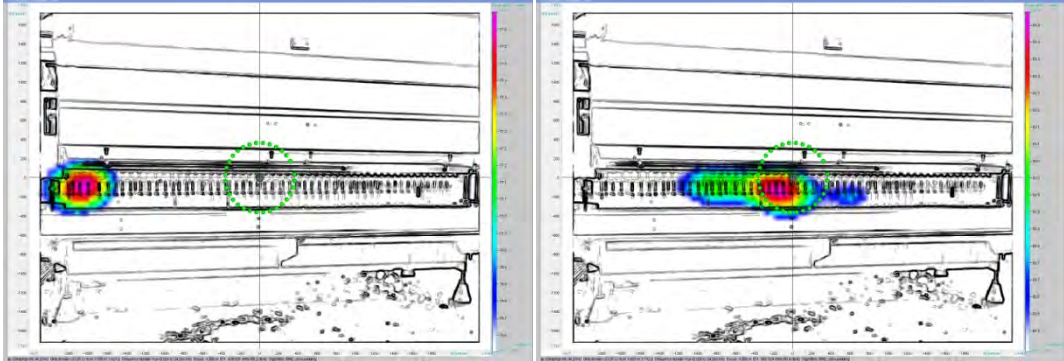
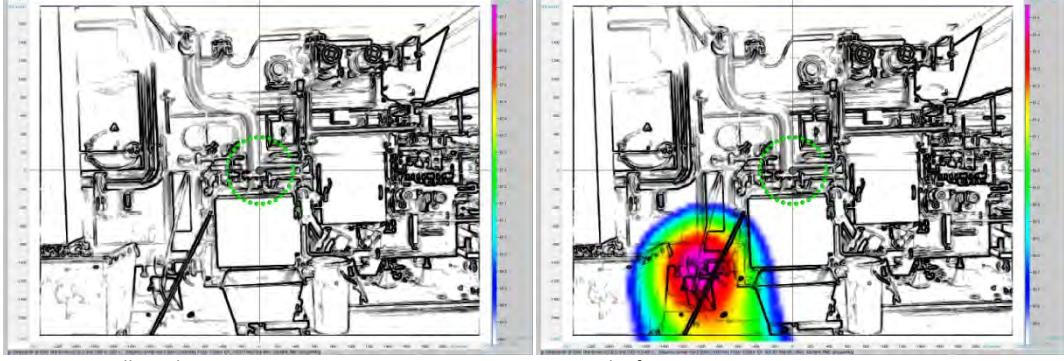
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		9.3	Überschübe	 <p>Kastenweiche ohne Pushen</p>  <p>Kastenweiche mit Pushen eines Kastens</p>	Links: 74,2 dB(A) 84,7 dB(A) 85,4 dB(A) 2,3m Rechts: 80,3 dB(A) 86,0 dB(A) 85,4 dB(A) 2,3 m			[1, 2, 3, 4]	
10	Transportstrecke Flaschenpulk (Auspackmaschine zur Flaschenreinigungsmaschine)	10.1a	Aufholpunkte am Pulkende		Links: 79,5 dB(A) 85,9 dB(A) 82,5 dB(A) 1,3 m			[29]	

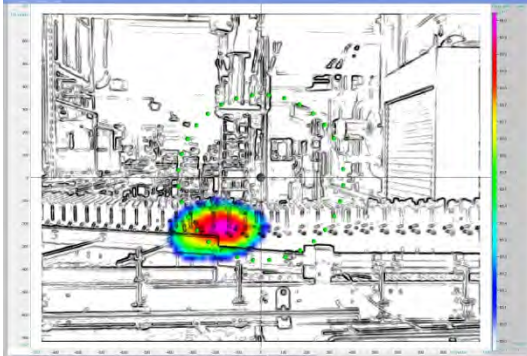
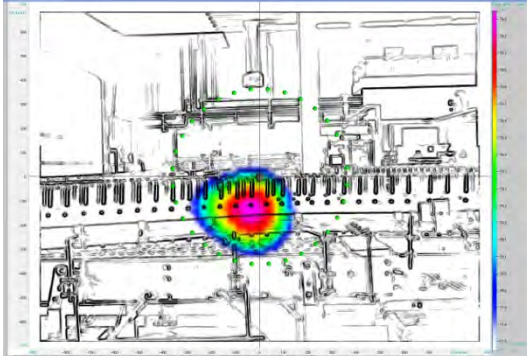
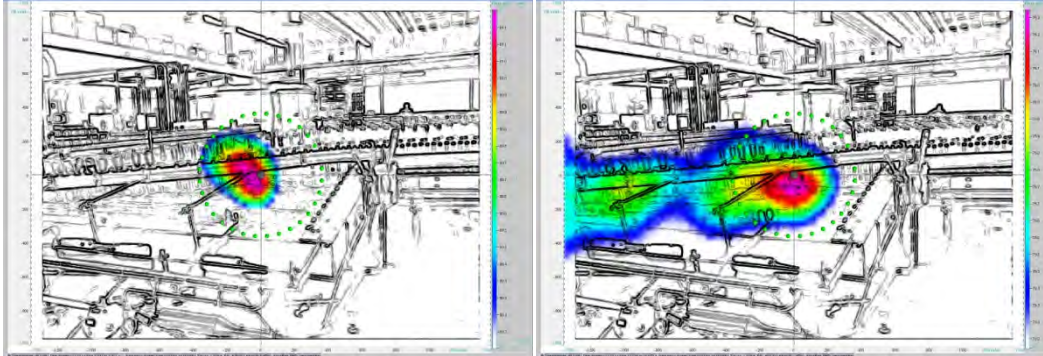
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		10.1c	Zusammenführung des Flaschenpulk	 <p>Verjüngung des Flaschenstroms</p> <p>Verjüngung des Flaschenstroms</p> <p>Erweiterung des Flaschenstroms</p> <p>Flaschenstoß bei der Zusammenführung</p>	<p>Links: 80,9 dB(A) 87,5 dB(A) 85,4 dB(A) 1,3 m</p> <p>Rechts: 76,4 dB(A) 82,5 dB(A) 85,4 dB(A) 1,3 m</p> <p>Links: 85,6 dB(A) 90,7 dB(A) 85,4 dB(A) 1,3 m</p> <p>Rechts: 80,8 dB(A) 85,7 dB(A) 85,7 dB(A) 1,3 m</p>				[29]

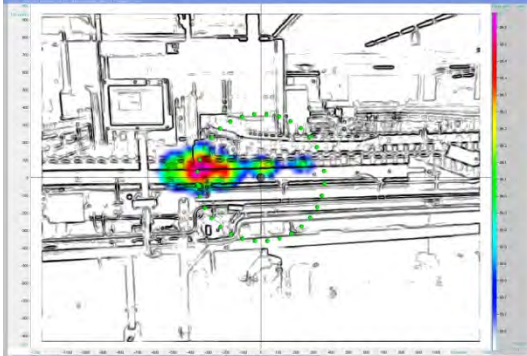
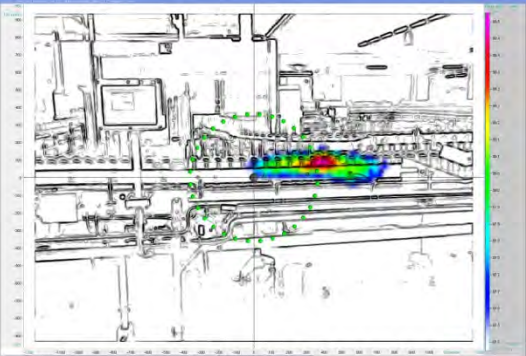
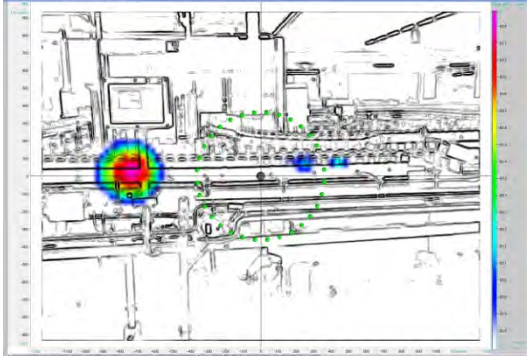
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen	
		10.1d	Überschübe des Flaschenpulk	 <p>90° Umlenkung mit Überschub      Parallelüberschub</p>	Links: 83,4 dB(A) 89,2 dB(A) 85,8 dB(A) 3,3 m  Rechts: 85,5 dB(A) 89,5 dB(A) 87,5 dB(A) 2,3 m				[1, 2, 3, 4]	
11	Flaschenreinigungsmaschine	11.1	Schalleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine				96,0 dB(A)	94,3 dB(A)	92,5 dB(A)	[28]
		11.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener				86,0 dB(A)	84,3 dB(A)	82,5 dB(A)	[28]
		11.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Breiter Zulaufstisch ermöglicht geringe Bandgeschwindigkeit auf dem Flaschentisch</p>	Links: 76,4 dB(A) 85,3 dB(A) 83,1 dB(A) 6,0 m  Rechts: 76,1 dB(A) 83,9 dB(A) 83,1 dB(A) 6,0 m				[1, 2, 3, 4, 28, 29]	

