

Schlussbericht vom 17.07.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 01IF22182N

Thema

KI-basierte Audioanalyse zur feuchtigkeitsgeregelten Trocknung im Tumbler

Berichtszeitraum

01.04.2022 bis 30.06.2024

Forschungsvereinigung

Forschungskuratorium Textil e.V.

Forschungseinrichtung(en)

wfk - Cleaning Technology Institute e.V.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung der Ergebnisse	4
1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	5
2	Stand der Forschung	7
2.1	Prozesssteuerung in Tumbler.....	7
2.2	Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen und Deep Learning	8
2.3	Akustik und Audioanalyse	10
3	Forschungsziel und prinzipieller Lösungsweg	12
4	Experimenteller Teil	13
4.1	Audioaufnahmesystem	13
4.2	Versuchsstand zur Untersuchung von Trommeln unterschiedlicher Beladungskapazität	13
4.3	Untersuchte Trommeln	15
4.4	Messprinzip	15
4.5	Audiodatenübertragungseinheit.....	16
4.6	Eingesetzte Tumbler.....	17
4.7	Signalerfassung.....	17
4.7.1	Nutzsignale	17
4.7.2	Störsignale	19
4.8	Eingesetzte Textilien	20
5	Ergebnisse und Diskussion.....	22
5.1	Untersuchungen zum Einfluss von Maschinencharakteristika bzw. Trommeleigenschaften auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens.	22
5.1.1	Bestimmung der Störsignale am Versuchsstand mit Mikrofonintegration.....	22
5.1.2	Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens	26
5.1.3	Zusammenfassung.....	31
5.2	Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler	33
5.2.1	Luftschallmikrofon zur Erfassung der Betriebsgeräusche	33
5.2.2	Körperschallmikrofone.....	34
5.2.3	Zusammenfassung.....	34
5.3	Analyse der Abroll- und Fallgeräusche abhängig von den Prozessparametern	36
5.3.1	Vorversuche	36
5.3.2	Einfluss Restfeuchte.....	40

5.3.3	Einfluss g-Faktor	43
5.3.4	Einfluss Füllverhältnis	44
5.3.5	Einfluss Ablufttemperatur	44
5.3.6	Einfluss Luftdurchsatz	45
5.3.7	Zusammenfassung	46
5.4	Analyse der Abroll- und Fallgeräusche im Tumbler abhängig von textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile im Wäscheposten	47
5.4.1	Einfluss der Textilrestfeuchte.....	47
5.4.2	Einfluss Füllverhältnis.....	50
5.4.3	Einfluss Fasersubstrat und Abmessungen.....	51
5.4.4	Einfluss Flächengewicht	52
5.4.5	Zusammenfassung.....	53
5.5	Entwicklung eines KNN zur Audioanalyse der textilen Restfeuchte	54
5.6	Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxisnahen Bedingungen	58
5.6.1	Experimentelles.....	58
5.6.2	Ergebnisse	60
5.6.3	Zusammenfassung.....	64
5.7	Konzepte zur Integration der KI-Audioanalyse in gewerbliche Tumbler	65
5.8	Gegenüberstellung von Zielen und erreichten Ergebnissen.....	67
5.8.1	Verwendung der Zuwendung.....	67
5.8.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	67
6	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.....	69
6.1	Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens	69
6.2	Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens.....	69
7	Zusammenfassende Diskussion und Folgerungen für die Praxis	70
8	Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihr innovativer Beitrag und ihre industrielle Anwendungsmöglichkeit	75
9	Danksagung.....	76
10	Literaturnachweis.....	77

0 Zusammenfassung der Ergebnisse

In gewerblichen Trommeltrocknern kann die textile Restfeuchte bisher nur über indirekte Messverfahren erfasst werden. Eine Korrelation mit der textilen Restfeuchte des Wäschepostens ist dabei nur eingeschränkt gegeben. Für eine automatische Trocknungsprozessregelung ist die textile Restfeuchte des Wäschepostens die einzig sinnvolle Regelgröße, da nur diese eine direkte Auskunft über den Trocknungsgrad gibt. Dies war aufgrund fehlender Erfassungsmethoden bisher nicht möglich. Die kontinuierliche Erfassung der textilen Restfeuchte des Wäschepostens ermöglicht eine textilschonende Trocknung bei gleichzeitig reduziertem Wärmeenergiebedarf durch Optimieren der Trocknungsprozessgrößen.

Im Forschungsprojekt wurde daher eine KI-basierte Erfassung der Textilfeuchte über Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens für feuchtigkeitsgeregelte textile Trocknungsprozesse im Tumbler ohne zusätzliche Monitore entwickelt. Dies erfolgte erstmalig durch Erfassung der Nutzsignale (Abroll- und Fallgeräusche) über ein in den Tumbler integriertes Audiosystem (Funktionsmuster), bestehend aus an der Trommel installierten Körperschallmikrofonen, zusätzlichen zur Erfassung von Störgeräuschen installierten Körperschallmikrofonen am Außengehäuse des Tumblers sowie einem Luftschallmikrofon für Umgebungsgeräusche. Eine Audiokorrektur auf einem Kleinrechner extrahiert über Subtraktion der Störgeräusche von der Audioaufnahme das Nutzsignal und stellt es dem KNN zur Bestimmung der Textilfeuchte bereit.

Nach Analyse der Abroll- und Fallgeräusche in Abhängigkeit von den wesentlichen Prozessparametern des Trocknungsprozesses und den textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile im Wäscheposten wurde ein KNN zur Audioanalyse der textilen Restfeuchte entwickelt.

Das entwickelte KNN besteht aus zwei Faltungsschichten, welche die eingehenden Spektren der korrigierten Nutzsignale entlang des gesamten Frequenz- und Zeitbereichs filtern. Anschließend werden die resultierenden Daten in einen eindimensionalen Vektor umgewandelt und durch fünf vollständig verknüpfte Schichten bis zu einem Restfeuchtwert oder einer Zahl an Restfeuchtekategorien weiterverarbeitet. Es konnte so ein Modell erstellt werden, das eine gute Vorhersagbarkeit für die Restfeuchte bietet und bei Übertragung auf neue Werte weniger als 10 % an Vorhersagegenauigkeit einbüßt.

In Untersuchungen unter praxisnahen Bedingungen an einem gewerblichen Tumbler wurden die Audiodaten mit einem integrierten System aus einem Raspberry Pi 4 mit einer Coral Edge TPU und angeschlossenen Körperschallmikrofonen während der Trocknung erfasst. Die dabei angewandte, vereinfachte KI-basierte Vorhersage der Restfeuchte ohne Audiokorrektur mit Klassifizierung in drei Restfeuchtekategorien über das KNN-Modell funktioniert grundsätzlich, wies jedoch durch die fehlende Audiokorrektur und die Datenkompression auf 8-Bit Einschränkungen in der Genauigkeit auf. Trotz fehlender Audiokorrektur konnte eine Vorhersagegenauigkeit von 83,8% vor der Datenkompression erreicht werden. Bei Verwendung eines leistungsstärkeren Kleinrechners kann die Vorhersagewahrscheinlichkeit weiter erhöht werden. Die prinzipielle Eignung der entwickelten KI-basierten Audioanalyse zur kontinuierlichen Erfassung der Restfeuchte wurde damit nachgewiesen.

Zur späteren Praxisumsetzung wurden zusätzlich bautechnische Maßnahmen zur Integration von Kontaktmikrofonen und Luftschallmikrofonen in typische Trocknerbauarten entwickelt und Empfehlungen zur Anwendung des entwickelten Audiosystems mit zugehöriger Hard- und Software zur Anwendung der KI-basierten Audioanalyse zum feuchtigkeitsgeregelten Trocknungsprozess erarbeitet. Damit ist eine Regelung ausgewählter Trocknungsparameter auch unter den in Wäschereien herrschenden klimatischen und akustischen Bedingungen möglich. Mit einem leistungsstarken Rechner sind Kommunikation und Datenauswertung möglich.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

In der gewerblichen Textilaufbereitung erfolgt nach dem Waschprozess und der mechanischen Entwässerung in einer Zentrifuge oder Presse die thermische Trocknung im Tumbler (Trommeltrockner) als „Volltrocknung“ oder als „Vortrocknung“ für Mangelwäsche oder Formteile, wobei die eigentliche Trocknung in einer Mangel bzw. im Finisher stattfindet. Etwa ein Drittel der in textilen Dienstleistungsbetrieben aufbereiteten Wäsche wird im Tumbler vollständig getrocknet (Endrestfeuchte: 0 - 5 % (bezogen auf bone dry) [1,2]). Dabei werden üblicherweise Posten gleicher Wäscheart (Fasersubstrat, Garn- und Flächenkonstruktion, Textilkonfektion und -ausrüstung), d. h. mit ähnlicher Wasseraufnahmekapazität, getrocknet, um starke Unterschiede in der Feuchte der einzelnen Wäscheteile und damit der notwendigen Trocknungsdauer zu vermeiden [3]. Typische Restfeuchten nach mechanischer Entwässerung (Anfangsrestfeuchten) betragen für Mischgewebe aus Polyester und Baumwolle (PES/CO) 25 - 35 % und für Baumwollgewebe (CO) 40 - 50 %. Neben den Textileigenschaften wird die Anfangsrestfeuchte der Wäscheteile auch von Prozessparametern des Waschprozesses (z. B. Spülbedingungen) und bei der mechanischen Entwässerung (z. B. g-Faktor beim Zentrifugieren bzw. Anpressdruck beim Pressen sowie die Dauer) bestimmt. Die Anfangsrestfeuchte von Wäscheposten kann somit prozessbedingt variieren. Ferner ist die Feuchteverteilung in einem Wäscheposten inhomogen, da die Restfeuchte eines Wäscheteils von seiner Position im Wäscheposten bei der mechanischen Entwässerung abhängig ist [3].

Bei der gewerblichen Textilaufbereitung in Wäschereien beträgt der Energieeinsatz für die Trocknung im Durchschnitt 15 - 40 % des Wärmeeinsatzes, was bis zu 90 % des Gesamtenergieeinsatzes entspricht [4]. Neben der Restfeuchte (Masse des aus den Textilien zu entfernenden Wassers) bestimmt die Prozessführung die Trocknungsdauer und damit den Energiebedarf. Wesentliche Stell- bzw. Prozessgrößen sind Heißlufttemperatur, Luftdurchsatz, Anteil von Frischluft zu Umluft, g-Faktor und Stillstandzeit der Trommel [5-7].

In den derzeit auf dem Markt befindlichen gewerblichen Tumbler ab etwa 40 kg erfolgt lediglich eine Prozesssteuerung, meist sind die Trocknungsprozesse zeitgesteuert [3]. Eine solche Prozesssteuerung kann nicht auf spezifische, prozessbedingt variierende Eigenschaften des Wäschepostens reagieren: Bei Festlegung bzw. Ermittlung der Trocknungsdauer wird die textile Restfeuchte nur mit ungenügender Genauigkeit berücksichtigt und der exakte Zeitpunkt des Beginns einer Textilüber Trocknung nicht erfasst.

Über Trocknung bzw. Überhitzung verursacht Textilschädigung [3,4]. Hierzu zählen u.a. Vergilbung und verminderte Festigkeit baumwollhaltiger Textilien und das Anschmelzen von Faserspitzen synthefaserhaltiger Textilien. Ferner führt das Über Trocknen insbesondere bei baumwollhaltigen Textilien zu verstärktem Schrumpf. Eine unzureichende Trocknung (bzw. eine Restfeuchte von mehr als 5 %) bei vorzeitigem Abbruch des Trocknungsprozesses birgt die Gefahr der Stockfleckenbildung während der üblichen Wäschelagerung im verpackten Zustand. Dabei können Stockflecken erst nach der Auslieferung an den Kunden auftreten bzw. auffallen und somit zur Kundenunzufriedenheit oder gar Rufschädigung führen. Reklamierte Wäscheteile müssen aussortiert werden, da sich Stockflecken bei der Aufbereitung nicht mehr entfernen lassen. Daher werden Wäscheteile in textilen Dienstleistungsbetrieben oftmals über Trocknet und die auftretende Textilschädigung bzw. verkürzte Lebensdauer in Kauf genommen [3]. Zudem führen lange Trocknungszeiten zu hohem Wärmeenergiebedarf, der bei gewerblichen Tumbler bis zu 1,2 kWh/kg Wäsche beträgt [8].

Somit ist davon auszugehen, dass sich durch eine Trocknungsprozessregelung der Wärmeenergiebedarf reduzieren und die Textillebensdauer verlängern lässt. Die textile Restfeuchte ist hierbei die einzig sinnvolle Regelgröße, da nur diese eine direkte Information über den Fortschritt des Trocknungsprozesses gibt. Eine Trocknungsprozessregelung auf Basis einer kontinuierlichen Messung der textilen Restfeuchte während der Trocknung ist aufgrund fehlender Erfassungs-/Messmethoden jedoch bisher nicht möglich.

2 Stand der Forschung

2.1 Prozesssteuerung in Tumbler

Zur Steuerung von Trocknungsprozessen in gewerblichen Tumbler kommen abhängig von der Beladungskapazität derzeit verschiedene Verfahren zum Einsatz [9]:

- Üblicherweise erfolgt eine zeitgesteuerte Trocknung (15 - 25 min) über vorgegebene Programme, in denen sich die Prozessparameter (insbesondere Heißlufttemperatur, Dauer) nach den Textileigenschaften (Restfeuchte, Temperaturbeständigkeit) richten. Dies birgt die Gefahr der Textilschädigung (Übertrocknung, Stockfleckenbildung). Die Senkung der Heißlufttemperatur unter Verlängerung der Trocknungsdauer ist aufgrund des reduzierten Maschinendurchsatzes unwirtschaftlich.
- Die Infrarotmessung, bei der der Trocknungsprozess bei Erreichen einer vorgegebenen Oberflächentemperatur abgebrochen wird, konnte sich aus Kostengründen nur für die Volltrocknung spezieller Textilien etablieren. Da bei der Messung nur Textilien an der Oberfläche des Wäschepostens erfasst werden, können abhängig von der Beladung große Unterschiede in der Restfeuchte der Textilien resultieren. Ferner ist keine Korrelation der Oberflächentemperatur mit der Textilrestfeuchte gegeben. Somit ist die IR-Messung zur Trocknungsprozessregelung in Tumbler nur eingeschränkt geeignet.
- Die Temperaturdifferenzmethode, bei der die Differenz zwischen Abluft- und Zulufttemperatur (in die Trommel) als Maß für die Textilrestfeuchte dient, weist eine hohe Ungenauigkeit auf und ist somit zur Regelung von textilen Trocknungsprozessen nicht geeignet.
- Die Ermittlung der textilen Restfeuchte anhand des elektrischen Leitwerts des gesamten Wäschepostens (Beladungskapazität ≤ 40 kg) sowie der elektrostatischen Aufladung der Textilien (nur im Haushaltsbereich angewandt) weist nur bei kleinen Beladungsmengen eine ausreichende Genauigkeit auf.
- Durch Messung des zum Trommelantrieb benötigten Motorstroms lässt sich das Postengewicht grob abschätzen. Aufgrund der hohen Ungenauigkeit ist diese Methode zur Prozessregelung ungeeignet.

Ein wesentlicher Vorteil einer Prozessregelung liegt im Gegensatz zur Prozesssteuerung darin, dass der Wert der Regelgröße bei der Regelung im Regelkreis zurückgeführt wird und durch Ermittlung der Regelabweichung eine gezielte, bedarfsgerechte Anpassung der Stellgrößen möglich ist (**Abbildung 1**).

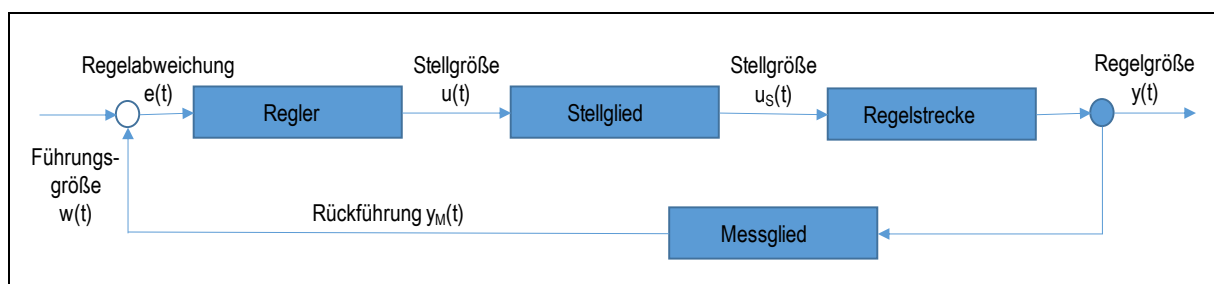


Abbildung 1: Blockschaltbild eines Regelkreises, modifiziert [10]

In aktuellen Publikationen wird die Eignung von künstlicher Intelligenz bzw. künstlichen neuronalen Netzwerken (KNN) erforscht, um die Trocknungsprozesse in der Lebensmittelindustrie zu optimieren [11,12]. Die Zuordnung des Feuchtegehalts erfolgt durch ein angelerntes KNN anhand verschiedener Trocknungsprozessparameter (z. B. Zeit, Heißlufttemperatur) und Zustandsparameter des Lebensmittels (z. B. Farbe), die in keinem linearen Zusammenhang zum Feuchtegehalt stehen. Zum Anlernen des KNN werden zum einen die Trocknungsprozess- und Zustandsparameter (Eingangsdaten für das KNN) ermittelt und zum anderen der Feuchtegehalt des Lebensmittels (Ausgangsdaten für das KNN) mit einer etablierten – aber zur kontinuierlichen Messung nicht geeigneten – Methode bestimmt.