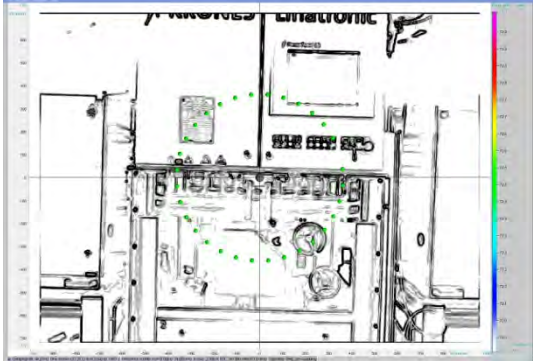
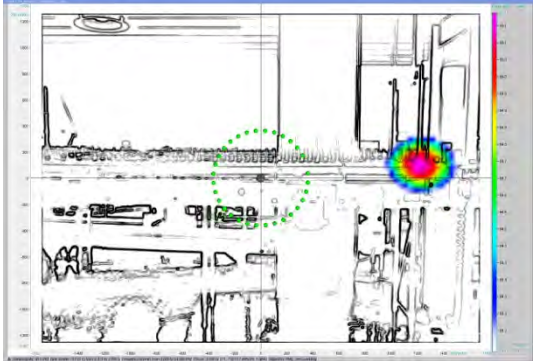
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		11.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Verschiebevorgänge auf dem Zulaufstisch am Einlauf mit höherer, am Ende mit geringerer Differenzgeschwindigkeit</p>	Links: 76,9 dB(A) 86,5 dB(A) 84,5 dB(A) 3,3 m  Rechts: 76,6 dB(A) 83,9 dB(A) 81,5 dB(A) 3,3 m				[1, 2, 3, 4, 28, 29]
		11.4	Flaschenaufgabe	 <p>Einschub der Flaschen in die Körbe, keine Flaschenbewegung auf dem Zulaufstisch</p>	Links: 76,1 dB(A) 85,1 dB(A) 83,1 dB(A) 6,0 m				[28, 29]

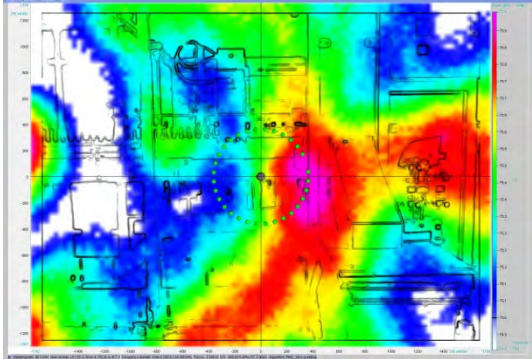
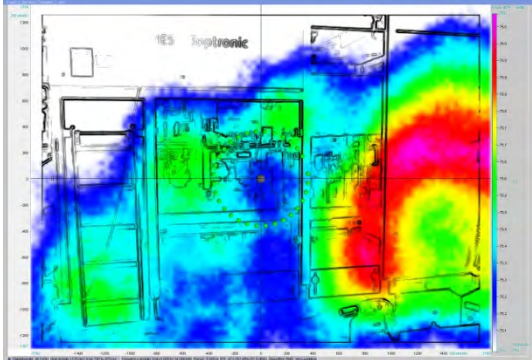


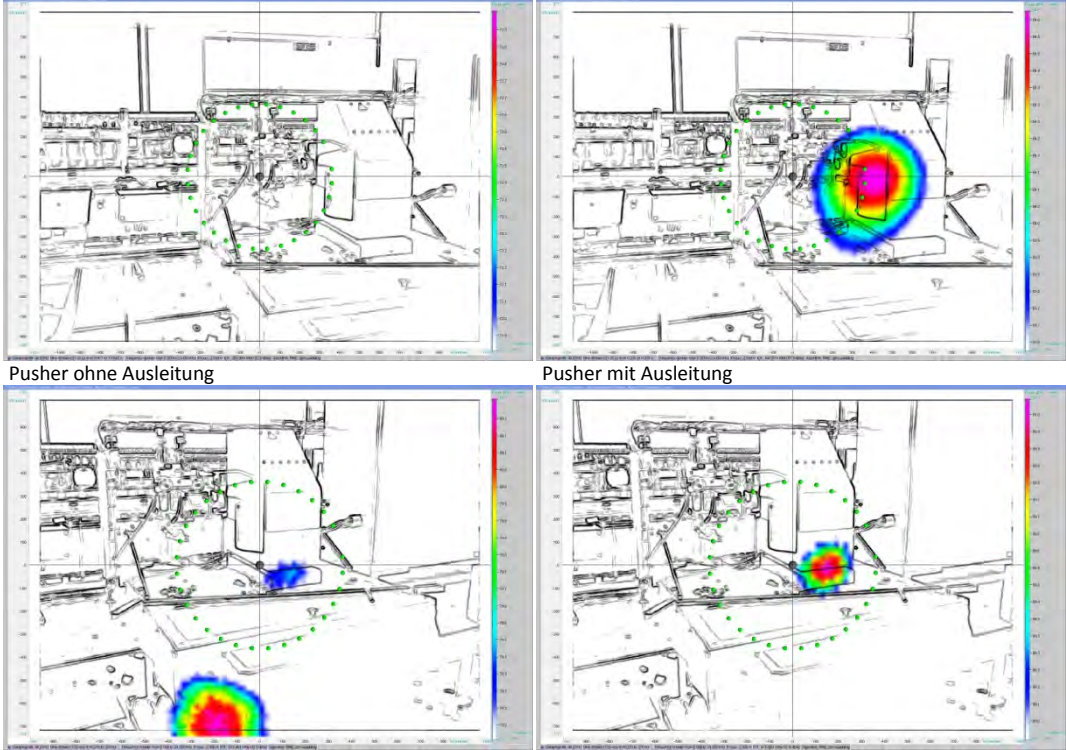
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		11.5	Flaschenabgabe	 <p>Transportketten stoppen, bevor die nächste Reihe Flaschen ausgeschoben wird</p>	Links: 77,6 dB(A) 86,2 dB(A) 86,4 dB(A) 4,8 m  Rechts: 83,4 dB(A) 90,4 dB(A) 86,4 dB(A) 4,8 m				[28, 29]
		11.6	Antriebe und Pumpen	 <p>Pumpe im Stillstand                      Pumpe läuft an</p>	Links: 67,7 dB(A) 76,6 dB(A) 81,0 dB(A) 5,0 m  Rechts: 81,5 dB(A) 86,1 dB(A) 81,0 dB(A) 5,0 m				[1, 2, 3, 4]

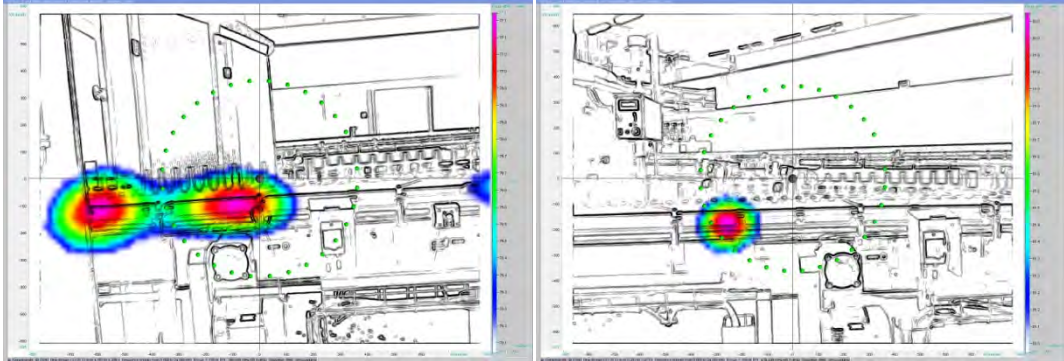
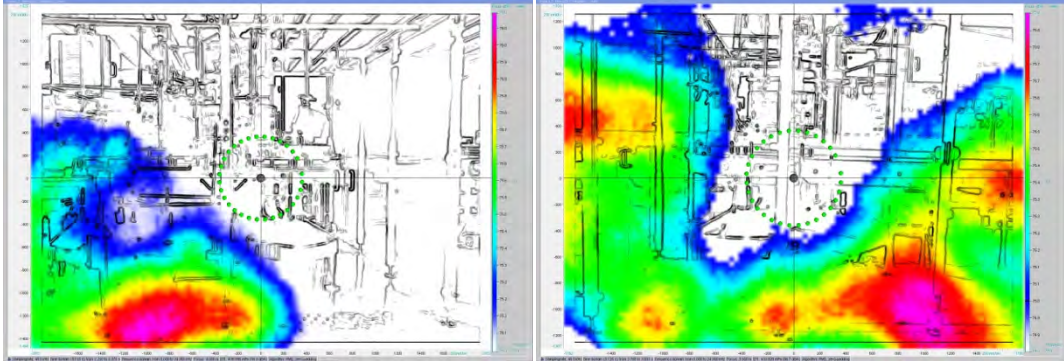
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
12	Transportstrecke Flaschenpulk (Flaschenreinigungsmaschine zur Leerflaschen-Inspektionsmaschine)	12.1a	Aufholpunkte am Pulkende		Links: 84,0 dB(A) 89,0 dB(A) 86,1 dB(A) 2,0 m				[29]
		12.1d	Überschübe des Flaschenpulks		Links: 78,8 dB(A) 85,1 dB(A) 83,9 dB(A) 1,9 m				[1, 2, 3, 4]
		12.2a	Staudrucklose Flaschenvereinzelung		Links: 81,2 dB(A) 86,8 dB(A) 85,7 dB(A) 2,7 m  Rechts: 76,2 dB(A) 86,1 dB(A) 85,7 dB(A) 2,7 m				[29]