2.2 Künstliche Intelligenz, Maschinelles Lernen und Deep Learning

Künstliche Intelligenz (KI) beschreibt in der Informatik jegliche menschenähnliche Intelligenz, die von Computern und Maschinen gezeigt wird [13]. Hierzu gehört das Erkennen von Objekten und Mustern, das Lernen aus Erfahrung und Beispielen, das Lösen von Problemen, das Verstehen von Sprachen (gehört oder gelesen) etc. Das Lernen aus Erfahrung („maschinelles Lernen“, ML) [14,15] ist hierbei ein wichtiges Werkzeug, das bei der Bewältigung komplexer und komplizierter KI-Aufgaben hilft. Beim „maschinellen Lernen“ lernt ein Programm selbst aus Daten, um ein gewünschtes Ziel zu erreichen. Dabei programmiert es sich selbst um. Das „maschinelle Lernen“ unterteilt man dabei in zwei Hauptkategorien: „Überwachtes Lernen“ („Supervised Learning“, SL) [16] und „nicht überwachtes Lernen“ („Unsupervised Learning“, UL) [17-19]. Beim „Überwachten Lernen“ sind zu den Eingangsdaten die jeweils erwünschten Ausgangsdaten bekannt. Ein Modell wird iterativ angepasst, bis es die Zuordnung der Datensätze möglichst genau wiedergeben kann. Die Hauptaufgaben des „überwachten Lernens“ sind die Regression, bei der eine (funktionale) kontinuierliche Beziehung zwischen den Eingangs- und Ausgangsdaten gesucht wird und die Klassifikation, welche neue Eingangsdaten in wohldefinierte, diskrete Kategorien unterteilen soll. Beim „unüberwachten Lernen“ sind nur die Eingangsdaten bekannt und es wird ein statistisches Modell erlernt, das diese beschreibt. Ein Hauptgebiet des „nicht überwachten Lernens“ ist die Clusteranalyse [19,20], bei der eine Gruppierung ähnlicher Daten in sog. Cluster erfolgen soll.

Künstliche neuronale Netzwerke (KNN) [21-23] sind eine Klasse von Methoden des „maschinellen Lernens“, die vom Aufbau menschlicher Gehirne inspiriert sind. Sie bestehen aus Schichten von künstlichen Neuronen, die miteinander verknüpft sind. Diese künstlichen Neuronen sind funktionell natürlichen nachempfunden. Sie erhalten Signale von anderen Neuronen, die sie zu einem Ausgangssignal y verarbeiten und an andere Neuronen weiterleiten. Die Verarbeitung der Eingangssignale erfolgt durch Anpassung der einzelnen Signale durch Gewichte und der Anwendung einer Aktivierungsfunktion (*Gleichung 1*) auf deren Summe [22].

$$y = f\left(\sum_i^n w_i x_i\right) \quad (1)$$

Ein KNN wird in einem iterativen Optimierungsprozess der Gewichtungen der Neuronen angelernt. Dazu ist zunächst eine Fehlerfunktion zu bestimmen, welche die Differenz zwischen dem Ergebnis des KNN und dem erwarteten Ergebnis beschreibt. Zur Minimierung des Fehlers werden die Gewichte des KNN mittels Optimierungsverfahren, wie den Gradientenverfahren [23-25] unter Anwendung des sog. „Backpropagation“-Algorithmus [26-29], angepasst. In ei-

nem allgemeinen Gradientenverfahren werden die Gradienten der Fehlerfunktion unter Variation aller Gewichte für alle Trainingsdatensätze ausgerechnet und das Netzwerk schrittweise in negativer Gradientenrichtung (Gradientenabstieg, „Gradient Descent“, GD) [23-25] angepasst, bis sich dem Minimum der Fehlerfunktion bei einem Gradienten von Null ausreichend angenähert wurde. Die Gradienten der Fehlerfunktion können unter Anwendung des „Backpropagation“-Algorithmus, bei dem die Kettenregel ausgenutzt wird, berechnet werden, wobei von hinten mit dem Ausgangssignal der letzten Schicht, anstatt mit deren Eingangssignal, begonnen wird, um den Rechenaufwand zu reduzieren. Dies wird rückläufig, von der letzten bis zur ersten Schicht, fortgesetzt.

Mit der Anzahl der Neuronen nimmt die Zahl und Komplexität der Rechenprozesse zur Optimierung des KNN zu, so dass der Zeitbedarf für die Iterationsschritte steigt. Dies lässt sich unter Anwendung des stochastischen Gradientenabstiegs (engl.: „Stochastic Gradient Descent“, SGD) [24,25] umgehen, bei dem in jedem Iterationsschritt nur die Gradienten für einen zufällig ausgewählten Trainingsdatensatz berechnet werden. Dies führt zu einer geringeren Konvergenzgeschwindigkeit, d.h. dass zum Erreichen des Minimums der Fehlerfunktion eine höhere Anzahl an Iterationsschritten notwendig ist. Bei großer Anzahl an Trainingsdatensätzen ist die Zeitersparnis je Iterationsschritt so hoch, dass bei Anwendung des stochastischen Gradientenabstiegs trotz der notwendigen höheren Anzahl an Iterationsschritten das Minimum der Fehlerfunktion schneller erreicht wird als dies unter Einsatz aller Trainingsdatensätze beim Gradientenabstieg möglich ist.

Bei der Entwicklung eines KNN ist es neben dem Anlernen der Gewichte entscheidend, eine optimale Netzwerktopologie zu identifizieren: Die Netzwerktopologie [22,30] ergibt sich aus der Anzahl der Eingangsdaten, der Anzahl der versteckten Schichten, der Anzahl der Neuronen je Schicht und der gewählten Aktivierungsfunktionen. Solche Parameter, die während des Trainings konstant bleiben, nennt man auch Hyperparameter. Eine optimale Auswahl dieser Hyperparameter auf Basis theoretischer Betrachtungen zu treffen, ist insbesondere bei komplexer Netzwerktopologie normalerweise nicht möglich, so dass eine Anpassung dieser Parameter, eine sog. Hyperparameteroptimierung (engl. „Hyperparameter Tuning“, HT), notwendig ist. Die Hyperparameteroptimierung kann unter Anwendung gezielterer Verfahren, wie z. B. dem oben beschriebenen Gradientenverfahren [31] oder der „Bayesschen Optimierung“, [32,33] erfolgen.

Beim Anlernen von KI-Modellen, wie den KNN, kann es zu einer Überanpassung [34,35] (engl.: „Overfitting“) kommen, d. h., dass sich das Modell zu sehr an die Trainingsdaten anpasst und die Fähigkeit verlernt, neue Datensätze korrekt auszuwerten. Bei einer Überanpassung des erstellten Modells wird die Übertragbarkeit schlechter, was sich durch dessen Anwendung auf andere, neue Datensätze (Testdatensätze) überprüfen lässt. Wenn der für die Testdatensätze berechnete Fehler mit der Zahl durchgeführter Iterationsschritte (Epochen) zunimmt, während der für die Trainingsdatensätze berechnete Fehler abnimmt, beginnt sich das Modell zu sehr an die Trainingsdaten anzupassen; das Anlernen ist abgeschlossen. Die Aufteilung der verfügbaren Datensätze in geeignete Trainings- und Testdatensätze erfolgt nach dem Kreuzvalidierungsverfahren [36]. Da die Optimierung eines KNN auf zwei Ebenen (Anlernen und Hyperparameteroptimierung) erfolgt, ist ein äußerer Testdatensatz zur Überprüfung der Hyperparameteroptimierung und ein weiterer Testdatensatz (Validierungsdatsatz) zur Überprüfung des Anlernens notwendig.

Es sollte daher möglich sein, mittels eines KNN die Restfeuchte im Trocknungsprozess anhand der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens (Nutzsignal) zu ermitteln. Die Audiodaten des Nutzsignals sind dabei von der Restfeuchte abhängig und lassen sich durch die in Kapitel 2.3 beschriebene Audioanalyse in diskrete Frequenzen (Tonlagen) mit dazugehörigen, zeitabhängigen Amplituden (Lautstärken) umwandeln. Nach dem Anlernen sollte das KNN den nicht-linearen Zusammenhang zwischen Abroll- und Fallgeräuschen und Restfeuchte abbilden können.

2.3 Akustik und Audioanalyse

Schallwellen (Töne, Geräusche) werden durch periodische Druckschwankungen (Schwingung) in Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern (Medium) hervorgerufen. Die Richtung der Ausbreitung und der Schwingung ist dabei gleich (Longitudinalwelle). Der maximale Wert der Druckschwankung entspricht der Amplitude (Lautstärke) und die zeitliche Abfolge der Frequenz (Tonlage). Für den Vergleich zwischen zwei Signalen ist auch die Phase, d. h. deren relativer zeitlicher Unterschied, von Bedeutung.

Schallwellen breiten sich in Medien verschieden aus. Bei Gasen (Luft) bewirkt eine Kraft eine große Bewegung mit geringen Druckunterschieden, die Schallgeschwindigkeit ist gering und die Dämpfung (Abnahme der Amplitude) groß. In Festkörpern erfolgt eine geringe Bewegung mit großen Druckunterschieden, die Schallgeschwindigkeit ist hoch und die Dämpfung gering [37,38]. Beim Übergang von einem Gas zu einem Festkörper wird ein großer Teil der Schallwellen reflektiert.

Die Umwandlung der Schallwellen in ein Audiosignal kann entweder über die Luft oder bei speziellen Mikrofonen über den direkten Kontakt zu einem Festkörper (Körperschall) erfolgen. Körperschallmikrofone nehmen fast nur die vom Festkörper übertragenen Schallwellen auf, da durch die Luft übertragene Schallwellen unterhalb bzw. an der unteren Grenze ihres Messbereichs liegen. Bei der Verarbeitung von Audiosignalen zur Minimierung von Störgeräuschen können zwei unterschiedliche Audiosignale, von denen das eine einen Nutz- und Störanteil und das andere nur den Störanteil enthält, elektronisch verrechnet werden. Störgeräusche weisen andere charakteristische Muster auf und können nach einer Skalierung von dem Signal mit beiden Anteilen subtrahiert werden, so dass ein optimales Audiosignal der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens gewonnen werden kann. Hierbei ist ggf. die zeitliche Differenz der Signale zu berücksichtigen bzw. zu korrigieren.

Eine weitere Methode der elektronischen Verarbeitung von Audiodaten ist die diskrete Fourier-Transformation. Diese ermöglicht zum einen eine Minimierung von Störgeräuschen und zum anderen eine Bilddarstellung des Audiosignals [39-41]. Geräusche setzen sich aus überlagernden sinusförmigen Schwingungen (Töne) mit unterschiedlicher Amplitude, Frequenz und Phase zusammen, die sich durch eine diskrete Fourier-Transformation in einzelne Schwingungen mit vorgegebenen Frequenzen in einem festgelegten Zeitabschnitt zerlegen lassen.

Bei der Minimierung von Störgeräuschen mittels diskreter Fourier-Transformation werden Frequenzen von Störgeräuschen durch Vergleich von Nutz- und Störsignalen identifiziert und frequenzabhängig korrigiert, um Unterschiede in den Amplituden von Nutz- und Störsignalen zu berücksichtigen. Ferner kann mittels der diskreten Fourier-Transformation ein quasi-dreidimensionales Bild (Spektrogramm) der sich überlagernden sinusförmigen Schwingungen erstellt werden, dessen Pixel jeweils die Amplitude eines bestimmten Frequenzbereichs zu einem bestimmten Zeitraum darstellen [42].

Neben der Restfeuchte, die von den textilspezifischen Eigenschaften des Wäschepostens abhängt, werden die Abroll- und Fallgeräusche auch von Prozessparametern und Maschinencharakteristika beeinflusst (**Tabelle 1**).

Tabelle 1: Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens beeinflussende Größen		
Wäscheposten	Prozessparameter	Maschinencharakteristika
<ul style="list-style-type: none"> • Anfangsrestfeuchte • Postengewicht • Teilegewicht, Abmessungen • Fasersubstrat • Wäschekonfektion • Textilkonstruktion 	<ul style="list-style-type: none"> • Füllverhältnis • Trommelbewegung (g-Faktor, Lauf-/Stillstandzeit) • Luftdurchsatz (Strömungsgeschwindigkeit) • Temperatur und relative Luftfeuchte der Heißluft 	<ul style="list-style-type: none"> • Beladungsmenge • Mitnehmer, Perforation • Trommelgewicht • Trommelmaterial • Trommellagerung

Es war davon auszugehen, dass die Prozessparameter in erster Linie den Verlauf von Frequenz und Amplitude der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens (Nutzsignal) bei fortschreitender Trocknung beeinflussen: Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit (u. a. durch den Anteil von Frisch- zu Umluft beeinflusst) der Heißluft sowie der Luftdurchsatz bestimmen die Trocknungsgeschwindigkeit. Auch das Füllverhältnis wirkt sich auf die Trocknungsgeschwindigkeit aus und beträgt bei der gewerblichen Textilaufbereitung 20-25 l/kg, d. h. 1 kg Wäsche auf 20-25 l Trommelvolumen. Der zeitliche Abstand zwischen den einzelnen Fallgeräuschen hängt unmittelbar von der Trommelbewegung (g-Faktor, Stillstandzeit) ab. Naheliegend war zudem, dass von den Maschinencharakteristika sich insbesondere die Trommeleigenschaften (Geometrie, Gewicht und Material) sowie deren Lagerung auf die Frequenz und die Amplitude des Nutzsymbols auswirken. Es ist allerdings aufgrund des nahezu konstanten Füllverhältnisses zu erwarten, dass die Änderung der Amplitude bei fortschreitender Trocknung bei gleichen Wäscheposten und den gleichen Prozessparametern einen ähnlichen Verlauf aufweist und dies nicht nur in baugleichen Trommeln unterschiedlicher Beladungskapazität einer Produktserie. Den wohl größten und kaum vorhersagbaren Einfluss auf das Nutzsignal haben die textilspezifischen Eigenschaften der einzelnen Wäscheteile, wenn auch in textilen Dienstleistungsbetrieben eine Vorsortierung erfolgt, d. h. üblicherweise Posten gleicher Wäscheart (Fasersubstrat, Garn- und Flächenkonstruktion, Textilkonfektion und -ausrüstung) im Tumbler getrocknet werden.

Bei schleuderfeuchten Handtüchern sind die Amplituden (Lautstärke) der Geräusche höher als bei getrockneten Handtüchern. Der Unterschied der Amplituden ist von der Frequenz abhängig und ist insbesondere bei niedrigen Frequenzen größer, so dass das Fallgeräusch „dumpfer“ klingt. Fällt das schleuderfeuchte Handtuch auf den Trommelboden und bleibt dort liegen, dämpft es durch sein Gewicht die Schwingung der Trommel; die Dämpfung ist bei hohen Frequenzen größer, da die Wellenlänge (1 - 20 cm) der Schallwelle kleiner ist als die Kontaktfläche (ca. 50 x 100 cm²). Mit abnehmendem Gewicht nimmt die Dämpfung ab. Niedrige Frequenzen (Wellenlänge 1 - 3 m) werden weniger stark beeinflusst.

Daraus folgt, dass ein Zusammenhang zwischen Abroll- und Fallgeräuschen (Nutzsignal) und dem Gewicht bzw. der Restfeuchte des Wäschepostens bestehen sollte, der sich allerdings aufgrund verschiedener von Wäscheteilen beeinflussender Parameter sowie unterschiedlicher Dämpfungseigenschaften verschiedener Wäschearten nicht mittels mathematischer Funktionen beschreiben und nicht berechnen lässt [43-45].

3 Forschungsziel und prinzipieller Lösungsweg

Ziel des Forschungsvorhabens war, den Trocknungsprozess im Tumbler (Trommeltrockner) mittels eines KI-basierten Audioanalyse-Systems zu regeln und somit den Wärmeenergiebedarf und die Textilschädigung zu minimieren. Dabei wurden die Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens (Nutzsignal) in der Trommel als Messgrößen genutzt, die vom Gewicht und somit von der textilen Restfeuchte abhängig war. Zur Erfassung der Audiodaten wurde ein Audioaufnahmesystem (Funktionsmuster) entwickelt, welches in das Tumblergehäuse integriert wurde (Messglied des Regelkreises). Dabei wurde das Nutzsignal mit einem fest mit der Trommel verbundenen Körperschallmikrofon (Schallübertrag durch den Festkörper) aufgenommen, während die Aufnahme der Störgeräusche (z. B. Betriebsgeräusche) mit klassischen Mikrofonen (Schallübertrag durch die Luft) erfolgte.

Die Analyse und Auswertung der Audiodaten erfolgte mittels eines speziell für diese Anwendung entwickelten künstlichen neuronalen Netzwerkes (KNN), das nach dem Anlernen die momentane Restfeuchte des Wäschepostens (Regelgröße) bestimmen konnte. Dazu wurde eine Kleinrechnereinheit mit einem auf die Ausführung von KI-Systemen spezialisierten Tensor-Rechenmodul in den Tumbler integriert, auf die das angelernte KNN sowie die notwendige Software zur Umwandlung der Audiodaten in diskrete Frequenzen mit dazugehörigen, zeitabhängigen Amplituden und zur Minimierung von Störsignalen aufgespielt wurden. Die Nutzschnale wurden während des Trocknungsprozesses kontinuierlich aufgenommen. In festgelegten Zeitabständen wurde die Restfeuchte des Wäschepostens (IST-Wert der Textilfeuchte) mittels KI-Audioanalyse bestimmt, die als Regelgröße für den Trocknungsprozess diente und mit der Führungsgröße (Soll-Wert der Textilfeuchte) verglichen, die Regelabweichung ermittelt. Im implementierten Regelkreis kann eine gezielte, bedarfsgerechte Anpassung der Prozessparameter (z. B. Trocknungsdauer, Heißlufttemperatur, Luftdurchsatz, Anteil Frisch-/Umluft, g-Faktor, Stillstandzeit) vorgenommen werden, sodass der gewünschte Soll-Wert erreicht wird.

Der Lösungsweg umfasste die folgenden Arbeitsschritte:

- Untersuchungen zum Einfluss von Maschinencharakteristika bzw. Trommeleigenschaften auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens
- Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler
- Analyse der Abroll- und Fallgeräusche abhängig von den Prozessparametern
- Analyse der Abroll- und Fallgeräusche im Tumbler abhängig von textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile im Wäscheposten
- Entwicklung eines KNN zur Audioanalyse der textilen Restfeuchte
- Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxisnahen Bedingungen
- Konzepte zur Integration der KI-Audioanalyse in gewerbliche Tumbler
- Dokumentation und Berichterstattung

4 Experimenteller Teil

4.1 Audioaufnahmesystem

Die Aufnahme der Audiosignale erfolgte über in die Außentrommel integrierte Mikrofone. Dabei wurde das Nutzsignal mit an der Trommel mit der Kontaktfläche enganliegenden Körperschallmikrofonen (Kontaktmikrofone) aufgenommen, während die Aufnahme der Störgeräusche (z. B. Betriebsgeräusche) mit einem klassischen Mikrofon (Schallübertragung durch die Luft), platziert in Aufnahmerichtung der Störquelle (Antriebsmotor, Gebläse) in einem Abstand von 10 – 20 cm von dieser erfolgte. Eine Kleinrechnereinheit wurde mit der Kontrolleinheit des Tumblers verbunden. Die Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens (Nutzsignal) sowie die Störsignale wurden während des Trocknungsprozesses kontinuierlich aufgenommen.

Zur Untersuchung des Stör- und Nutzsignals in gewerblichen Tumblern wurden Luftschall-(LM1) und Körperschallmikrofone (KM1, 3-fach Piezo-Kontaktmikrofone) mit dem Frequenzaufnahmebereich von 70 Hz - 15.000 Hz eingesetzt, da dies der zur Aufnahme der Nutzsignale relevante Bereich ist. Des Weiteren weisen die verwendeten Körperschallmikrofone eine sehr flache Bauweise auf und waren kompakt genug, um in gewerbliche Tumbler integriert werden zu können. Diese wurden mit einem hitzebeständigen Abdeckband derart befestigt, dass die Kontaktfläche vollständig auf dem Trommelmantel aufliegt (**Abbildung 2**).

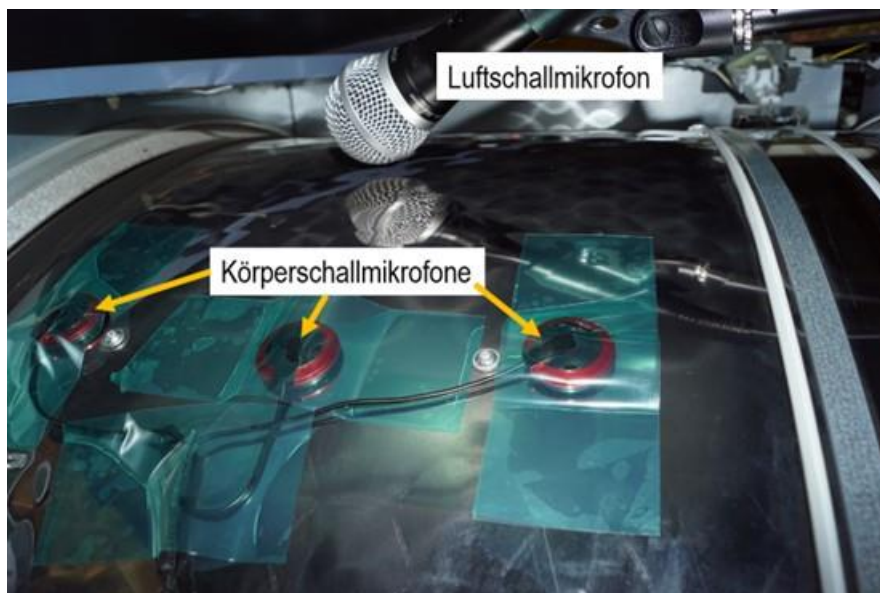


Abbildung 2: Von außen an der Trocknertrommel befestigte Körperschallmikrofone (Kontaktmikrofone) und Luftschallmikrofon

4.2 Versuchstand zur Untersuchung von Trommeln unterschiedlicher Belastungskapazität

Der Versuchsstand (**Abbildung 3**) bestand aus einem Gestell aus lackiertem Baustahl (Abstände zwischen den Wellen und Wänden verstellbar für verschiedene Trommeltiefen und -durchmesser, z. B. Trommel E120 in **Abbildung 4**) zum Installieren von Trommeln unter-

schiedlicher Volumina und Konstruktion, **Tabelle 2**), jeweils einer an das Gestell anschraubbaren Rückwand und Tür (Material Eukalyptus, Siebdruckplatte, Dicke 15 mm, Durchmesser 1.500 mm) und einer geerdeten Antistatik-Bürste in Kontakt mit der Trommel zur Verhinderung von elektrostatischer Aufladung bei Beladung mit trockeneren Textilien.

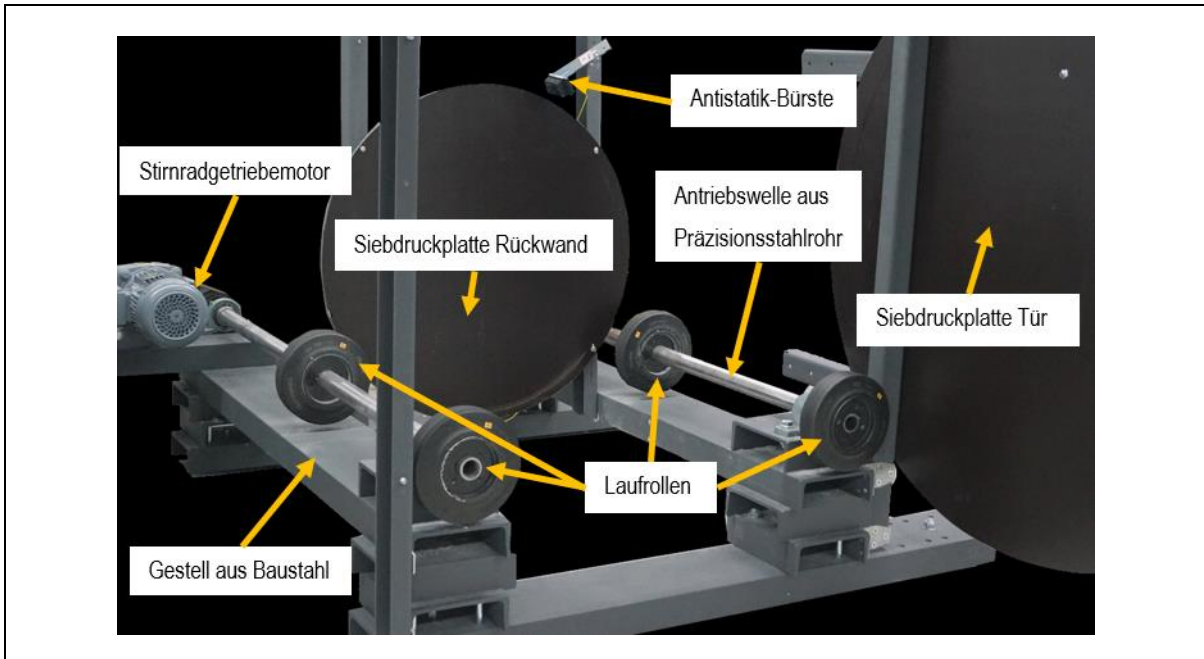


Abbildung 3: Aufbau des Versuchsstandes zur Untersuchung des Trommeinflusses

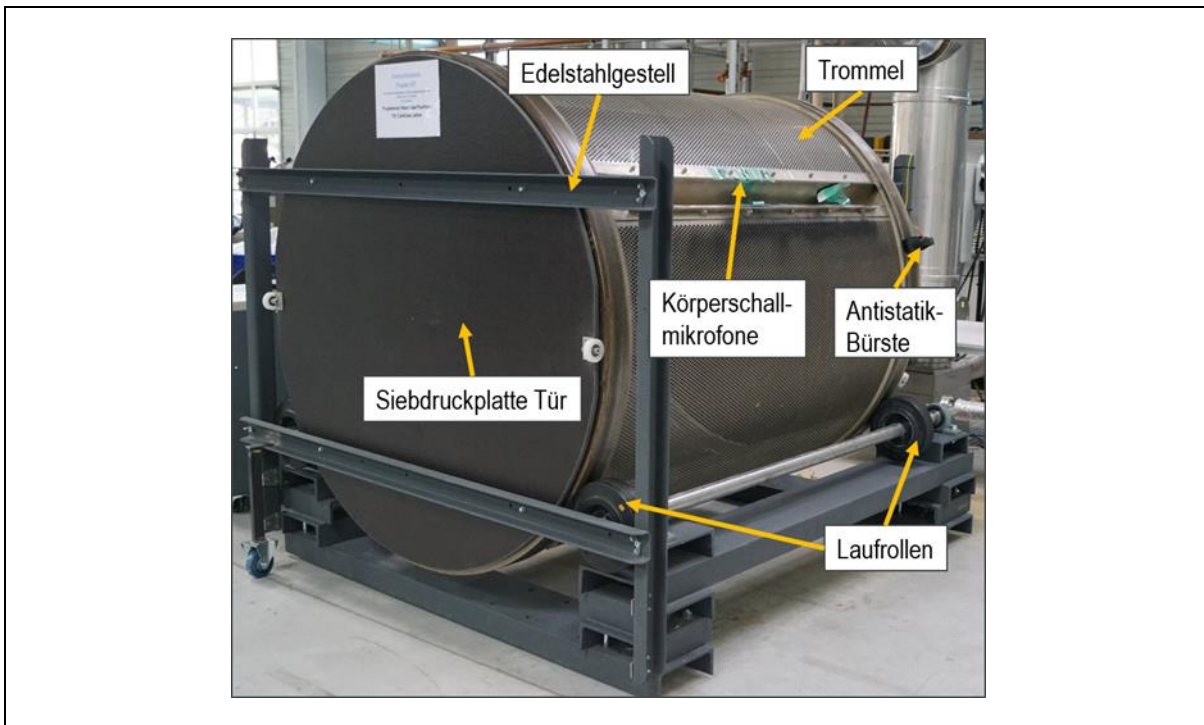


Abbildung 4: Versuchsstand mit Trommel E120

4.3 Untersuchte Trommeln

Es wurden die in **Tabelle 2** angegebenen Trommeln unterschiedlicher Beladungskapazität (bezogen auf das Füllverhältnis 25 l Trommelvolumen pro kg Trockenwäsche) eingesetzt.

Tabelle 2: Technische Daten der eingesetzten Trocknertrommeln						
Bezeichnung	Beladungsmenge in kg	Volumen in l	Durchmesser in mm	Tiefe in mm	Perforation rel. zu Trommel­fläche	Rippen (Anzahl, Höhe rel. zum Durchmesser)
A14	14	350	840	640	Rückseite 4 % u. Vorderseite 3 %	4 (7 %)
B26	26	660	947	936	Rückseite 11 % u. Mantel 40 %	4 (10 %)
C26	26	660	940	950	Rückseite 2 % u. Mantel 16 %	3 7 bis 15 % linear in Längsrichtung ansteigend
D90	90	2.250	1.385	1496	Mantel 16 %	4 (11 %)
E120	120	3.000	1.500	1697	Mantel 16%	4 (7 %)

4.4 Messprinzip

In **Abbildung 5** ist das prinzipielle Messprinzip zur feuchtigkeitsgeregelten Trocknung dargestellt.

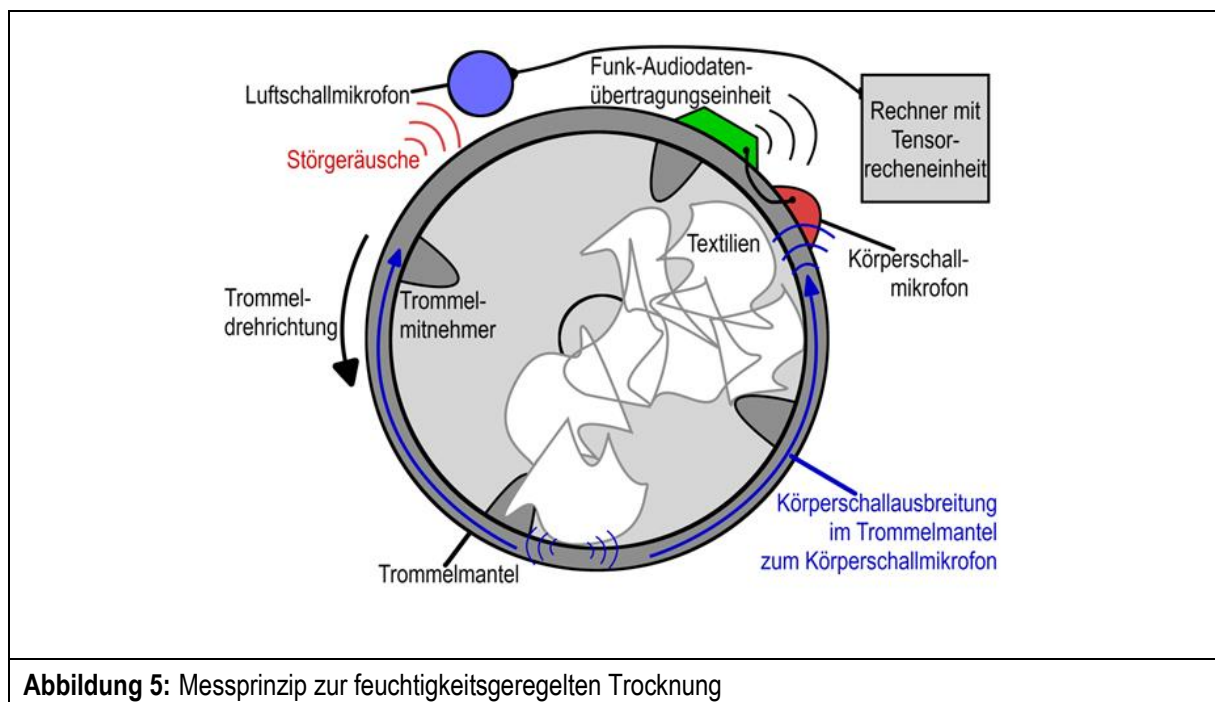


Abbildung 5: Messprinzip zur feuchtigkeitsgeregelten Trocknung

Zur Messung werden die Nutzsignale (Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens) über die Körperschallmikrofone an der Trommel aufgenommen und über die Funk-Audiodatenübertragungseinheit an eine Tensorrecheneinheit übertragen, wo die Audiokorrektur mit den über die Luftschallmikrofone aufgenommenen Störsignalen und die KI-basierte Audioanalyse ausgeführt wird.

Als Kleinrechner für das KNN wurde ein Raspberry Pi 4 (8 GB RAM) ausgewählt, der zusätzlich um eine Tensorrecheneinheit (USB-Beschleuniger, Coral Edge Tensor Processing Unit Coprocessor) erweitert wurde, um die Leistung für das KNN zu erhöhen. Der KNN-Algorithmus konnte damit schneller und energiesparender ausgeführt werden.

Nach Bestimmung der momentanen Textilfeuchte über das KNN können die Prozessparameter (z.B. Heißlufttemperatur, Luftdurchsatz, Umluftklappenstellung, g-Faktor) und der Abschaltzeitpunkt des Trocknungsprozesses (d. h. Brennerabschaltung, Umluft 100 %) für eine effizientere und textilschonendere feuchtigkeitsgeregelte Trocknung angepasst werden.

4.5 Audiodatenübertragungseinheit

Zur kabellosen Aufnahme des Nutzsignals mit enganliegenden Körperschallmikrofonen an der Trommel wurde ein Audiorekorder verwendet (**Abbildung 6**).



Zum Einbau in bestehende Tumbler und Einsatz in der Praxis wurde parallel eine kabellose Audiodatenübertragungseinheit auf Basis eines Arduino entwickelt, welche die elektrischen Signale in digitale Daten umwandelt, per Funk überträgt und zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stellt.

Die Position der Körperschallmikrofone an der Trommel, an der ein optimales Signal zu Rauschverhältnis erhalten wird, wurde ermittelt, indem die Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens zunächst bei manuellem Drehen der Trommel (Vermeidung von Störgeräuschen) aufgenommen wurden. Dazu wurde der Wäscheposten in Abständen von 2 – 3 min herausgenommen und in Tumbler B20 (**Tabelle 2**) auf die vorgegebene Restfeuchte getrocknet. Um die Betriebsgeräusche bei laufendem Trommelantrieb sowie unerwünschte Umgebungsgeräusche zu erfassen und minimieren zu können, wurde ein Luftschallmikrofon über der Trommel

positioniert (**Abbildung 6**) und die Störgeräusche sowohl mit Trocknerbetrieb ohne als auch mit Beladung aufgenommen.