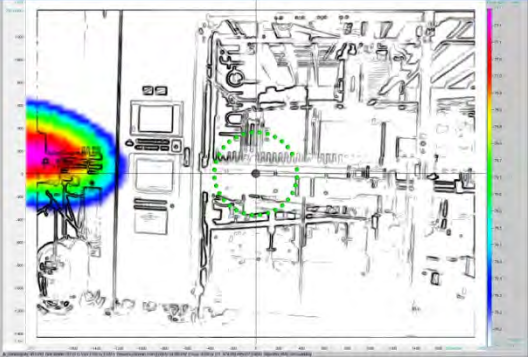
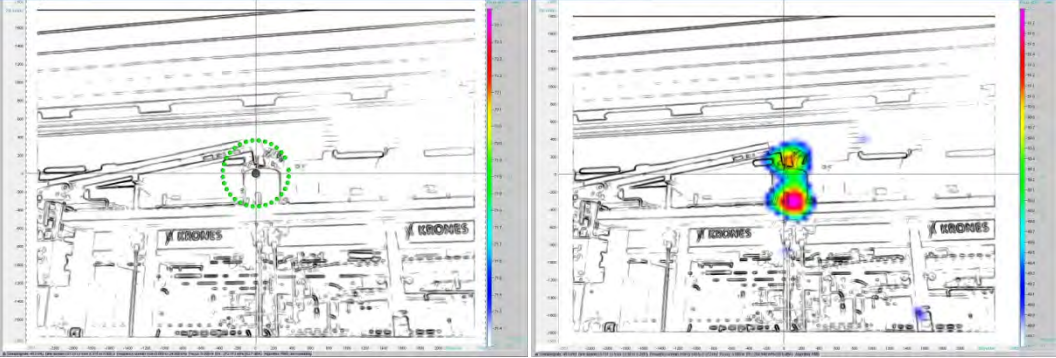
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		12.2b	Aufholpunkte im Einzeltransport	 	Links: 96,5 dB(A) 107,2 dB(A) --- dB(A) 2,6 m  Rechts: 98,5 dB(A) 108,4 dB(A) --- dB(A) 2,6 m				[1, 2, 3, 4]
		12.2c	Überschübe im Einzeltransport						
13	Leerflaschen-Inspektionsmaschine	13.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			105,0 dB(A)	102,3 dB(A)	99,5 dB(A)	[28]
		13.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			86,5 dB(A)	83,8 dB(A)	81,0 dB(A)	[28]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		13.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p data-bbox="779 667 1064 686">Bodenabbläsung hinter Plexiglas</p>	Links: 73,0 dB(A) 83,0 dB(A) 82,7 dB(A) 2,0 m				[1, 2, 3, 4]
		13.4	Einlauf-Schnecke (nur Rundläufer)	 <p data-bbox="779 1058 1288 1077">Geräuschdurchtritt an der Gehäuseöffnung der Maschine</p>	Links: 85,1 dB(A) 91,1 dB(A) 90,5 dB(A) 3,5 m				[28]

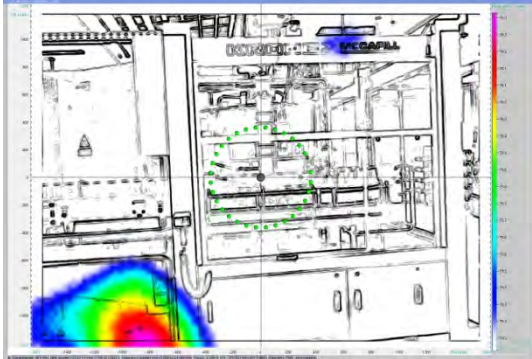
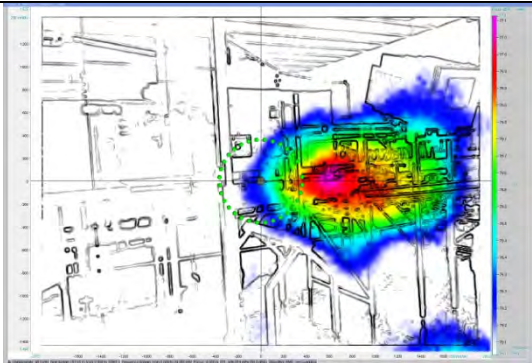
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		13.5	Einlaufstern (nur Rundläufer)	 <p>Diffuse Lärmquelle durch Einhausung</p>	Links: 75,9 dB(A) 87,3 dB(A) 87,7 dB(A) 3,5 m				[28]
		13.6	Transfersterne (nur Rundläufer)	 <p>Diffuse Lärmquelle durch Einhausung</p>	Links: 76,0 dB(A) 87,5 dB(A) 87,3 dB(A) 3,5 m				[28]

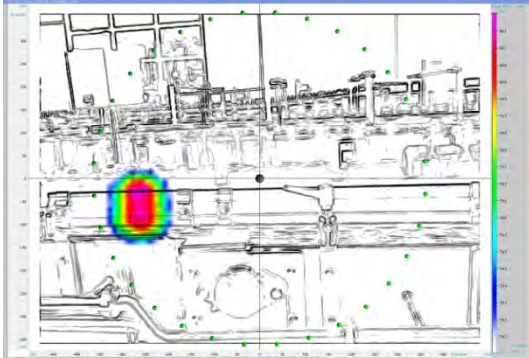
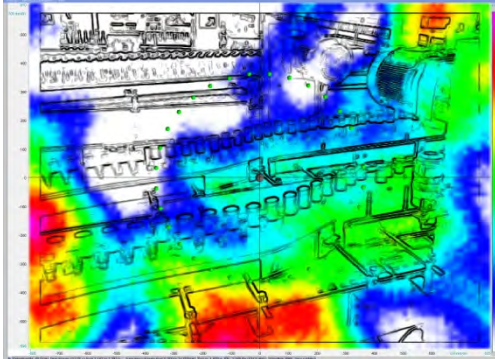
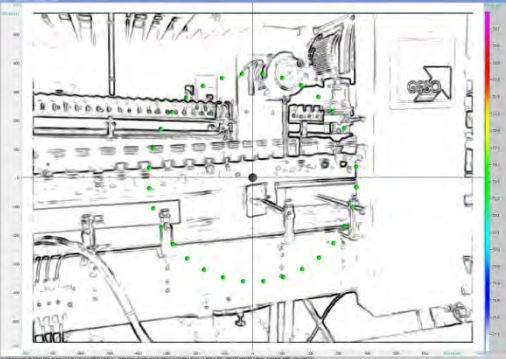
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		13.9	Ausleitung erkannter Flaschen	 <p>Pusher ohne Ausleitung</p> <p>Pusher mit Ausleitung</p> <p>Behälter fällt in leeren, geschlossenen Container</p> <p>Ca. 40 ms später: Schall desselben Behälters tritt durch Spalt</p>	<p>Links: 72,9 dB(A) 82,0 dB(A) 83,8 dB(A) 2,3 m</p> <p>Rechts: 84,6 dB(A) 87,0 dB(A) 83,8 dB(A) 2,3 m</p> <p>Links: 80,2 dB(A) 88,5 dB(A) 83,0 dB(A) 2,0 m</p> <p>Rechts: 81,0 dB(A) 87,4 dB(A) 83,0 dB(A) 2,0 m</p>				[1, 2, 3, 4]

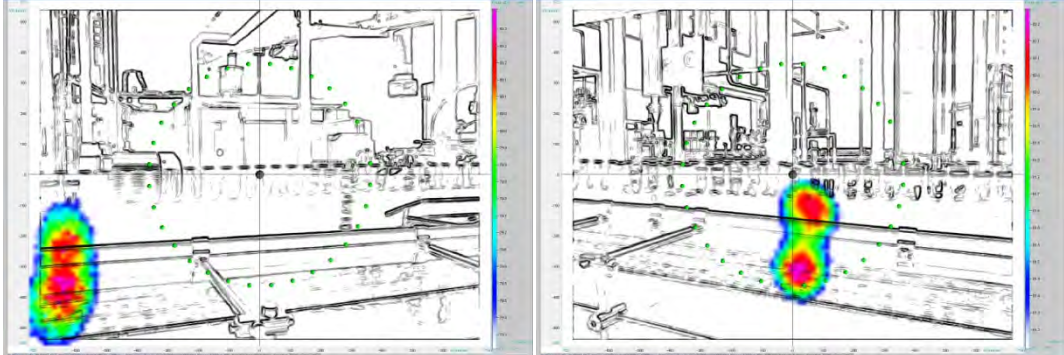
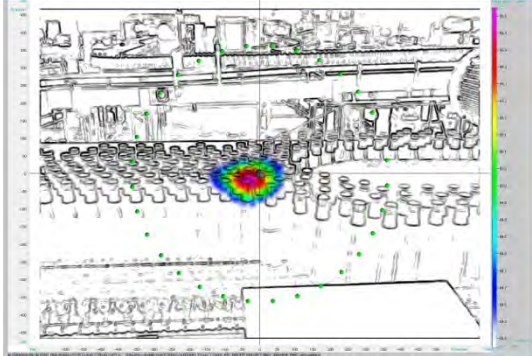
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
14	Transportstrecke Einzelflaschen (Leerflaschen-Inspektionsmaschine zur Füllmaschine)	14.1b	Überschübe im Einzeltransport	 <p>Letzter Überschub vor der Füllmaschine</p> <p>Vorvorletzter Überschub vor der Füllmaschine</p>	Links: 77,1 dB(A) 85,8 dB(A) 86,3 dB(A) 1,7 m				[1, 2, 3, 4]
15	Füll- und Verschleißmaschine	15.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			107,0 dB(A)	104,8 dB(A)	102,5 dB(A)	[28]
		15.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			88,0 dB(A)	85,5 dB(A)	83,0 dB(A)	[28]
		15.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Diffuse Lärmquelle durch Einhausung der Maschine, Schallreflektion am Boden durch Abstand der Einhausung</p>	Links: 76,0 dB(A) 86,8 dB(A) 87,0 dB(A) 4,0 m				[1, 2, 3, 4]

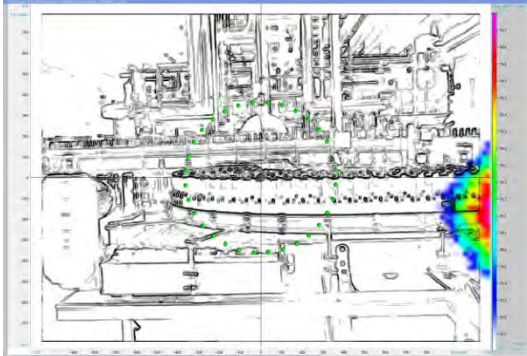
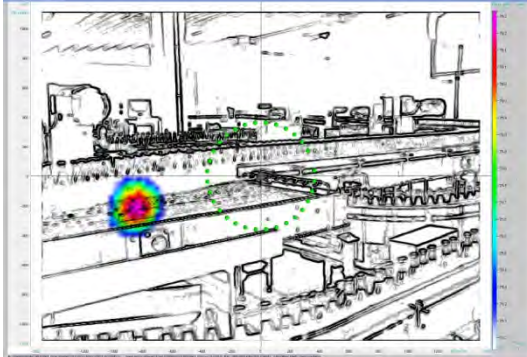
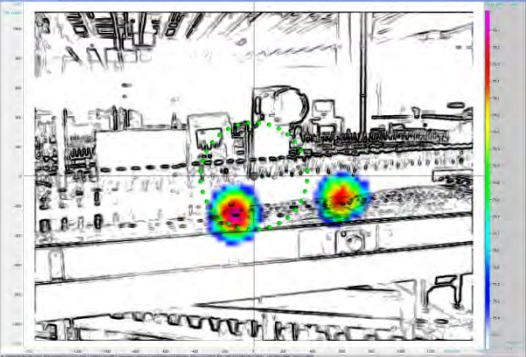
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		15.3a	Einlauf-Schnecke	 <p data-bbox="784 662 1310 686">Flascheneinlauf dominante Lärmquelle durch Einhausung</p>	Links: 77,1 dB(A) 87,5 dB(A) 87,1 dB(A) 4,0 m				[28, 29]
		15.3g	Verschlussförderer	 <p data-bbox="1310 1053 1836 1078">Spektrum von 5.149 Hz bis 5272 Hz</p>	Links: 72,3 dB(A) 82,7 dB(A) 83,4 dB(A) 5,0 m  Rechts: 51,8 dB(A) 85,0 dB(A) 83,4 dB(A) 5,0 m				[1, 2, 3, 4, 29]

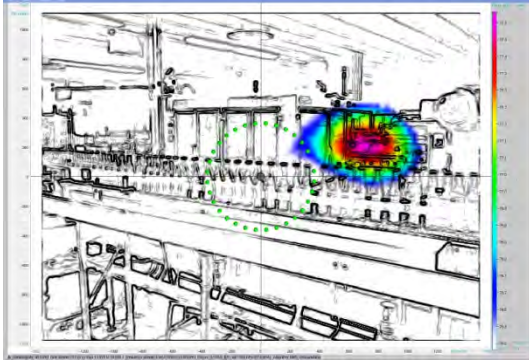
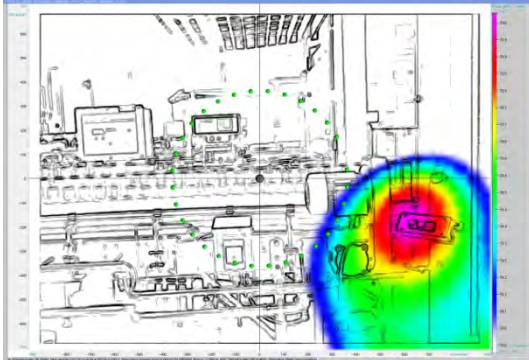


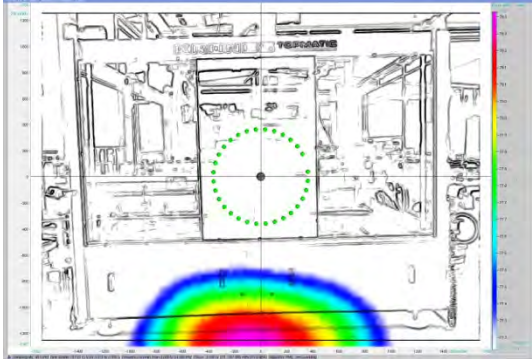
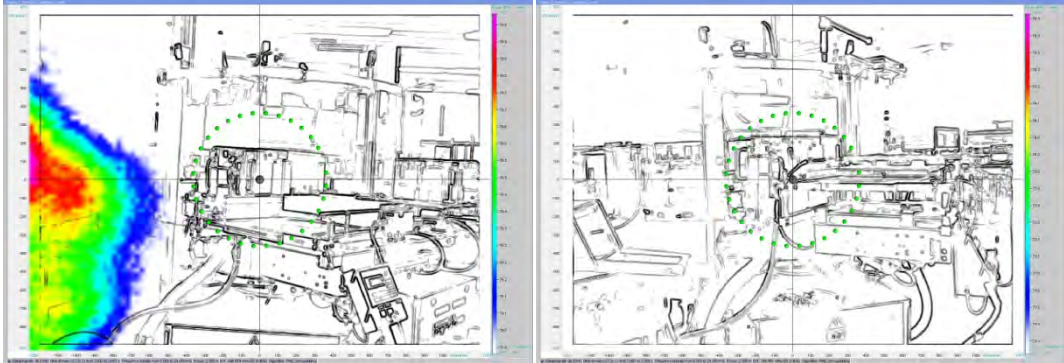
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		15.3i	Auslaufstern	 <p>Reflektion des Füllerkarussells am Boden</p>	Links: 76,3 dB(A) 85,5 dB(A) 84,9 dB(A) 3,3 m				[28, 29]
		15.5	Ausleitung fehlerhafter Flaschen		Links: 77,1 dB(A) 88,0 dB(A) 87,8 dB(A) 4,0 m				[1, 2, 3, 4]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
16	Transportstrecke Einzelflaschen und Flaschenpulk (Füllmaschine zur Vollflaschen-Inspektionsmaschine, oder anderem Aggregat) (ggf. auch Etikettiermaschine, sollte keine Vollflaschen-Inspektionsmaschine vorhanden sein)	16.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport		Links: 80,2 dB(A) 86,6 dB(A) 85,7 dB(A) 1,0 m				[1, 2, 3, 4]
		16.1b	Überschübe im Einzeltransport	  <p>Zwei parallele Überschübe von oben</p> <p>Zwei parallele Überschübe seitlich</p>	Links: 92,8 dB(A) 104,5 dB(A) 105,1 dB(A) 1,6 m  Rechts: 72,7 dB(A) 83,4 dB(A) 83,7 dB(A) 1,6 m				[1, 2, 3, 4]