4.6 Eingesetzte Tumbler

Um Störgeräusche zu untersuchen, die an Tumblern in Betrieb auftreten, wurden Körperschall- und Luftschallmikrofone in gewerbliche Tumbler integriert. Die technischen Daten der verwendeten Tumbler sind in **Tabelle 3** angegeben.

Tabelle 3: Technische Daten der verwendeten Tumbler		
Parameter	Tumbler A20	Tumbler B20
Volumen	500 l	433 l
Durchmesser / Tiefe	1100 mm / 529 mm	990 / 563 mm
Perforation (Lochfläche/Trommelfläche)	Rückseite gelocht, 16 %	gelochter Mantel
Rippenanzahl und -höhe (rel. zu Trommeldurchmesser)	2 mit 5 %, 2 mit 7 %	3 mit 11 %
Maximaler Luftdurchsatz	1.000 m ³ /h	1.500 m ³ /h
Reversierung (Laufzeit/Stillstand)	87 / 3	90 / 5
Art der Heizung und Leistung	Gas 30,0 kW	Gas 40,0 kW
Maximale Zulufttemperatur	200 °C	200 °C
g-Faktor / Trommeldrehzahl	0,85 / 36 min ⁻¹	0,72 / 36 min ⁻¹
Maximale Beladungsmenge / Füllverhältnis (CO)	25 kg / 20 l/kg	21 kg / 20 l/kg

4.7 Signalerfassung

Die gemessenen Audiosignale bestanden aus Nutzsignalen (Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens) und Störsignalen (Betriebsgeräusche Trommelantrieb und Heißluftgebläse).

4.7.1 Nutzsignale

Die Nutzsignale wurden mit Körperschallmikrofonen (KM1, Kapitel 4.1) aufgenommen, wobei ihre Positionierung abhängig von der Luftführung und Trommelperforation ist. Bei ungelochtem Trommelmantel mit ausschließlicher Perforation an der Rückwand, wie bei Tumbler A20 (**Tabelle 2**), wurden die Mikrofone am Trommelmantel befestigt (**Abbildung 2**). Dabei wurde ein sich mit der Trommel drehendes kabelloses Audioübertragungssystem bei kabelgebundenen Mikrofonen eingesetzt (Kapitel 4.1). Bei gelochtem Trommelmantel von Tumbler B20, wurden die Körperschallmikrofone an einer Position befestigt (z. B. direkt unterhalb der Trommel, KM1 **Abbildung 8**), an der eine Lufttemperatur von 70 °C (max. Betriebstemperatur der Mikrofone) nicht überschritten wurde und der Abstand zur Innentrommel nicht mehr als 1 cm betrug.

Für die visuelle Beurteilung der Nutzsignale wurden diese über eine diskrete Fourier-Transformation in Amplituden- und Frequenzwerte umgewandelt und als sogenannte Spektrogramme dargestellt (**Abbildung 7**). Hierbei werden die Frequenzen in Hz auf der y-Achse und die Laufzeit der Audioaufnahme auf der x-Achse in Sekunden dargestellt. Die Amplitudenwerte werden

nach einem Farbcode (rechte Skala in **Abbildung 7**) in Abhängigkeit von der Frequenz und Zeit dargestellt.

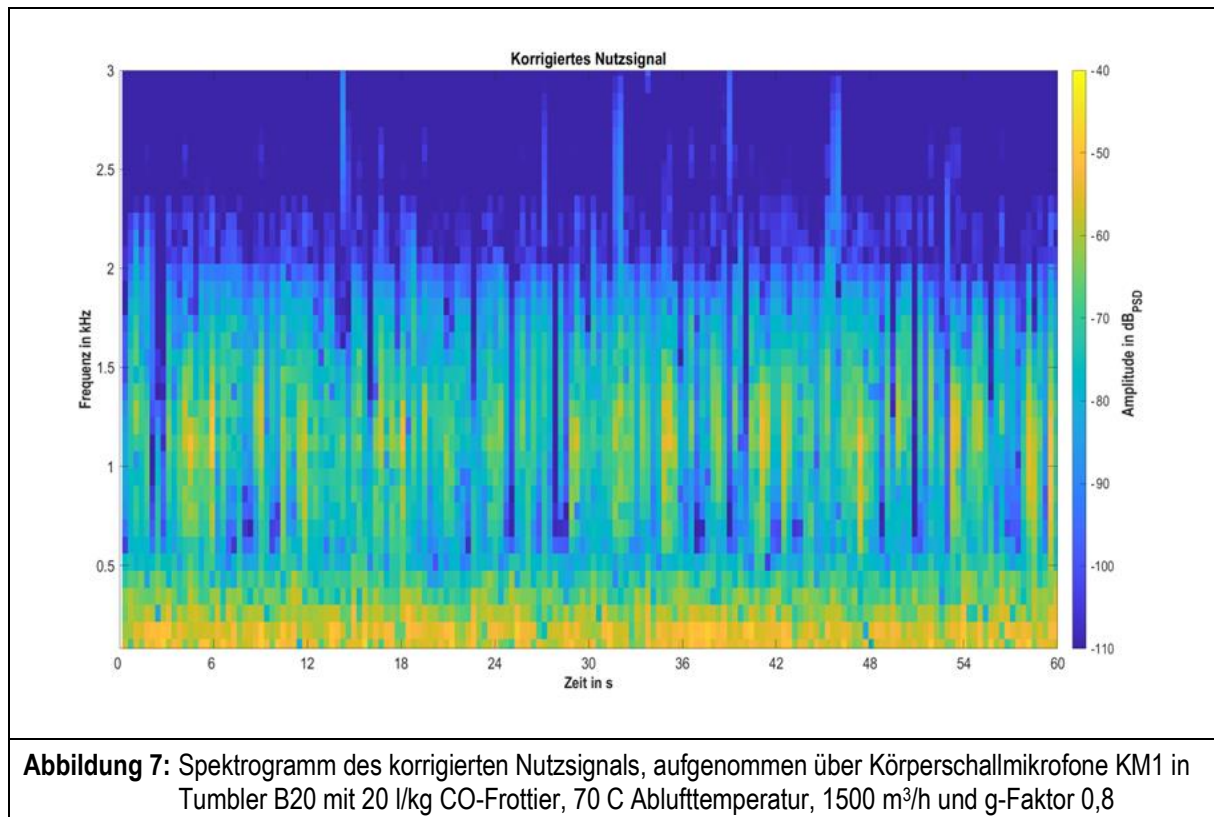


Abbildung 7: Spektrogramm des korrigierten Nutzsignals, aufgenommen über Körperschallmikrofone KM1 in Tumbler B20 mit 20 l/kg CO-Frottier, 70 C Ablufttemperatur, 1500 m³/h und g-Faktor 0,8

Die Amplitude ist dabei in der Einheit Dezibel-PSD (spektrale Leistungsdichte dB_{PSD}, engl.: Power-Spectral-Density, PSD) angegeben und lässt sich durch Umrechnung der spektralen Leistungsdichte psd (ermittelt über Fourier-Transformation) zu Dezibel-Werten wie folgt abschätzen:

$$dB_{PSD} = 10 \log_{10}(psd) \quad (2)$$

Generell ist Dezibel als Maß für den Schalldruckpegel eine relative Einheit, d. h. es wird das Verhältnis zweier Leistungsgrößen gebildet, welches die Verstärkung eines Ausgangssignals im Vergleich zu einem Eingangssignal angibt. So beziehen sich z. B. die Messwerte in der Einheit dB_{FS} auf die höchstmöglichen Signalamplitude A_{max} (in V) der digitalen Signalverarbeitung in der Audiosoftware, sodass alle gemessenen Amplituden A , die immer kleiner als A_{max} sind, negative Dezibel-Werte zur Folge haben ($A/A_{max} < 1$, Maximalwert dB_{FS}=0; verzerrtes Signal bei Überschreiten des Maximalwerts).

$$dB_{FS}(A) = 20 \log_{10}(A/A_{max}) \text{ mit } A < A_{max} \quad (3)$$

Die negativen Werte ergeben sich aus der Definition des Logarithmus, der für Werte unter eins negativ ist. Somit werden auch die Ausgangswerte in dB_{PSD} (Formel 2) für kleine Werte der spektralen Leistungsdichte psd negativ.

Bei den im Rahmen des Projektes durchgeführten Messungen wies die spektrale Leistungsdichte psd der gemessenen Audiodaten immer Werte unter eins auf, sodass die Skala der

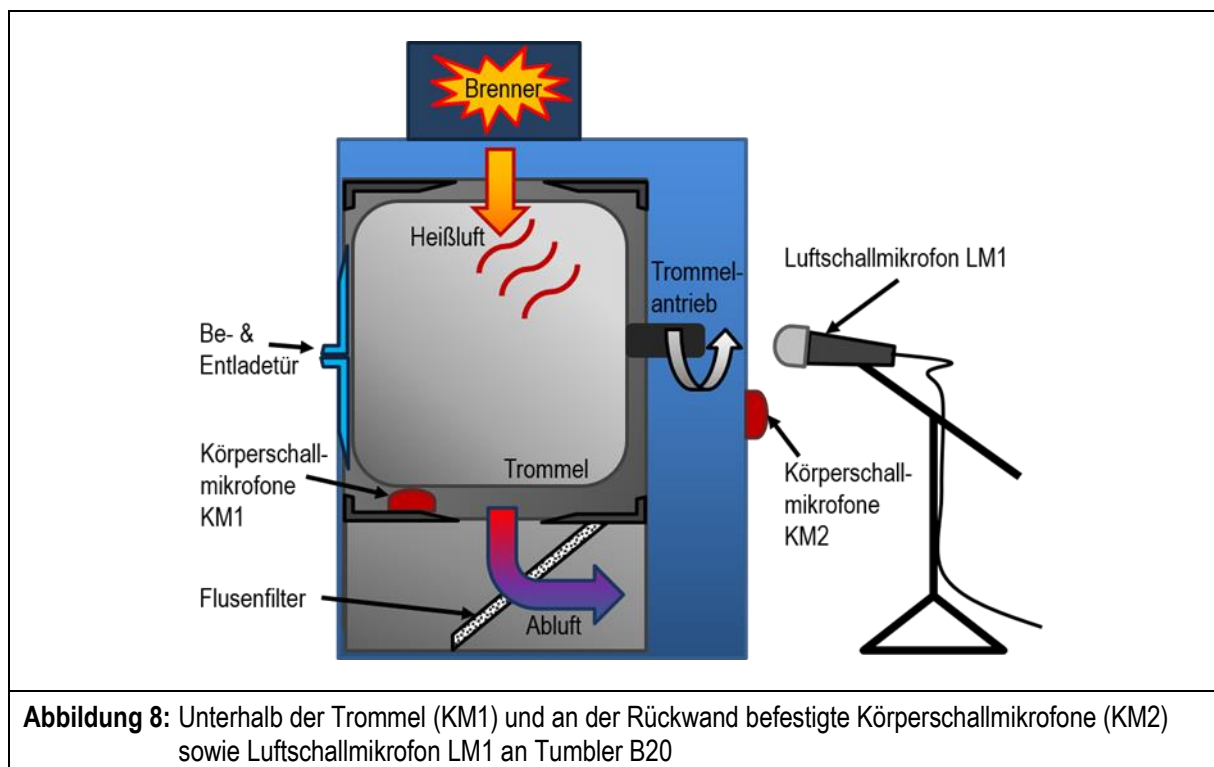
Amplitude Werte von - 40 dB_{PSD} bis - 140 dB_{PSD} enthält (entsprechende Abbildungen in Kapitel 5.1).

4.7.2 Erfassung der Störsignale

Die Erfassung der Störgeräusche wurde an beiden in **Tabelle 3** angegebenen Tumbler vorgenommen.

Da nur die Nutzsingale mit der Textilfeuchte des Wäschepostens korrelieren sollten, wurden die Störsingale über eine Audiokorrektur von den gestörten Nutzsingalen (gemessen mit KM1) subtrahiert, sodass die nun korrigierten Nutzsingale zum Anlernen des KNN verwendet werden konnten.

Dazu wurden die Störsingale separat über weitere Körperschallmikrofone (KM2) und ein Luftschallmikrofon (LM1) aufgenommen. Da Betriebsgeräusche vor allem am Brenner und am Trommelantrieb entstehen, wobei letzteres aufgrund der höheren Lautstärke den größeren Anteil ausmacht, wurde das Luftschallmikrofon zur Erfassung der Störgeräusche in der Nähe des Antriebsmotors positioniert (**Abbildung 8**).



Befanden sich die Körperschallmikrofone in einem geschlossenen System (wie bei Tumbler B20), wurden die Umgebungsgeräusche, die nicht vom Tumbler selbst erzeugt wurden, von den Körperschallmikrofonen nicht aufgenommen, sodass auf ein zweites zusätzliches Luftschallmikrofon verzichtet wurde.

Die Betriebsgeräusche während des Trocknungsprozesses wurden zunächst ohne Beladung (ohne Nutzsingale) der Trommel erfasst. Mit diesen Daten wurde die Audiokorrektur an den Messdaten mit Beladung inklusive Störsingale durchgeführt, um das korrigierte Nutzsingal zu erhalten. Dieses wurde mit den durch manuelle Trommeldrehung erhaltenen Referenzwerten für das Nutzsingal verglichen. Diejenigen Positionen der Mikrofone, bei denen das korrigierte

Nutzsignal sich dem Referenznutzsignal aus der manuellen Trommeldrehung annäherte, wurden als optimal gewertet und für die weiteren Messungen verwendet.

Die korrigierten Nutzsignale wurden über eine diskrete Fourier-Transformation in Amplituden- und Frequenzwerte für die Entwicklung und das Anlernen des KNN umgewandelt.

4.8 Eingesetzte Textilien

Um die zur Entwicklung und zum Anlernen des KNN zur Verfügung stehende Anzahl an Datensätzen zu erhöhen, wurden folgende Wäscheposten zusammengestellt (**Tabelle 4**).

Tabelle 4: Wäscheposten zur Untersuchung textilspezifischer Eigenschaften						
Bezeichnung	Faserart	Textilkonstruktion	Flächengewicht in g/m ²	Maße in cm	Teileanzahl	Beladungsmenge / Füllverhältnis in l/kg
CO1	CO	Gewebe	175	100 x 100	97 - 114	17-20 kg / 25-20
CO2	CO	Frottier	550	70 x 140	32 - 37	17-20 kg / 25-20
CO3	CO	Frottier	400	50 x 100	85 - 100	17-20 kg / 25-20
CO4	CO	Frottier	380	50 x 100	26	5 kg / 87
PESCO1	PES/CO 42/58	Gewebe	200	60 x 70	130 - 202	11-17 kg / 40-25
PESCO2	PES/CO 10/90	Frottier	420	50 x 100	77 - 91	17-20 kg / 25-20

Vor den ersten Messungen wurden die Textilien nach DIN EN ISO 15797 mit Referenzwaschmittel (4 g/l) ohne Aufheller eingewaschen (**Tabelle 5**).

Tabelle 5: Verfahren zum Aufbereiten neuer Wäscheposten nach DIN EN ISO 15797	
Parameter	Werte für CO
Füllverhältnis in kg/l	12
Flottenverhältnis Waschen in kg/l	4
Waschdauer bei 75 °C in min	20
Anzahl der Spülgänge	3
Flottenverhältnis Spülen in kg/l	5
Dauer der Spülgänge in min	3
g-Faktor Waschen und Spülen	0,75
Entwässern in min	1
g-Faktor Zwischenschleudern	50-100
Zwischenschleudern in min	1
g-Faktor Endschleudern	250-350
Endschleudern in min	6

Danach wurden die Wäscheposten mit dem in **Tabelle 6** angegebenen Verfahren vor jedem Trocknungsprozess auf die Restfeuchte 60 % (bezogen auf bone dry) für CO-Frottier, bzw. 35 % für PES/CO angefeuchtet.

Arbeitsschritt	Dauer in min	g-Faktor
Spülen bei 20 °C, Flottenverhältnis 5 l/kg	3	0,72
Anschleudern	7	257
Endschleudern	4	890

5 Ergebnisse und Diskussion

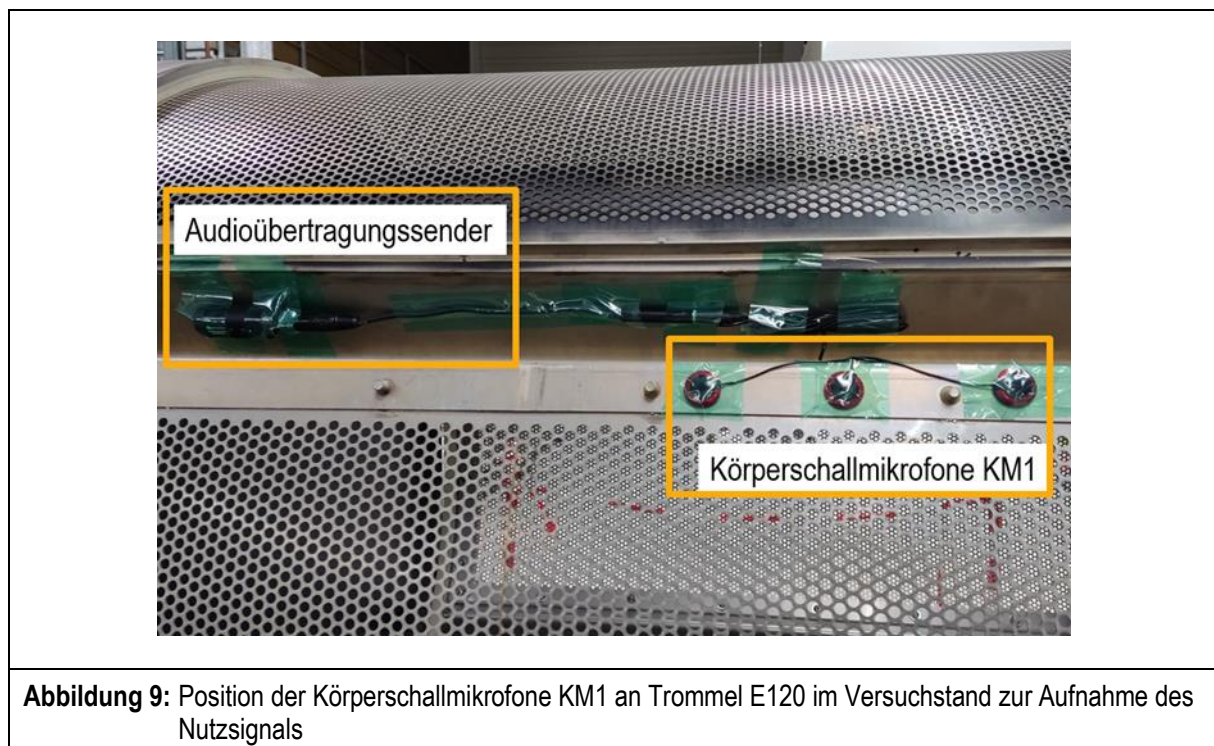
5.1 Untersuchungen zum Einfluss von Maschinencharakteristika bzw. Trommeleigenschaften auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens

Zunächst wurde das Audioaufnahmesystem aus Kapitel 4.1 in den Versuchsstand nach Kapitel 4.2 integriert.

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, werden die Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignal) von Prozessparametern und Maschinencharakteristika beeinflusst (**Tabelle 1**). Aus diesem Grund wurde zunächst der Einfluss der Trommeleigenschaften Durchmesser, Tiefe, Perforation und Rippenanzahl systematisch untersucht.

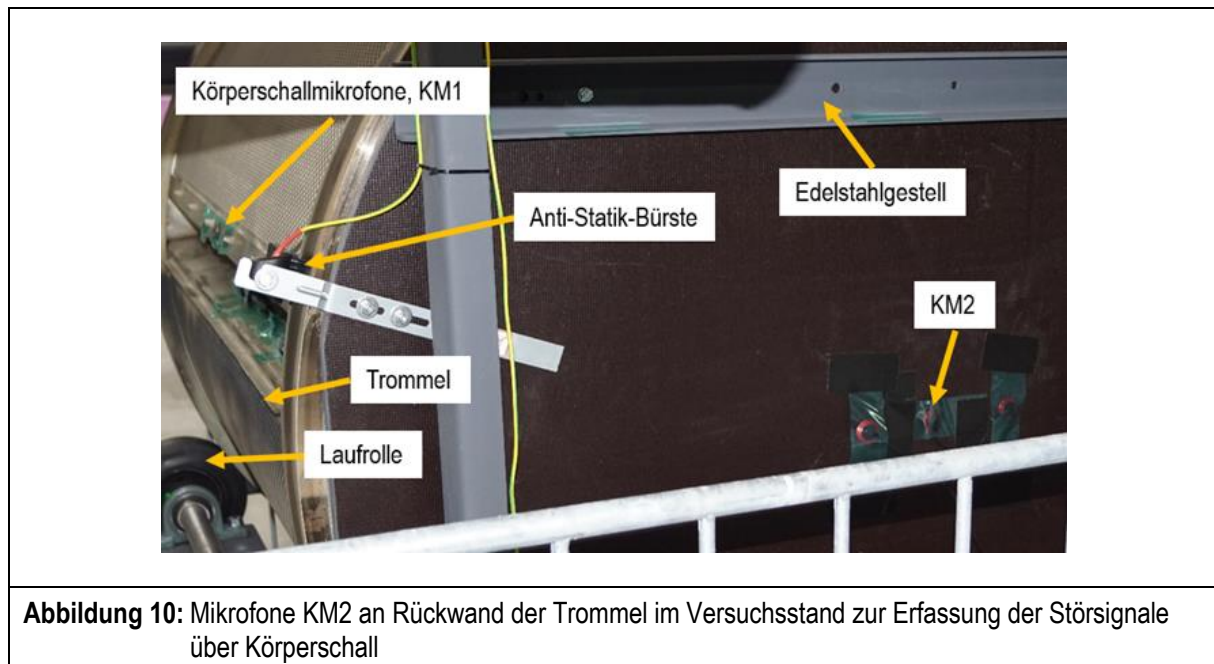
5.1.1 Bestimmung der Störsignale am Versuchsstand mit Mikrofonintegration

Zur Charakterisierung der Störgeräusche wurden die baugleichen Körperschallmikrofone KM1 und KM2 (Kapitel 4.1) eingesetzt, die jeweils aus 3-fach Piezo-Kontaktmikrofonen bestehen und deren Ausgangssignale zusammengeführt als Mittelwert an die Auswerteeinheit gegeben wurden. Am Versuchsstand wurden die Mikrofone KM1 in der Mitte (bezogen auf die Trommetiefe) des Trommelmantels (**Abbildung 9**) und die Mikrofone KM2 an der Rückwand (**Abbildung 10**) bzw. Vordertür installiert.



Die Körperschallmikrofone KM1 am Trommelmantel (nicht perforierter Bereich) dienen zur Aufnahme des Nutzsignals, die Körperschallmikrofone KM2 an der Rückwand bzw. Tür wurden zur Störsignalerfassung verwendet. Zusätzlich nimmt das in **Abbildung 12** dargestellte Luftschallmikrofon LM1 (Frequenzbereich 70 - 15.000 Hz) weitere Störgeräusche, z. B. vom Motor, auf.

Zur Ermittlung der optimalen Mikrofonpositionen für die Störsignalaufnahme wurde das Audiosignal ohne Beladung, also ohne Nutzsignal, mit den Mikrofonen KM2 und LM1 aufgenommen.



Zusätzlich wurde das Nutzsignal bei manueller Trommeldrehung (Referenzwert ohne Betriebsgeräusche) mit den Körperschallmikrofonen KM1 aufgenommen. Die Störsignale wurden dadurch auf ein Minimum reduziert, wobei allerdings die durch die Trommeldrehung verursachten Störgeräusche nicht vollständig vermieden werden konnten.

In **Abbildung 11** sind vier Spektrogramme gezeigt; die Amplituden des Störsignals, des gestörten Nutzsignals und des korrigierten Nutzsignals sowie des Referenz-Nutzsignals ohne Betriebsgeräusche bei manueller Trommeldrehung.

Bei optimalen Mikrofonpositionen sollten das korrigierte Nutzsignal und das Referenznutzsignal sich weniger unterscheiden als das gestörte Nutzsignal und das korrigierte. Beim Vergleich der beiden untersten Spektrogramme stellt man fest, dass das Geräusch des Aufpralls (vertikale gelbe Linien) sich bei beiden deutlich vom Hintergrundrauschen abhebt, während vor der Korrektur das Nutzsignal kaum vom Hintergrund zu unterscheiden ist.

Aus diesem Grund wurden die Mikrofone an den für diese Versuche optimalen Positionen installiert.

Die höchste Störsignalreduktion für KM1 wurde erzielt, wenn KM2 an der Rückwand (**Abbildung 10**) des Versuchsstands und LM1 oberhalb des Antriebsmotors platziert wurde (**Abbildung 12**), da sich in diesen Bereichen die Störquellen Trommelantrieb und -rotation befinden und diese neben LM1 zusätzlich von KM1 aufgenommen werden.

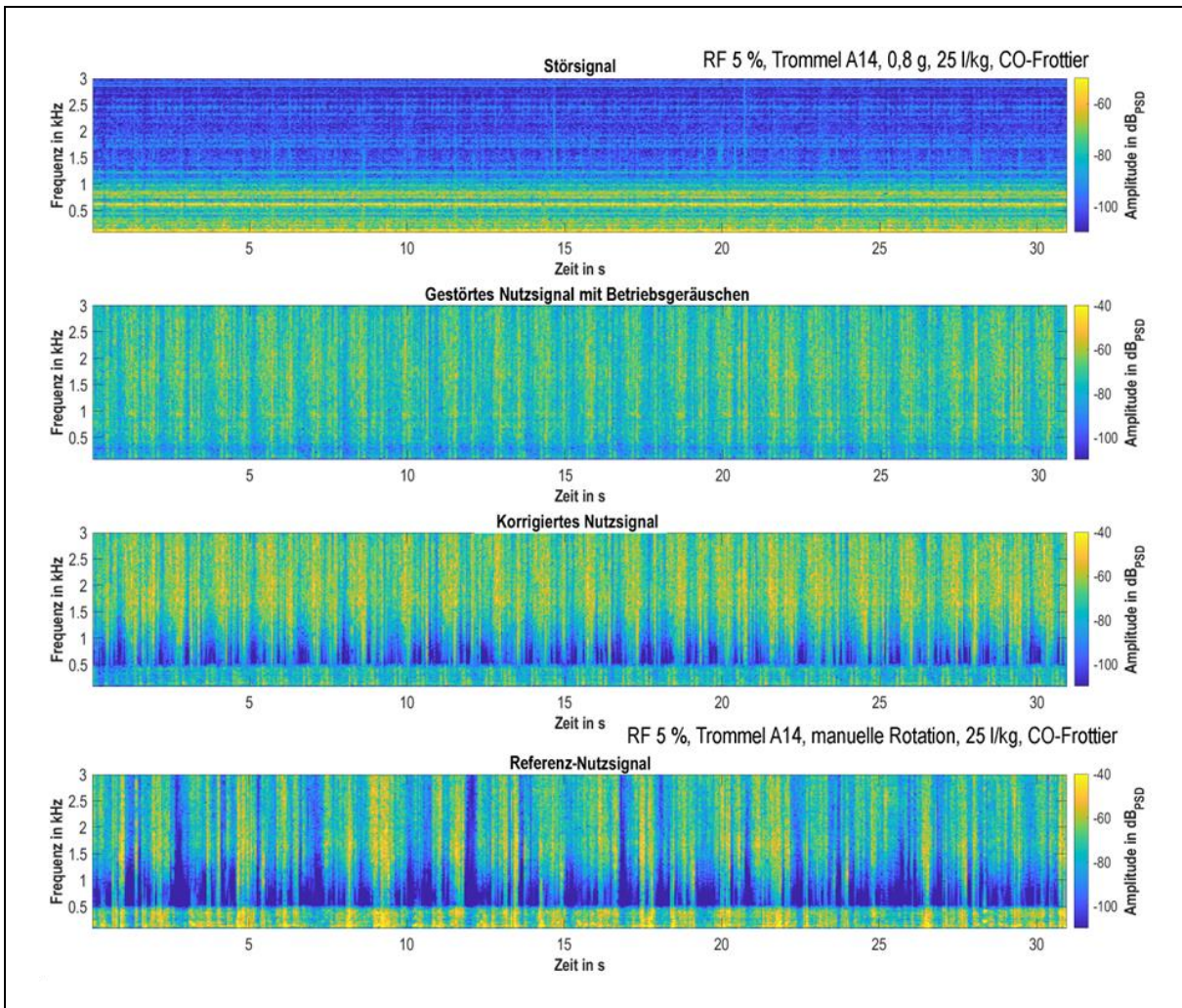
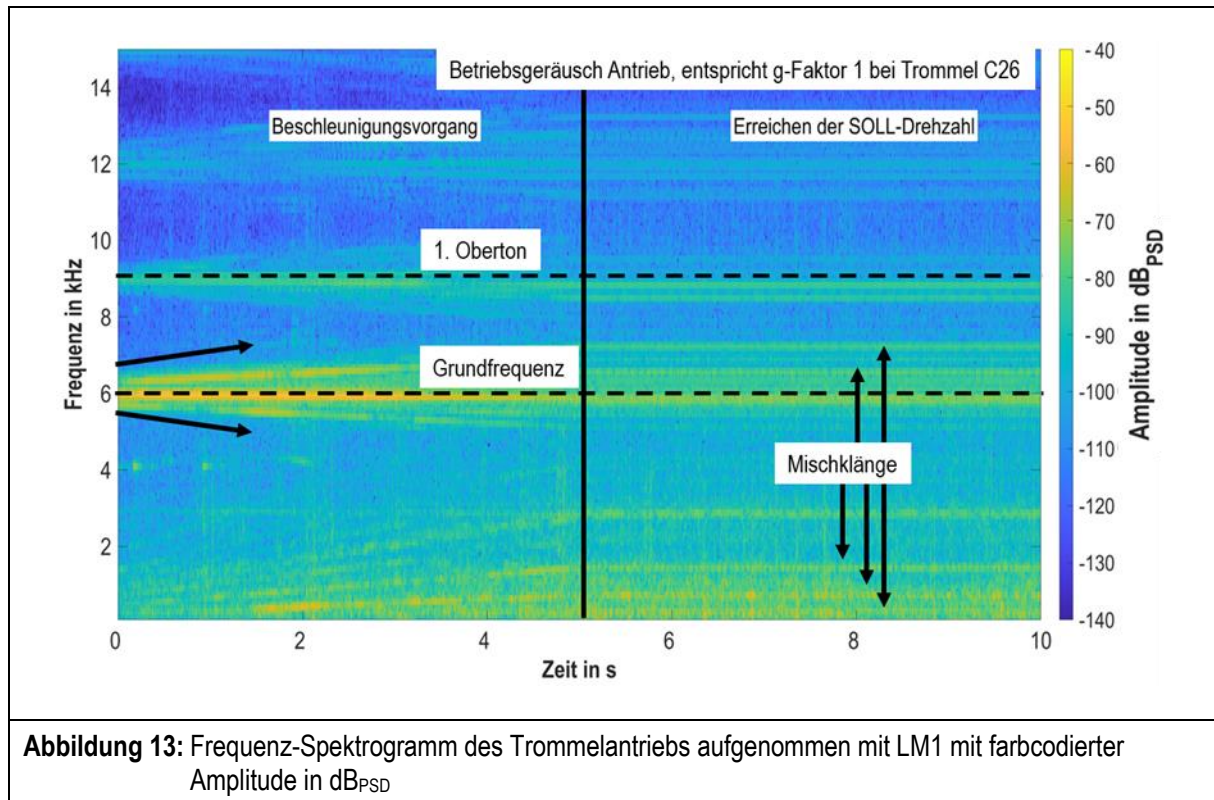


Abbildung 11: Frequenz und Amplitude des Störsignals, des gestörten Nutzsignals mit Betriebsgeräuschen, des korrigierten Nutzsignals und des Referenz-Nutzsignals ohne Betriebsgeräusche am Versuchsstand mit Trommel A14



Abbildung 12: Position des Luftschallmikrofons LM1 am Versuchsstand zur Erfassung der Störsignale am Trommelantrieb (Motor und Antriebsrolle)

Des Weiteren wurden die Frequenzbereiche in den Spektrogrammen der Audio-Aufnahmen den Störquellen zugeordnet (**Abbildung 13**).



Das Audio-Spektrum des Trommelantriebs mit Antriebsrolle in **Abbildung 13** ist komplex und setzt sich sowohl aus Geräuschen (aperiodisches Signal, nicht-ganzzahlige Verhältnisse der Teiltöne) als auch aus Mischklängen (verschiedene Grundfrequenzen mit Obertönen) bzw. angenähert harmonisch komplexen Tönen (höhere Frequenzanteile in einem nicht genau ganzzahligen Bezug zur Grundfrequenz) abhängig von der Bauform des Motors zusammen.

Der Frequenzbereich, in dem der Antrieb hohe Amplituden aufwies ($> -80 \text{ dB}_{\text{PSD}}$, grüne bis gelbe Farben in **Abbildung 13**) erstreckt sich von 1 bis 13 kHz, wobei nach dem Beschleunigungsvorgang (erste 5 s) noch nicht alle diskreten Frequenzen eine Amplitude über $-80 \text{ dB}_{\text{PSD}}$ aufweisen. Erst nach Erreichen der SOLL-Drehzahl (entspricht g-Faktor 1 bei Trommeln B26 und C26) nach 5 s sind die Antriebsgeräusche für die Korrektur der gestörten Nutzsignale relevant, da beim Beschleunigungsvorgang keine Nutzsignale erzeugt werden, sondern erst, wenn der g-Faktor hoch genug ist, um die Wäsche zum Abrollen und Fallen zu bringen und somit Nutzsignale erzeugt werden. Die Geräuschfrequenzen des Motors bzw. der Antriebsrollen mit den höchsten Amplituden lagen in einem Bereich von 1 bis 13 kHz (Grundfrequenz 6 kHz). Da das Nutzsignal im Frequenzbereich unter 4 kHz lag (**Abbildung 14**), konnte die Grundfrequenz des Antriebs mit einem Tiefpass-Filter eliminiert werden. Des Weiteren traten Amplitudenmaxima der Störsignale bei den Frequenzen 1 kHz und 3 kHz (Pfeile in **Abbildung 13**) auf, die im Bereich des Nutzsignals lagen.

- ⇒ Da die Störsignale eine niedrigere Amplitude als die Nutzsignale aufwiesen, konnten diese mithilfe der Audiokorrektur weitgehend entfernt werden.