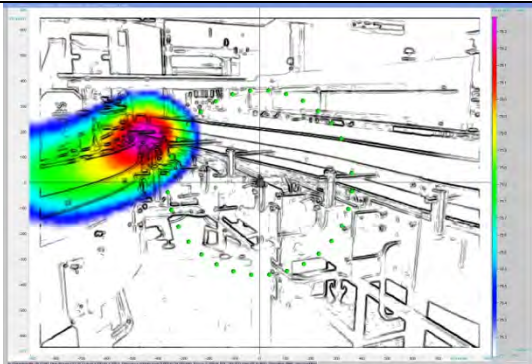
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		16.2	Flaschenzusammenführung		Links: 80,3 dB(A) 89,8 dB(A) 84,9 dB(A) 1,5 m  Rechts: 82,2 dB(A) 88,6 dB(A) 85,2 dB(A) 1,5 m				[29]
		16.3b	Teilung des Flaschenpulk	 <p>Teilung durch stumpfes Hindernis</p>	Links: 85,5 dB(A) 90,7 dB(A) 87,3 dB(A) 1,3 m				[29]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		16.3d	Überschübe des Flaschenpulk		Links: 76,7 dB(A) 86,7 dB(A) 86,4 dB(A) 2,2 m				[1, 2, 3, 4]
		16.4a	Staudrucklose Flaschenvereinzlung	 	Links: 76,2 dB(A) 85,0 dB(A) 86,3 dB(A) 3,1 m  Rechts: 76,3 dB(A) 86,2 dB(A) 86,3 dB(A) 3,1 m				[29]
				Einlaufbereich der Flaschen	Vereinzelungsbereich der Flaschen				

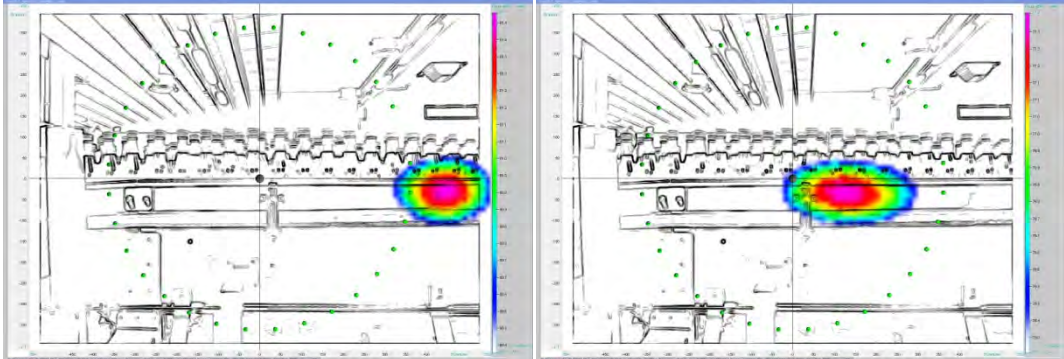
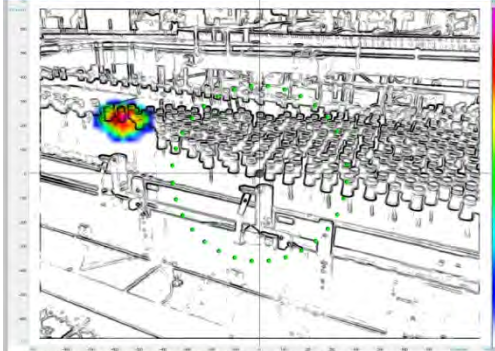
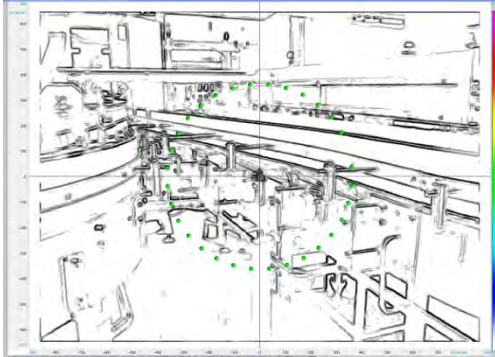
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		16.4a	Staudrucklose Flaschenvereinzelnung	 <p>Auslaufbereich der Flaschen, dominante Geräuschquelle im Hintergrund</p>	Links: 77,5 dB(A) 87,0 dB(A) 86,9 dB(A) 3,1 m				[29]
17	Vollflaschen- Inspektionsmaschine (oder anderes Aggregat)	17.1	Schalleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			---	---	---	[1, 2]
		17.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			---	---	---	[1, 2]
19	Etikettiermaschine	19.1	Schalleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			105,5 dB(A)	102,8 dB(A)	100,0 dB(A)	[28]
		19.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			87,0 dB(A)	84,0 dB(A)	81,0 dB(A)	[28]
		19.3a	Einlauf-Schnecke		Links: 79,0 dB(A) 85,9 dB(A) 86,6 dB(A) 1,9 m				[28]

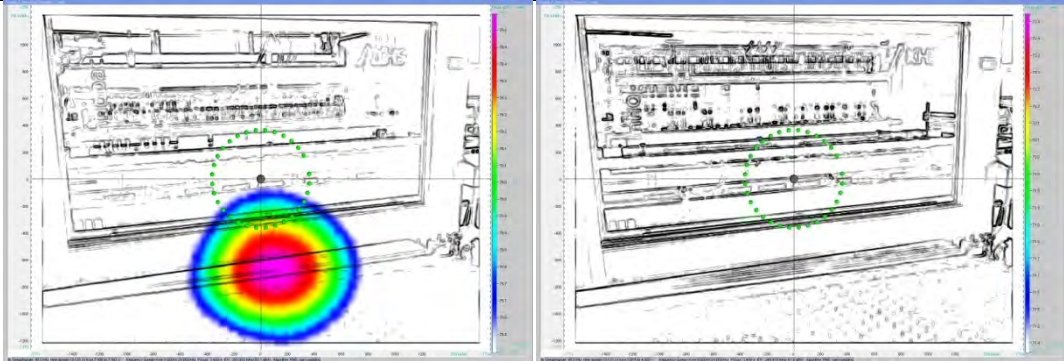
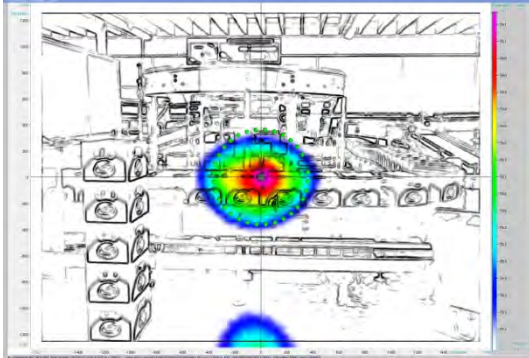
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		19.3b	Einlaufstern	 <p>Bodenreflektion unterhalb der Einhausung</p>	Links: 78,3 dB(A) 85,8 dB(A) 85,6 dB(A) 3,5 m				[28]
		19.3c	Etikettierstationen / Module	 <p>Dominante Schallquelle neben der Etikettiermaschine</p>	Links: 76,9 dB(A) 87,9 dB(A) 87,2 dB(A) 2,5 m  Rechts: 74,4 dB(A) 85,3 dB(A) 85,3 dB(A) 2,5 m				[28]

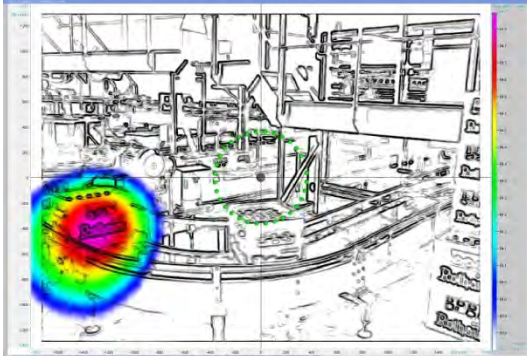
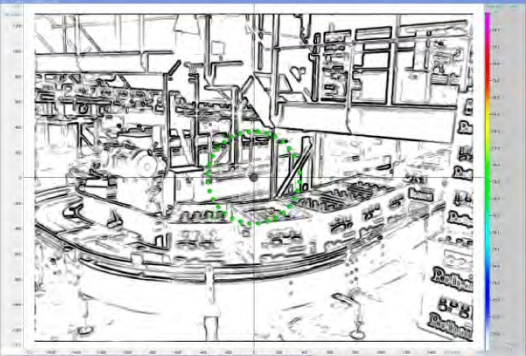
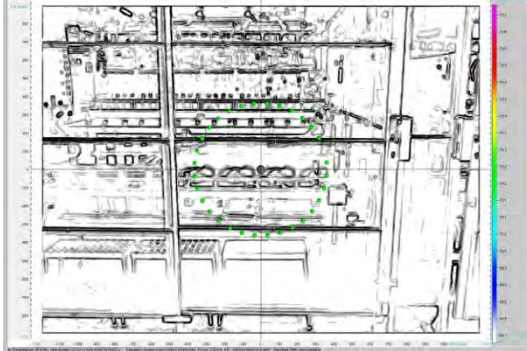
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		19.3c	Etikettierstationen / Module	<p>Laser-Datiersystem, Schallemission durch Verkleidungsspalt</p>	Links: 74,8 dB(A) 86,0 dB(A) 85,7 dB(A) 2,5 m  Rechts: 75,9 dB(A) 86,6 dB(A) 86,5 dB(A) 1,7 m				[28]
		19.3d	Auslaufstern		Links: 72,2 dB(A) 81,7 dB(A) 81,7 dB(A) 2,4 m				[28]

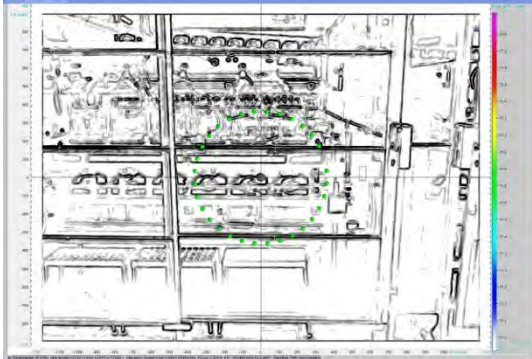
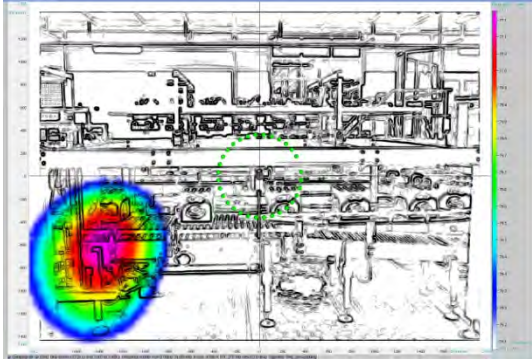
Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		19.4	Ausleitung fehlerhafter Flaschen	 <p>Keine Ausleitung im Beobachtungszeitraum</p>	Links: 72,5 dB(A) 81,7 dB(A) 81,8 dB(A) 3,0 m				[1, 2, 3, 4]
20	Transportstrecke Flaschenpulk (Etikettiermaschine zur Einpackmaschine)	20.1a	Aufholpunkte im Einzeltransport		Links: 76,2 dB(A) 81,8 dB(A) 81,9 dB(A) 1,8 m				[1, 2, 3, 4]

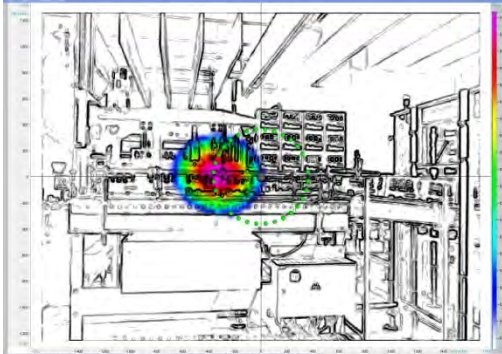
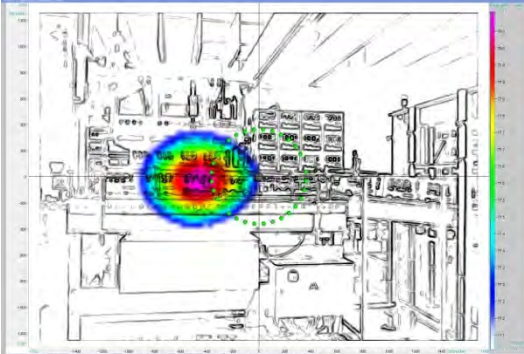
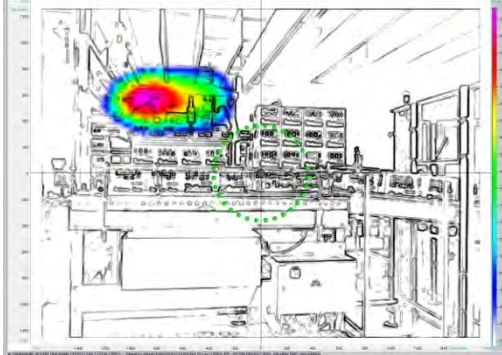


Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		20.3a	Aufholpunkte am Pulkende		Links: 81,4 dB(A) 84,8 dB(A) 79,5 dB(A) 1,1 m  Rechts: 77,3 dB(A) 82,0 dB(A) 79,5 dB(A) 1,1 m				[29]
		20.3c	Zusammenführung des Flaschenpulks		Links: 81,0 dB(A) 85,5 dB(A) 82,1 dB(A) 1,9 m				[29]
		20.5	Scharnierbandketten		Links: 74,5 dB(A) 82,1 dB(A) 81,9 dB(A) 1,8 m				[1, 2, 3, 4]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen	
21	Einpackmaschine	21.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine				104,0 dB(A)	103,0 dB(A)	102,0 dB(A)	[28]
		21.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener				86,5 dB(A)	85,3 dB(A)	84,0 dB(A)	[28]
		21.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 <p>Einsetzen der Flaschen in die Kästen</p> <p>Abheben der Flaschen von der Zuführung</p>	<p>Links: 76,5 dB(A) 83,1 dB(A) 83,8 dB(A) 3,4 m</p> <p>Rechts: 72,4 dB(A) 81,8 dB(A) 83,3 dB(A) 3,4 m</p>				[1, 2, 3, 4]	
		21.4	Kasteneinlauf		<p>Links: 79,1 dB(A) 83,7 dB(A) 81,6 dB(A) 3,5 m</p>				[1, 2, 3, 4]	

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen		M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		21.5	Kastenauslauf			Links: 84,8 dB(A) 88,3 dB(A) 85,2 dB(A) 3,6 m  Rechts: 74,8 dB(A) 84,4 dB(A) 86,3 dB(A) 3,6 m				[1, 2, 3, 4]
		21.7	Heben der Flaschen			Links: 70,7 dB(A) 80,4 dB(A) 81,5 dB(A) 2,5 m				[28]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen
		21.8	Absetzen der Flaschen		Links: 72,0 dB(A) 82,0 dB(A) 81,5 dB(A) 2,5 m				[28]
22	Transportstrecke Kasten (Einpackmaschine zur Bepalettiermaschine)	22.3	Überschübe		Links: 77,1 dB(A) 82,6 dB(A) 81,6 dB(A) 4,0 m				[1, 2, 3, 4]
23	Bepalettiermaschine	23.1	Schallleistungspegel L <sub>WA</sub> (50.000 FI/h) der gesamte Maschine			95,0 dB(A)	93,5 dB(A)	92,0 dB(A)	[28]
		23.2	Emissions-Schalldruckpegel L <sub>pA</sub> (50.000 FI/h) am Arbeitsplatz Bediener			85,0 dB(A)	83,5 dB(A)	82,0 dB(A)	[28]

Lfd. Nr.	Aggregat der Getränkeabfüllanlage	Lfd. Nr.	Mögliche Emissionsquellen am Aggregat	Exemplarische Screenshots der mögliche Emissionsquellen	M <sub>S</sub> E <sub>S</sub> E <sub>M</sub> Fokus	L <sub>1</sub> (85 %)	∅	L <sub>2</sub> (15 %)	Quellen	
		23.3	Arbeitsbereich an der Maschine	 Kastenstoß beim Einfahren der Kästen in Palettierung	 Positionierung der Kästen für Greifarm	Links: 83,9 dB(A) 86,9 dB(A) 81,2 dB(A) 3,5 m  Rechts: 78,1 dB(A) 86,9 dB(A) 81,2 dB(A) 3,5 m			[1, 2, 3, 4]	
		23.4	Heben der Kästen	 Maschinengeräusch im Greifarm durch verschlissene Rollen						[28]

## 10.7 Katalog – Lärmtechnische Eigenschaften von Behältern für Getränke

Die Ergebnisse der in Arbeitsschritt AS 3.2 (vgl. Abschnitt 5.3.2) durchgeführten Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Schalldruckpegel sind für die Flaschensorten 0,5 Liter NRW und 0,5 Liter Long-Neck, jeweils leer und gefüllt, in Abbildung 110 bis Abbildung 113 dargestellt.