5.1.2 Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens

Die auftretenden Abroll- und Fallgeräusche von Wäscheposten aus CO-Frottier-Handtüchern (450 g/m², Füllverhältnis 25 l/kg) unter Variation der Restfeuchte (5 - 50 %, bezogen auf bone dry) wurden in Trommeln unterschiedlicher Volumina (**Tabelle 2**) am Versuchsstand (Kapitel 4.2) aufgenommen. Dabei wurde immer der gleiche Posten eingesetzt.

In diesen Versuchen wurden noch keine Prozessparameter, wie Ablufttemperatur und Luftdurchsatz, sondern nur der Einfluss der Trommelcharakteristika untersucht. Der Einfluss von Prozessparametern im gewerblichen Tumbler wird in Kapitel 5.3 behandelt.

- **Unterscheidung Nutz- und Störsignale**

Zunächst wurde Trommel E120 (3.000 l Volumen, Durchmesser 1.500 mm) mit 120 kg Frottierware (FV 25 l/kg) unterschiedlicher Textilfeuchte beladen. Die Einstellung der Textilfeuchte erfolgte entsprechend **Tabelle 6**. Dabei wurden vor der Beladung die Textilfeuchte-Bereiche 50 - 40 %, 40 - 30 %, 20 - 10 % und 10 - 5 % eingestellt und die Audiodaten pro Textilfeuchte über 30 min ohne Verwendung erwärmter Trocknungsluft aufgenommen. Alle Versuche wurden bei Variation des g-Faktors zwischen 0,7 und 0,9 ohne Trommelstillstand und ohne Reversierung durchgeführt. Alle Versuche wurden mindestens zweimal durchgeführt.

Abbildung 14 zeigt die Frequenzen und Amplituden der aufgenommenen Geräusche vom Störsignal (Betriebsgeräusche) sowie gestörtem und korrigiertem Nutzsinal mit 25 l/kg CO-Frottier in Trommel E120 am Versuchsstand (ohne Heißluft, einseitiger Trommellauf ohne Pausen, 0,7 g) für die Textilfeuchte 5 %. Die Amplitude ist farbcodiert im Spektrogramm dargestellt (von blau: niedrig bis gelb: hoch), wobei die Frequenzen in kHz auf der y-Achse und die Zeit in Sekunden auf der x-Achse aufgetragen sind.

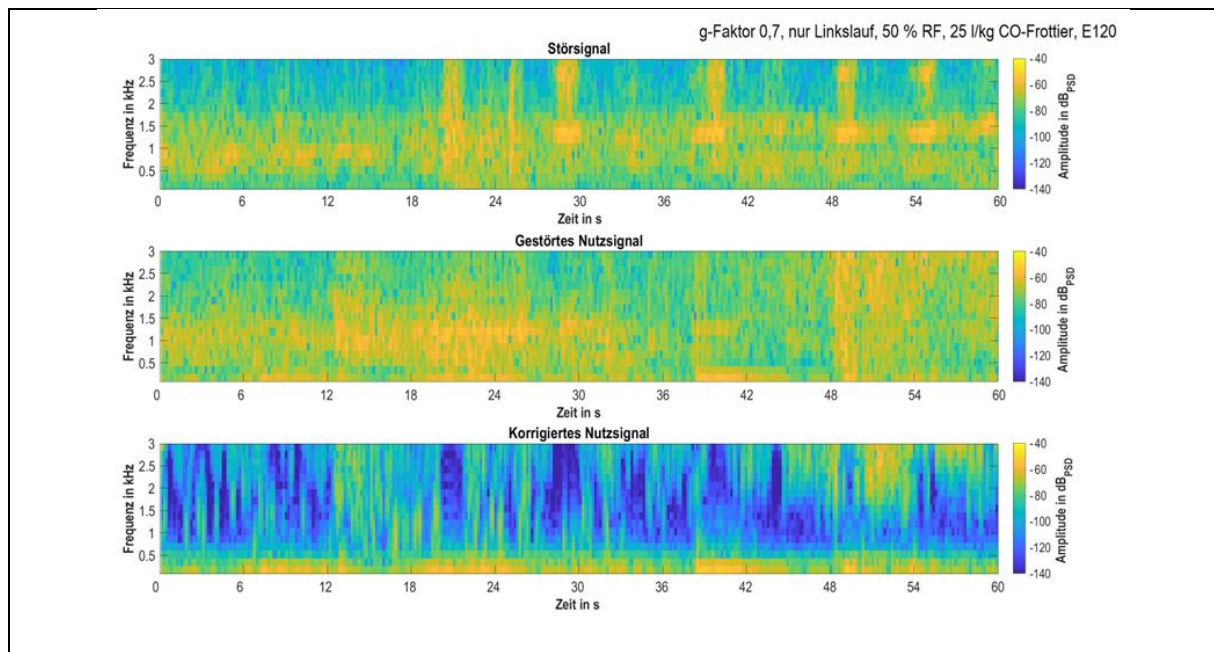


Abbildung 14: Frequenz und Amplitude der aufgenommenen Geräusche von Störsignal sowie gestörtem und korrigiertem Nutzsinal mit 25 l/kg CO-Frottier in Trommel E120 am Versuchsstand (ohne Heißluft, einseitiger Trommellauf ohne Pausen, 0,7 g), Textilfeuchte 5 %

Vergleicht man das gestörte Nutzsinal mit dem korrigierten, dann sind im korrigierten Nutzsinal mehr blaue Bereiche zu erkennen, was eine starke Reduktion der Amplitude bei Frequenzen über 0,5 kHz bedeutet. Unter 0,5 kHz bleibt die Amplitude (gelbe Bereiche unter 0,5 kHz in **Abbildung 14**) nach der Audiokorrektur so hoch wie beim gestörten Nutzsinal, da diese nicht im Störsignal (grüne Bereiche unter 0,5 kHz in **Abbildung 14**) enthalten sind.

Somit hat die Subtraktion des Störsignals vom Nutzsinal keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Höhe der Amplituden unter 0,5 kHz. Daraus folgt, dass diese Bereiche – wie gefordert – von den Abroll- und Fallgeräuschen des Wäschepostens, d. h. des zu erfassenden Nutzsinals, stammen.

- ⇒ Stör- und Betriebsgeräusche (Trommeldrehung und Umgebungsgeräusche, hier ohne Heißluft) wurden von den gemessenen Signalen der Kontaktmikrofone KM2 subtrahiert, sodass nur die Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignal) erfasst wurden.

• Einfluss g-Faktor

Der Einfluss des g-Faktors in Trommel B26 (660 l Volumen, Durchmesser 947 mm) mit der maximalen Beladung 33 kg (Füllverhältnis 20 l/kg) für Frottierware unter den sonstigen Bedingungen von **Abbildung 14** ist in **Abbildung 15** zu sehen.

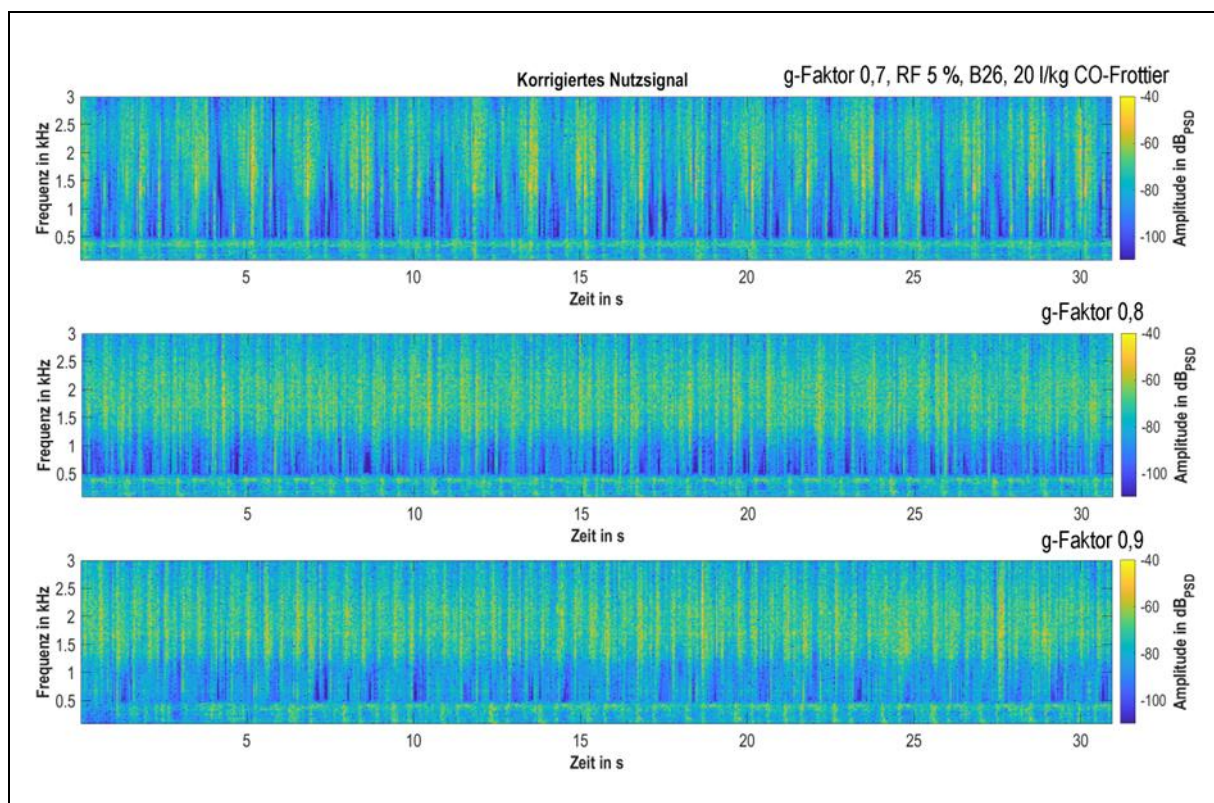


Abbildung 15: Einfluss des g-Faktors auf Frequenz und Amplitude des korrigierten Nutzsignals mit 20 l/kg CO-Frottier in Trommel B26 am Versuchsstand (ohne Heißluft, einseitiger Trommellauf ohne Pausen), Textilfeuchte 5 %

Hierbei sieht man, dass sich die Dauer zwischen den einzelnen Aufprallen des Postens mit höherem g-Faktor verkürzt. Dies erkennt man an den sich wiederholenden, vertikalen, gelbgrünen Linien, deren Dichte mit höherem g-Faktor zunimmt. Diese Linien signalisieren den

Aufprall des Postens. Die Frequenz des Aufpralls steigt mit Zunahme der Drehzahl bzw. des g-Faktors.

- **Einfluss Textilfeuchte**

Die Spektrogramme in **Abbildung 16** zeigen die korrigierten Nutzsignale bei Textilfeuchten von 50 bis 5 %.

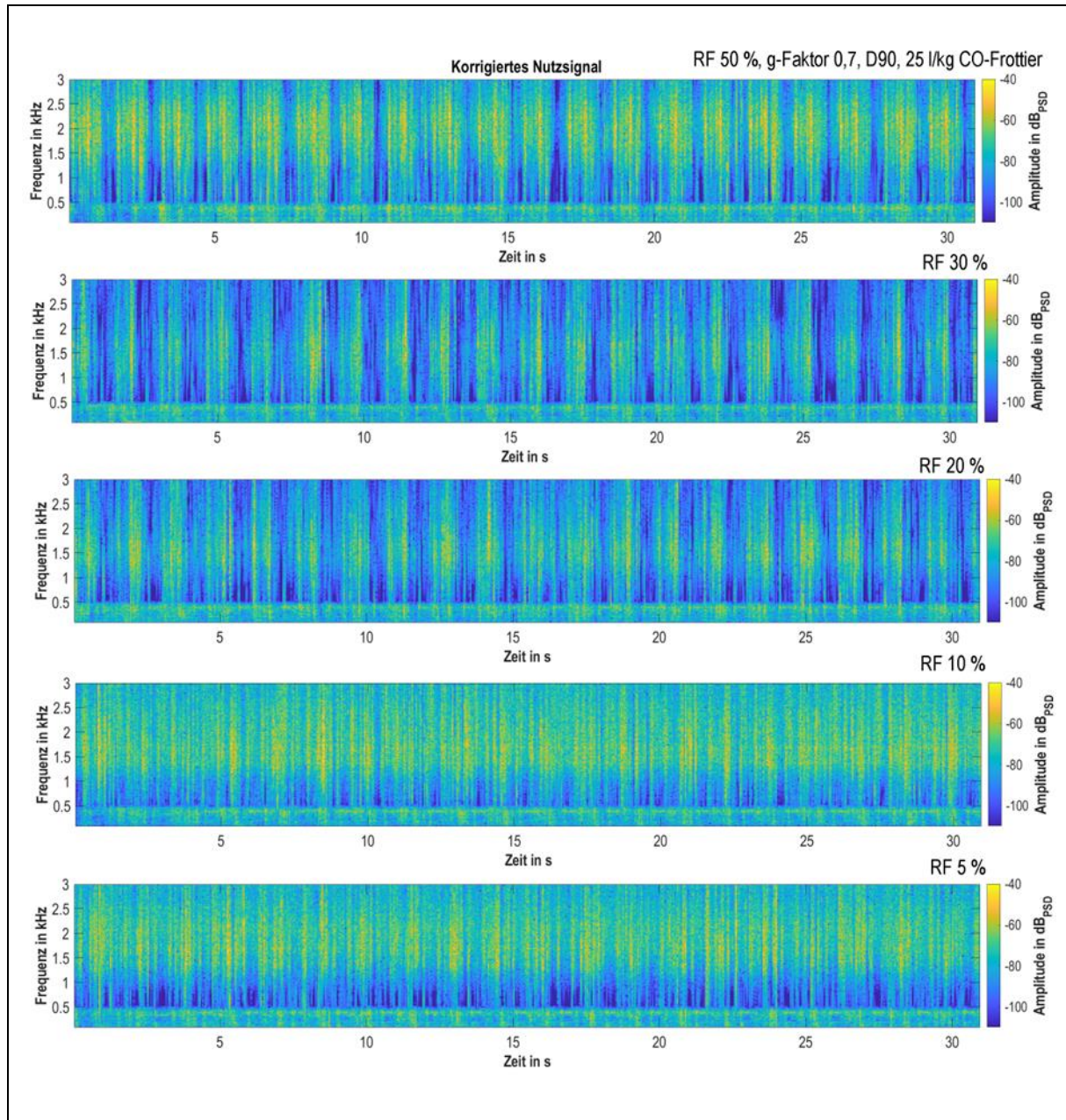


Abbildung 16: Einfluss der Textilfeuchte auf Frequenz und Amplitude des korrigierten Nutzsignals mit 25 l/kg CO-Frottier in Trommel B26 am Versuchsstand (ohne Heißluft, einseitiger Trommellauf ohne Pausen, 0,8 g)

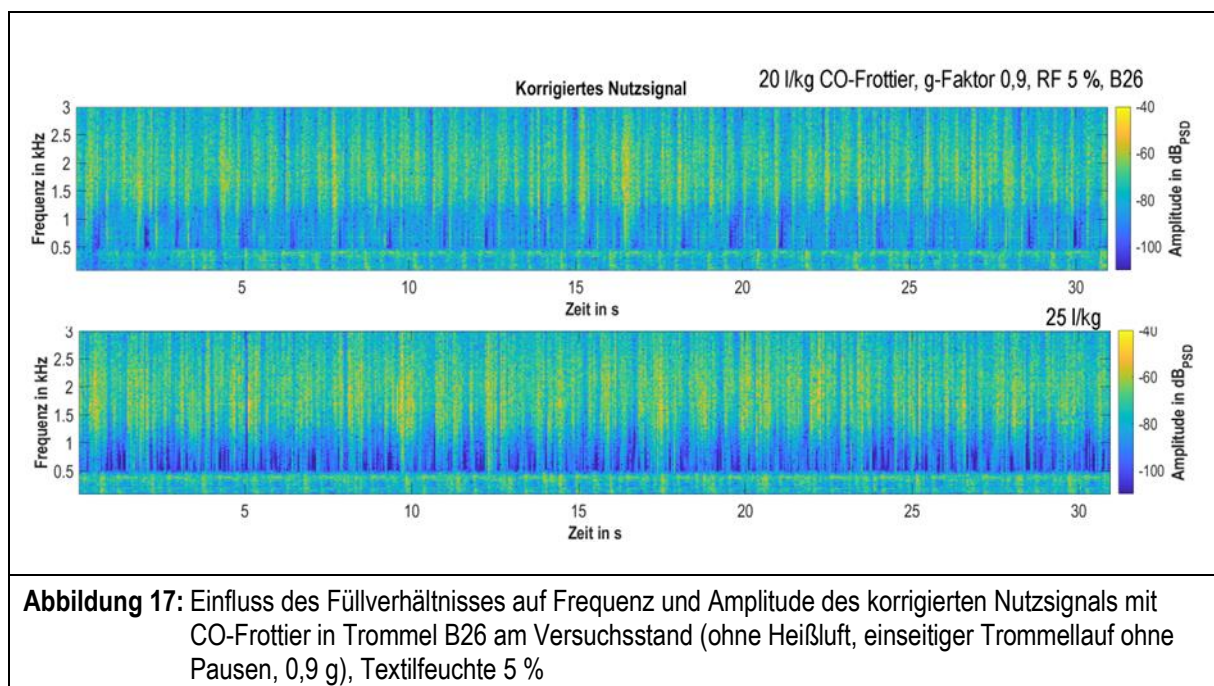
Danach unterscheiden sich die Spektrogramme in der Verteilung der Farben (Höhe der Amplitude) für die Frequenzen (0 – 3 kHz): Bei hoher Textilfeuchte ist der Aufprall des Postens (vertikale grün-gelbe Linien) getrennt über stille (dunkelblau, < -100 dB) Bereiche zu erkennen.

Bei niedrigen Textilfeuchten von 10 – 5 % und bei Frequenzen über 1.500 Hz verringert sich die Menge an stillen Bereichen, und die einzelnen Aufpralle des Postens sind nicht mehr so deutlich voneinander getrennt. Dies liegt daran, dass die Wäscheteile im Posten mit zunehmender Trocknung als Einzelteil fallen, d. h. mit geringerer Masse und höherer Frequenz. Die hohe Amplitude, z. B. bei 50 % Textilfeuchte, ist an den gelben vertikalen Linien im Spektrogramm zu erkennen.

- **Einfluss Füllverhältnis**

In **Abbildung 17** ist der Einfluss des Füllverhältnisses auf das korrigierte Nutzsignal bei sonst gleichen Parametern (Trommel B26, CO-Frottier, 0,9 g) dargestellt.

- ⇒ Danach sind unter den angewandten Versuchsbedingungen keine signifikanten Unterschiede in Amplitude oder Frequenzen für die praxisüblichen Füllverhältnisse 20 und 25 l/kg erkennbar.



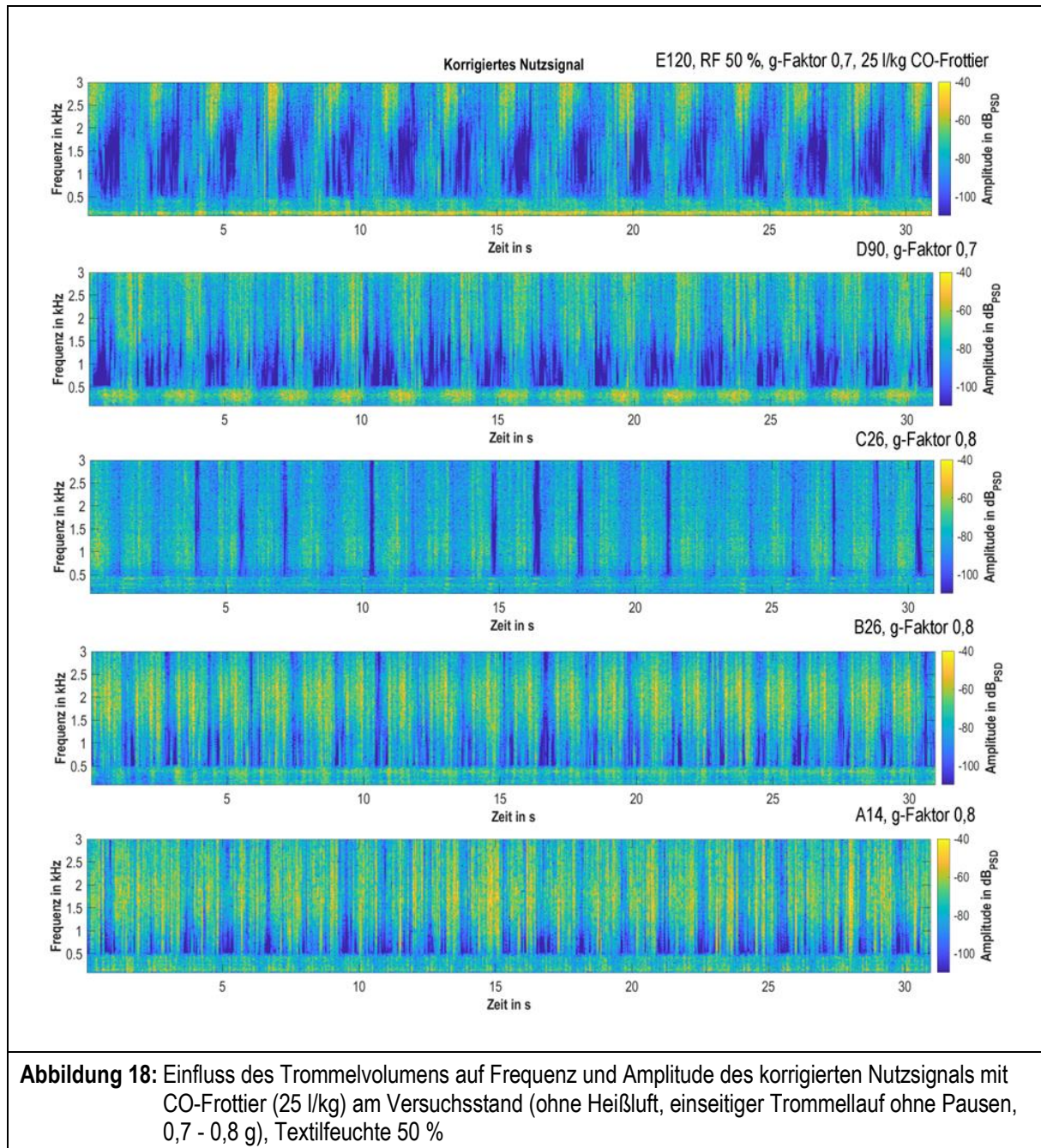
- **Einfluss Trommelvolumen bzw. Durchmesser**

Der Vergleich der in **Abbildung 18** dargestellten Spektrogramme für die Restfeuchte 50 % zeigt, wie sich die Nutzsignale in den untersuchten Trommeln (**Tabelle 2**, Kapitel 4.2) auf Amplituden und Frequenzen auswirken.

Es zeigte sich, dass die Trommeln mit kleineren Trommelvolumina (< 2250 l) aufgrund des kleineren Durchmessers andere akustische Eigenschaften als die größeren Trommeln aufweisen. Zu sehen ist dies an der Zunahme der Amplitudenintensität im höheren Frequenzbereich über 1.500 Hz (hellgrüne bis gelbe Bereiche in **Abbildung 18**). Dabei ist zu berücksichtigen, dass der g-Faktor keinen Einfluss auf die Nutzsignale hat (**Abbildung 15**).

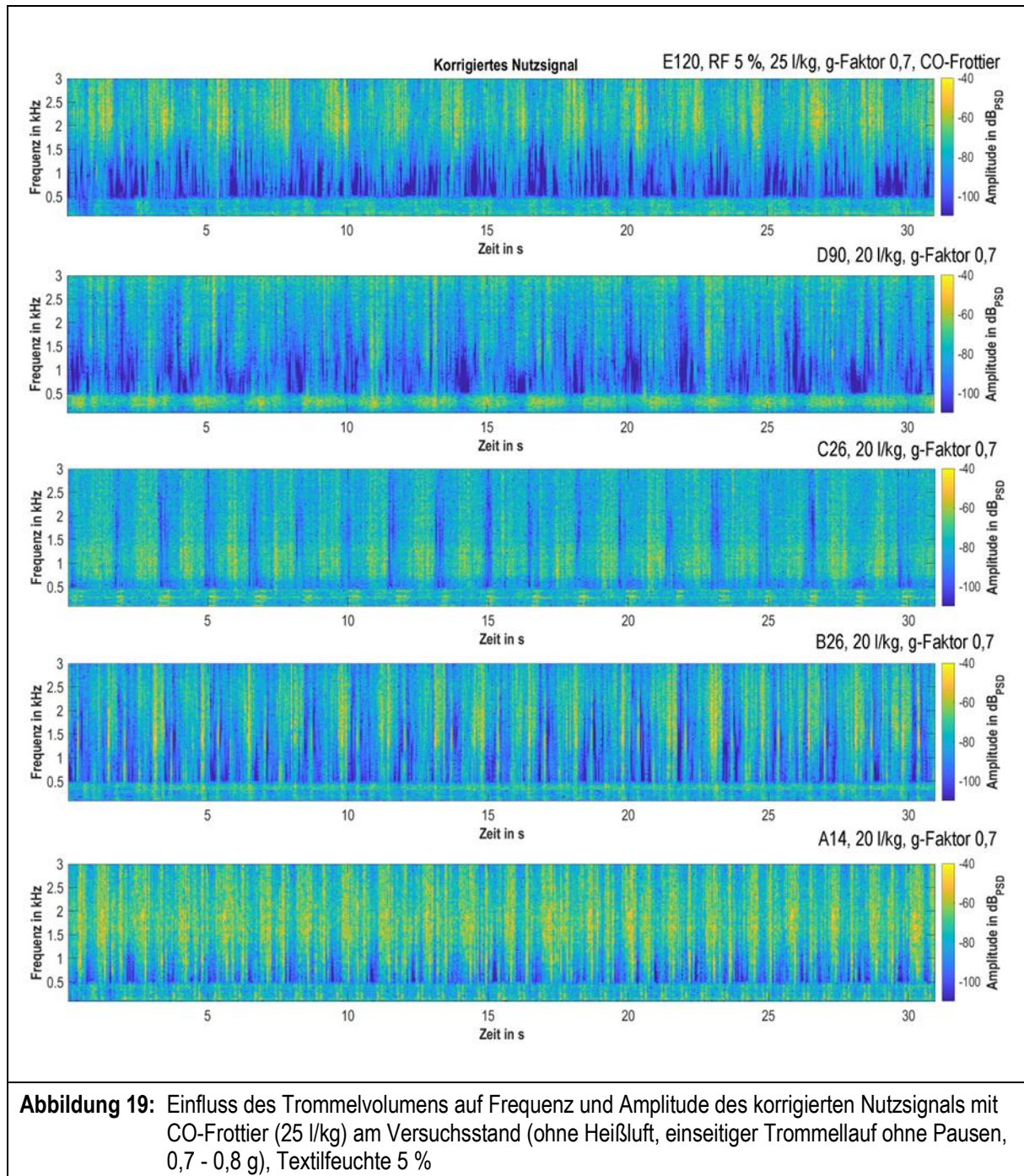
Generell werden Klänge mit tiefen Frequenzen (Bässe) erzeugt, wenn der Klangkörper – entspricht hier der Trommel – ein größeres Volumen hat. Somit werden Schallwellen mit höheren Frequenzen vor allem in den Trommeln (A14 - C26) mit kleinerem Durchmesser erzeugt und sind dann im Spektrogramm der Audiodaten als gelbe Bereiche (entspricht hoher Amplitude)

zu erkennen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Aufprallgeschwindigkeit der Wäscheteile auf den Trommelmantel bei größerem Durchmesser höher als bei kleinerem Durchmesser ist. Folge sind lautere Geräusche des Nutzsignals, vor allem bei Frequenzen unter 500 Hz (**gelbe** Bereiche unter 0,5 kHz in **Abbildung 18**).



In **Abbildung 19** sind Frequenz und Amplitude des korrigierten Nutzsignals mit CO-Frottier für die Restfeuchte 5 % bei Variation des Trommelvolumens dargestellt.

Dabei zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen den verschiedenen Trommeln gleichbleiben, während die Abnahme der Textilfeuchte von 50 % auf 5 % sich in einer Zunahme der Amplitude bei Frequenzen über 1,5 kHz äußert, wie bereits in **Abbildung 16** zu sehen war.



Die gewonnenen Daten wurden nach Umwandlung in Frequenzen mit dazugehörigen zeitabhängigen Amplituden über diskrete Fourier-Transformation als Trainingsdatensätze sortiert nach Trommelvolumen und Restfeuchten für das Anlernen des KNN gespeichert.

5.1.3 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Arbeitsschritts war das Antrainieren des KNN mit Abroll- und Fallgeräuschen des Wäschepostens in unterschiedlichen Trommelvolumina (**Tabelle 2**, Kapitel 4.3).

Dazu wurden zunächst die Positionen für die Mikrofone (KM1) ermittelt, an denen die Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignale) aus den Audiodaten mithilfe der Audiokorrektur extrahiert

werden konnten (korrigiertes Nutzsignal). Um einen Referenzwert für die Nutzsignale zu erhalten, wurde ein Wäscheposten (25 l/kg CO-Frottier) bei manueller Trommeldrehung ohne Störsignale untersucht. Die so mit den Körperschallmikrofonen (KM1) am Trommelmantel erfassten Nutzsignale wurden für die Bestimmung der Positionen für die Mikrofone zur Erfassung der Störsignale (KM2 und LM1) verwendet. Das korrigierte Nutzsignal wurde ermittelt, indem das Störsignal, aufgenommen mit KM2, vom gestörten Nutzsignal subtrahiert wurde, sodass anschließend das korrigierte Nutzsignal vor allem die Geräusche der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens enthielt. Dabei wurden zuvor die Lautstärke sowohl vom gestörten Nutzsignal als auch vom Störsignal angeglichen.

Für Textilfeuchten im untersuchten Bereich zwischen 50 und 5 % zeigten sich unterschiedlich hohe Amplitudenwerte des korrigierten Nutzsignals sowohl in Hinblick auf tiefe Frequenzen (< 500 Hz) als auch bei hohen Frequenzen (> 500 Hz). Die Menge an stillen (< -100 dB) Bereichen nimmt ab, da die Wäscheteile im Posten mit zunehmender Trocknung als Einzelteile fallen, d. h. mit geringerer Masse und mit höherer Frequenz. Anhand dieser visuellen Unterschiede konnte das KNN die durch Wiegen ermittelte momentane Textilfeuchte des Postens zuordnen (Kapitel 5.5).

Das Füllverhältnis hat keinen signifikanten Einfluss auf Frequenz und Amplitude des korrigierten Nutzsignals, während der g-Faktor durch Erhöhung der Trommeldrehzahl eine Zunahme der Frequenz des Wäscheaufpralls zur Folge hatte, was sich in den Spektrogrammen als Erhöhung der Anzahl vertikaler Linien (hohe Amplitude im gesamten Frequenzbereich) äußerte.

Trommelcharakteristika, wie Trommelvolumen, Rippenanzahl und Perforation, äußerten sich im korrigierten Nutzsignal vor allem dadurch, dass in Trommeln mit kleinen Volumina Nutzsignale mit hohen Amplituden bei hohen Frequenzen erzeugt werden. Des Weiteren ist die Aufprallgeschwindigkeit der Wäscheteile auf den Trommelmantel bei größerem Durchmesser höher als bei kleinerem Durchmesser, sodass das Nutzsignal, vor allem bei Frequenzen unter 500 Hz höhere Amplituden enthält.

Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Textilfeuchten ist unter Variation der Trommelcharakteristika möglich, d. h., dass die KI-basierte Audioanalyse in Trommeln verschiedener Konstruktion und Volumen angewendet werden kann, da visuell Unterschiede in den Spektrogrammen erkennbar waren, z. B. Zunahme der Amplitude bei hohen Frequenzen mit geringerer Textilfeuchte.

Die korrigierten Nutzsignale in den untersuchten Trommeln für verschiedene Textilfeuchten ohne Heißluftdurchströmung, d. h. ohne zusätzliche Betriebsgeräusche des Brenners und Heißluftgebläses, wurden als Trainingsdaten sortiert nach Trommelvolumen und Textilfeuchten in die für die Entwicklung und das Anlernen des KNN erstellte Datenbank eingepflegt.

5.2 Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler

5.2.1 Luftschallmikrofon zur Erfassung der Betriebsgeräusche

Um die Betriebsgeräusche bei eingeschaltetem Trommelantrieb sowie unerwünschte Umgebungsgeräusche zu erfassen und minimieren zu können, wurde das Luftschallmikrofon LM1 mit Nierenrichtcharakteristik (Aufnahmerichtung bevorzugt frontal zum Mikrofonkorb) verwendet (Kapitel 4.1).

Die Verwendung eines Mikrofons ohne bevorzugte Aufnahmerichtung (omni-direktionale Richtcharakteristik) erwies sich nicht als vorteilhaft, da auch Umgebungsgeräusche aufgenommen wurden, die nicht von den an der Trommel fixierten Körperschallmikrofonen (KM1) erfasst wurden. Die Audiokorrektur solcher Störgeräusche führte zu einer zu starken Reduzierung des Nutzsignals.

Zur Erfassung von körperschall-übertragenen Betriebsgeräuschen, wurden zusätzlich Körperschallmikrofone KM2 (Kapitel 4.1) am Tumblergehäuse in Antriebsnähe montiert.

Die optimalen Positionen für die Mikrofone in den untersuchten Tumbler waren – abhängig von Konstruktion der Tumbler – an verschiedenen Stellen. Generell sollten die Mikrofone für die Störgeräusche an der Störquelle, hier vor allem in der Nähe des Trommelantriebs, angebracht werden.

- **Tumbler B20**

So wurde für Tumbler B20 (**Tabelle 3**, Kapitel 4.6) ermittelt, dass sich die Position des Luftschallmikrofons (LM1) mit dem höchsten Signal-zu-Rausch-Verhältnis (hohe Amplitude des Nutzsignals im Verhältnis zum Störsignal bzw. Hintergrundrauschen, siehe **gelbe** im Verhältnis zu **blau-grünen** Bereichen in **Abbildung 20**) im horizontalen Abstand von 3 cm zum Trommelantrieb (**Abbildung 8**, Kapitel 4.7.2) befindet.