### 10.7.1 Zusammenhang zwischen Aufprallgeschwindigkeit und Schalldruckpegel

#### NRW-Flaschen

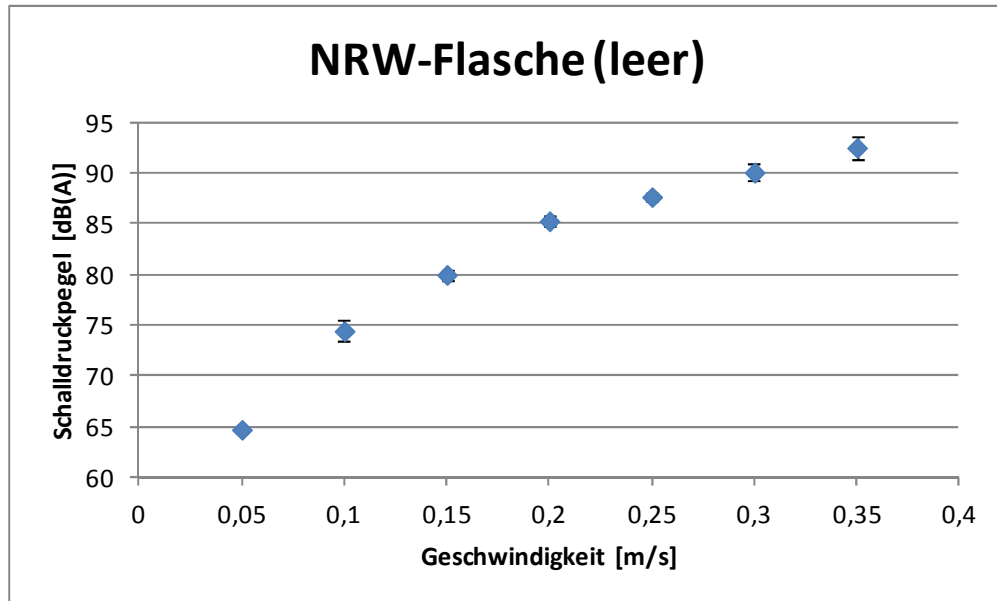


Abbildung 110: NRW-Flasche – leer

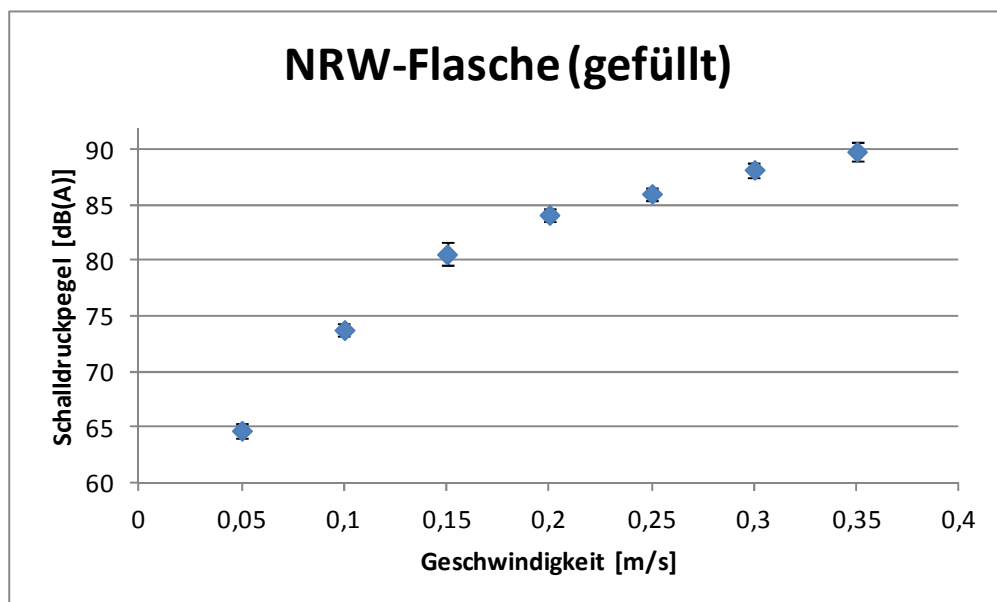


Abbildung 111: NRW-Flasche – gefüllt

### Longneck-Flaschen

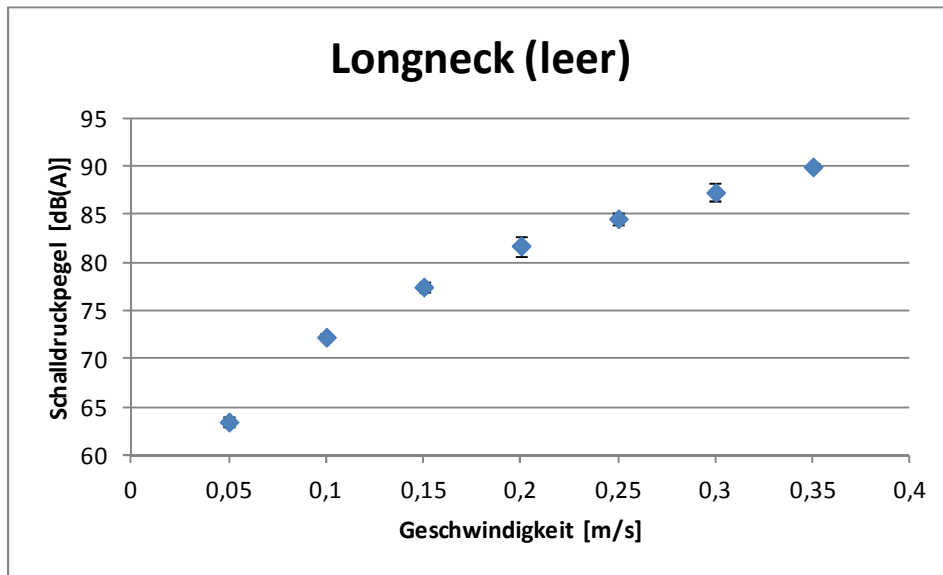


Abbildung 112: Longneck Flasche – leer

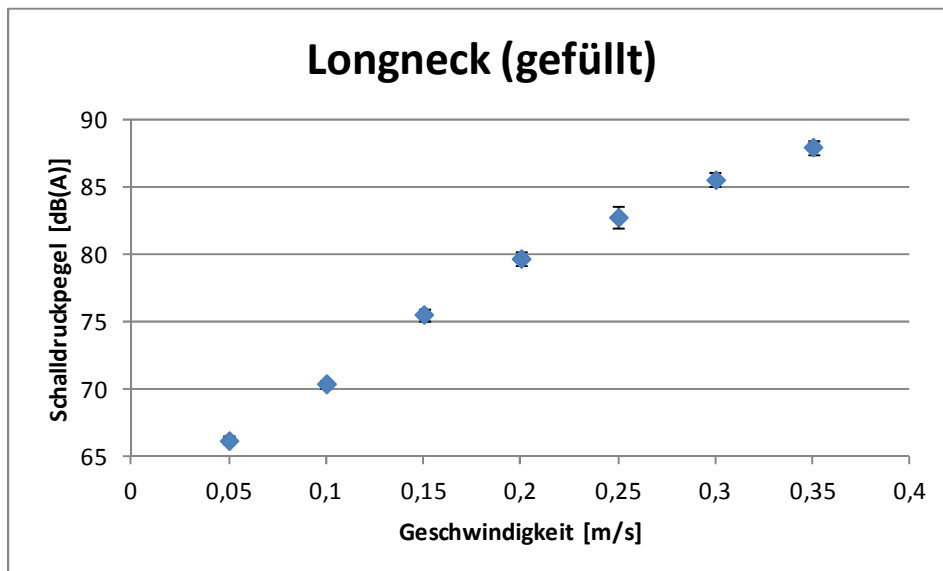


Abbildung 113: Longneck Flasche – gefüllt

#### 10.7.2 Visualisierung der Schallentstehung beim Behälterstoß

Tabelle 10 beinhaltet Schallkarten vom Behälterstoß von leeren NRW-Flaschen. Für jede der sechs Bandgeschwindigkeiten von 0,05 m/s und 0,30 m/s wurden drei repräsentative Schallkarten ausgewählt. Das dargestellte Delta betrug stets 1,0 dB, so dass die farblichen Markierungen das lautete gemessene Dezibel farblich darstellen. Dies bedeutet, je kleiner die Farbmarkierung, desto höher die empfundene Lautstärke.

Tabelle 10: Visualisierung von Behälterstößen in Abhängigkeit der Bandgeschwindigkeit

Bandgeschwindigkeit	Behälterstöße		
0,05 m/s			
0,10 m/s			
0,15 m/s			
0,20 m/s			
0,25 m/s			
0,30 m/s			



## 10.8 Katalog – Primäre Schallschutzmaßnahmen

Am Übergang von Abschnitt 0 auf Abschnitt 1 der Flaschentransportstrecke (siehe Abbildung 15 auf Seite 20) wurden die Auswirkungen des Aufprallwinkels von Getränkeflaschen auf die seitliche Flaschenführung in Bezug auf die dadurch verursachte Schallemission untersucht. Die Aufprallwinkel betragen zwischen 34,5° und 19,9°. Wie aus Tabelle 11 hervorgeht, haben die gewählten Aufprallwinkel keinen signifikanten Einfluss auf die Schallemission, weder auf die Maximalwerte  $M_S$  der Schallkarten, noch auf die Effektivwerte  $E_M$  über die gesamte Messdauer von acht Sekunden. Abbildung 114 bis Abbildung 116 zeigt die in Tabelle 11 aufgelisteten Aufprallereignisse. Auch das Bild der Emissionsquellen ist von Größe und Form her ähnlich.

Der Algorithmus zur Reduzierung der Schallabstrahlung von Behältertransporteuren, der ebenfalls zu den Primären Schallschutzmaßnahmen zählt, wird nicht in diesem Katalog aufgeführt, da er bereits in Arbeitsschritt AS 3.5 als „Leitfaden – Lärmreduzierende Regelungsstrategien für Behältertransporteure“ (siehe Abschnitt 5.3.5 ab Seite 89ff) eingebunden wurde.

Tabelle 11: Maximalwerte  $M_S$  und Effektivwerte in Abhängigkeit des Aufprallwinkels

Aufprallereignis	Aufprallwinkel		
	34,5°	27,0°	19,9°
	$M_S$		
Nr. 1	74,3 dB	76,2 dB	71,2 dB
Nr. 2	72,1 dB	72,9 dB	73,9 dB
Nr. 3	74,5 dB	71,6 dB	74,7 dB
Nr. 4	75,6 dB	72,1 dB	72,5 dB
Nr. 5	72,5 dB	73,0 dB	72,1 dB
Nr. 6	72,1 dB	74,0 dB	71,7 dB
Mittelwert der $M_S$	73,5 dB	73,3 dB	72,7 dB
Effektivwert $E_M$ über die Messdauer (Integrationszeit = 8 s, Algorithmus: RMS)	80,0 dB	79,8 dB	80,0 dB

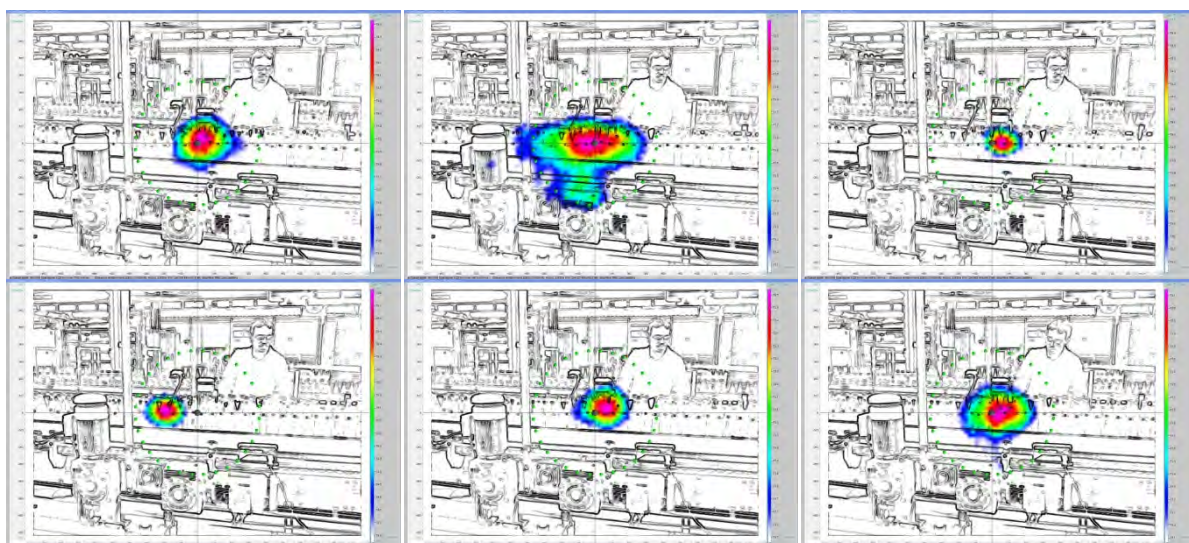


Abbildung 114: Aufprallwinkel 34,5°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten)

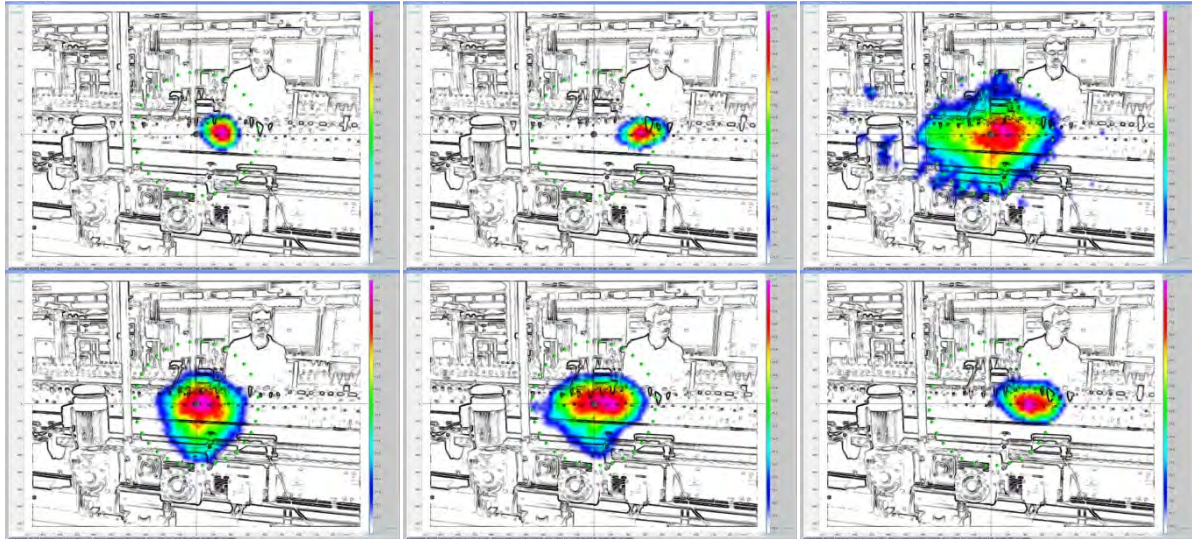


Abbildung 115: Aufprallwinkel 27,0°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten)

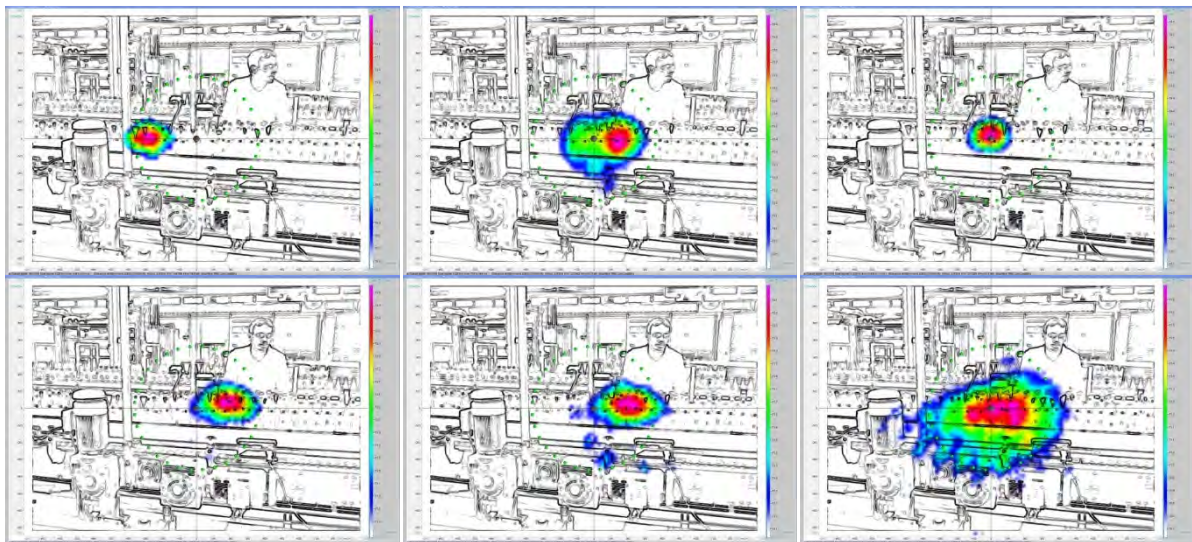


Abbildung 116: Aufprallwinkel 19,9°, Aufprallereignis 1 (links oben) bis 6 (rechts unten)