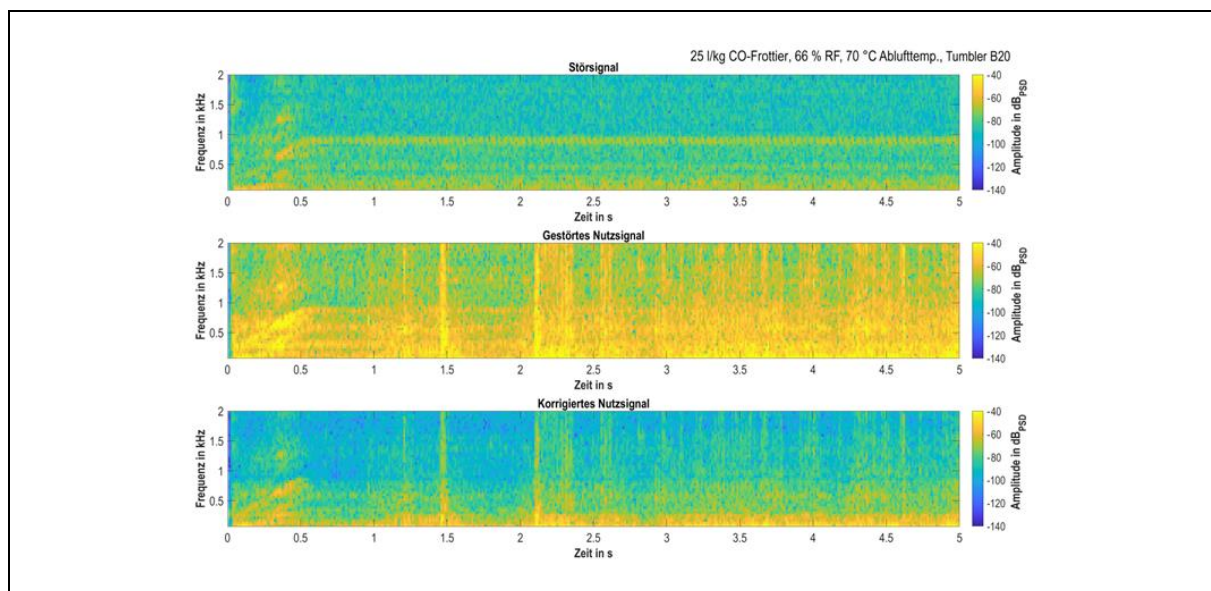


Abbildung 20: Frequenz und Amplitude der aufgenommenen Geräusche von Störsignal sowie gestörtem und korrigiertem Nutzsignal mit 25 l/kg CO-Frottier in Tumbler B20 (ohne Heißluft, einseitiger Trommellauf ohne Pausen, 0,85 g, Anfangsrestfeuchte 66 %), Luftschallmikrofon LM1 in Höhe des Trommelantriebs mit 3 cm horizontalem Abstand

Zusätzlich wurden die mit den Körperschallmikrofonen KM2 aufgenommenen Störgeräusche der Vibrationen des Tumblergehäuses – positioniert auf der Rückseite des Tumblergehäuses – berücksichtigt.

- **Tumbler A20**

Für den Tumbler A20 (**Tabelle 3**, Kapitel 4.6) wurde ermittelt, dass sich die Position des Luftschallmikrofons (LM1) mit dem höchsten Signal-zu-Rausch-Verhältnis (hohe Amplitude des Nutzsignals im Verhältnis zum Störsignal bzw. Hintergrundrauschen) senkrecht über der Trommel (3 cm Abstand) befindet, wobei die Störgeräusche so erfasst wurden, dass diese nach der Audiokorrektur weitgehend entfernt wurden.

Versuche mit Körperschallmikrofonen KM2 wurden an Tumbler A20 in den Vorversuchen nicht durchgeführt, da Tumbler B20 aufgrund der Möglichkeit zur genauen Steuerung der Prozessparameter für alle folgenden Arbeitsschritten ausgewählt wurde. Der g-Faktor konnte bei Tumbler A20 nicht manuell eingestellt werden.

5.2.2 Körperschallmikrofone

Die Position der Körperschallmikrofone (KM1), an der ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Verhältnis der mittleren Nutzsinalamplitude und der Standardabweichung des Störsignal-Rauschens) erhalten wird, wurde ermittelt, indem die Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens zunächst bei manuellem Drehen der Trommel ohne Störgeräusche aufgenommen wurden.

In Tumbler A20 (**Tabelle 3**) wurde die Positionierung der Körperschallmikrofone sowohl an der Trocknertür (innen und außen) als auch am Trommelmantel untersucht.

Die aufgenommene Amplitude der Nutzsignale war höher, wenn die Mikrofone KM1 am Trommelmantel montiert waren. Da die Schallübertragung auf der Trommel positionsunabhängig ist, wurden die Mikrofone KM1 mittig (relativ zur Trommeltiefe) auf dem Trommelmantel platziert (**Abbildung 2**, Kapitel 4.1).

In Tumbler B20 wurde die Position der Körperschallmikrofone zunächst an der Trocknertür (innen und außen) untersucht. Hier war jedoch die Schallübertragung des Nutzsignals aus der Trommel nicht hoch genug im Vergleich zum Störsignal. Da am gelochten Trommelmantel keine Anbringung der Mikrofone KM1 möglich ist, wurde als geeignete Mikrofonposition eine Stelle direkt unterhalb der Trommel und oberhalb des Flusenfilters ausgewählt und die Mikrofone dort im Abstand von 5 cm zueinander angebracht (**Abbildung 7**, Kapitel 4.7).

Zusätzlich wurden am Tumbler B20 Körperschallmikrofone KM2 zur Aufnahme von körperschall-übertragenen Betriebsgeräuschen am Tumblergehäuse in Antriebsnähe (Rückseite) installiert, sodass durch den Antrieb verursachte Vibrationen berücksichtigt werden konnten.

5.2.3 Zusammenfassung

Zur Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler konnten – abhängig von Typ und Konstruktion des Tumblers sowie der Mikrofonart – die optimalen Positionen für die Mikrofone zur Aufnahme der Nutz- und Störsignale ermittelt werden. Dabei wurden Körperschallmikrofone (KM1) zur Aufnahme der Nutzsignale verwendet, die zudem idealerweise mittig (relativ zur Trommeltiefe) am Trommelmantel bzw. bei perforiertem Mantel in dessen Nähe angebracht wurden. Die Aufnahme der Störsignale geschah sowohl über Körperschall als auch über Luft-

schall, wobei das Luftschallmikrofon (LM1) mit Nierencharakteristik in 3 cm Abstand zum Antrieb positioniert wurde und das zweite Körperschallmikrofon (KM2) am Maschinengehäuse angebracht wurde, um Störsignale über Vibrationen aufzunehmen.

Die so ermittelten Positionen lieferten ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Verhältnis der mittleren Nutzsignalamplitude und der Standardabweichung des Störsignal-Rauschens) um somit eine effektive Audiokorrektur zu ermöglichen, bei der das sich ergebende korrigierte Nutzsignal einen hohen Anteil an Nutzsignalen und geringen bis keinen Anteil an Störsignalen enthielt.

5.3 Analyse der Abroll- und Fallgeräusche abhängig von den Prozessparametern

5.3.1 Vorversuche

Um die Position der Körperschallmikrofone KM1 zur Erfassung der Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignale) zu ermitteln, wurden in orientierenden Vorversuchen zunächst die Fallgeräusche von CO-Frottier-Handtüchern „CO4“ nach **Tabelle 4** in Tumbler B20 (**Tabelle 3**) ohne Betriebsgeräusche und Heißluft in Abhängigkeit von der Textilfeuchte aufgenommen. Die Frottier-Handtücher (5 kg, Füllverhältnis 87 l/kg) mit Restfeuchten von 52 % (schleuderfeucht), 26 % und 5 % (klimatrocken) wurden jeweils gleichzeitig in die Trocknertrommel geworfen (erzeugtes Aufprallgeräusch) und die Nutzsignale (ohne Betriebsgeräusche) aufgenommen.

In Tumbler A20 (**Tabelle 3**) wurden dann mit der ermittelten Position der Körperschallmikrofone die Nutzsignale der gleichen Wäscheposten aus Frottier-Handtüchern (Füllverhältnis 25 l/kg) mit Textilfeuchten von 5 bis 60 % (bezogen auf bone dry) – d.h. schleuderfeucht bis klimatrocken – mit Heißluft (70 °C Ablufttemperatur) aufgenommen. Die Anfangsrestfeuchte (60 %) der Textilien wurde entsprechend **Tabelle 6** eingestellt.

Zur Erfassung der Nutz- und Störsignale wurden die Audiodaten für die vor Versuchsbeginn gravimetrisch bestimmte Anfangsrestfeuchte 60 % (schleuderfeucht) gemessen. Nach Trocknung über 3 min wurde der Wäscheposten dem Trockner entnommen, die erreichte Restfeuchte gravimetrisch bestimmt, der Wäscheposten weiter getrocknet und die Audiodaten erneut gemessen. Dies wurde bis zum Erreichen einer Restfeuchte um 5 % (klimatrocken) wiederholt.

Auf Basis eines entwickelten Algorithmus zur Berechnung des korrigierten Nutzsignals (Differenz Nutzsignal- Störsignal bzw. Betriebsgeräusche) wurde ein Software-Programm in Matlab erstellt.

Durch Vergleich der ermittelten Geräuschprofile wurde unter Berücksichtigung der Amplituden in Abhängigkeit von den Frequenzen von Störsignal und Nutzsignal ein Schwellenwert für die Amplitude ermittelt, bei dem das Nutzsignal ausreichend hoch erhalten bleibt. Um dies zu erreichen, wurde das Störsignal bzw. die Amplitude um einen benutzerdefinierten Wert von 40 dB gesenkt. Dies ist möglich, da nur die Amplitude bei denjenigen Frequenzen erniedrigt wird, die nur zu einem geringen Anteil im Nutzsignal vorkommen.

Die derart korrigierten Audiodaten wurden anschließend mittels diskreter Fourier-Transformation in diskrete Frequenzen mit dazugehörigen, zeitabhängigen Amplituden umgewandelt und die aufgenommenen Audiodaten nach Textilfeuchten sortiert in die für die Entwicklung und das Anlernen des künstlichen neuronalen Netzwerks (KNN) erstellte Datenbank eingepflegt.

Die Ergebnisse der Vorversuche werden im Folgenden diskutiert.

- **Trockner B20**

Um einen Referenzwert für das Nutzsignal zu ermitteln, wurden die Fallgeräusche von CO-Frottier-Handtüchern (Füllverhältnis 87 l/kg) in Tumbler B20 gemessen.

In **Abbildung 21** sind die nach Trocknung der Handtücher auf die angegebenen Restfeuchten gemessenen Frequenz- und Amplitudenwerte des korrigierten Nutzsignals sowohl als Amplitude-Zeit-Diagramme als auch als Frequenz-Spektrogramme mit farbcodierter Amplitude in dB_{PSD} dargestellt.

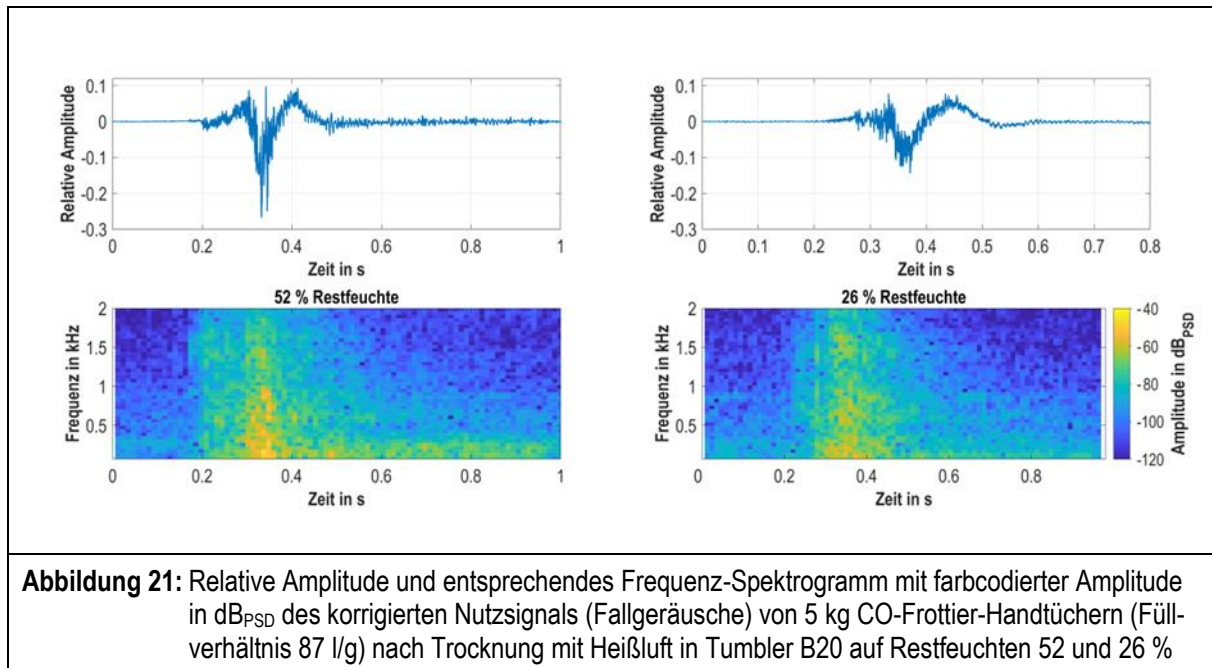


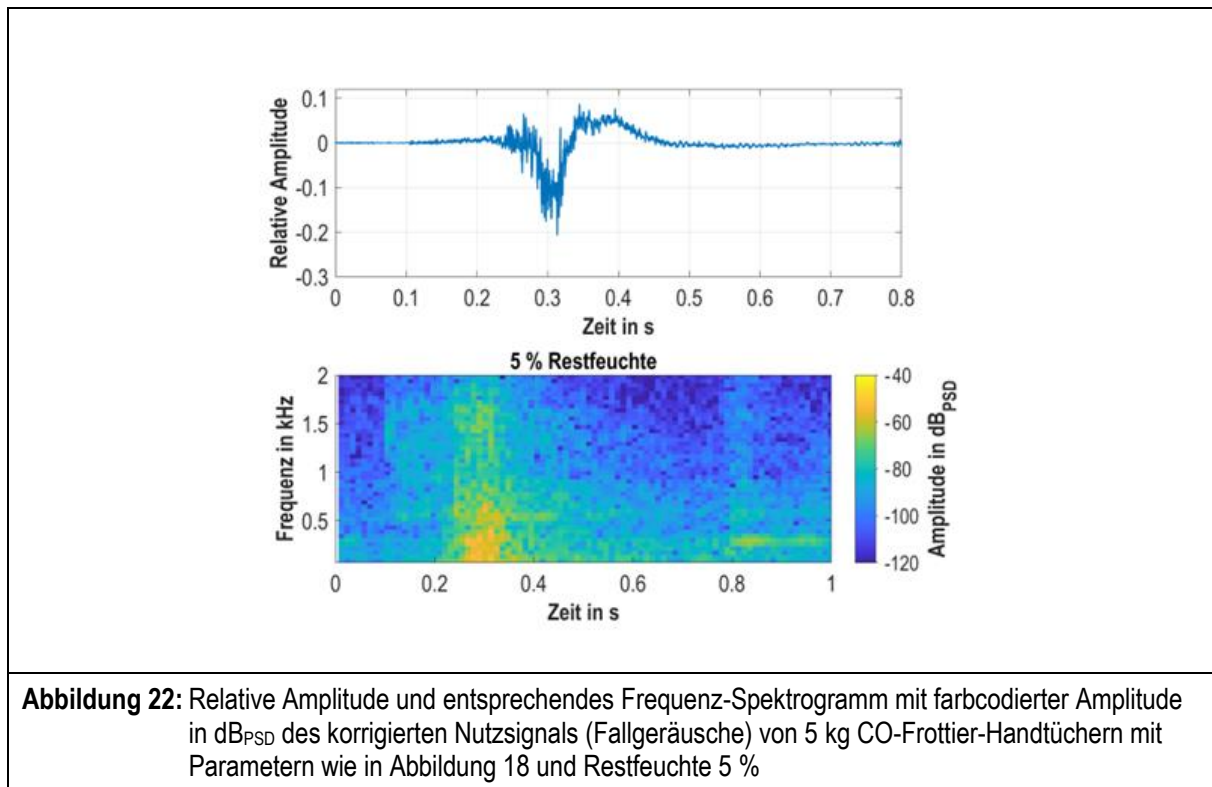
Abbildung 21: Relative Amplitude und entsprechendes Frequenz-Spektrogramm mit farbcodierter Amplitude in dB_{PSD} des korrigierten Nutzsignals (Fallgeräusche) von 5 kg CO-Frottier-Handtüchern (Füllverhältnis 87 l/g) nach Trocknung mit Heißluft in Tumbler B20 auf Restfeuchten 52 und 26 %

Die relative Amplitude (Amplitude bezogen auf untere Messschwelle) ist in Abhängigkeit von der Zeit auf einer Skala von -1 bis 1 (einheitslos) dargestellt (**Abbildungen 21** und **22** jeweils obere Diagramme). Der Wert bei „1“ entspricht der höchstmöglichen Amplitude eines Signals ohne Verzerrung, d. h. das sinusförmige Signal wird vollständig ohne „Abflachen“ der Spitzen dargestellt, was bei weiterer Erhöhung der Amplitude bzw. Lautstärke passieren würde, sodass aus dem Sinus-Signal ein Rechteck-Signal entsteht.

Da die Amplitude ein Maß für eine Änderung (hier des Schalldrucks) ist, oszillieren die Werte von -1 bis 1 um den Referenzwert bei 0, was der unteren Messschwelle des hier verwendeten Aufnahme-Equipments (Mikrofone, Audio-Interface) entspricht.

In **Abbildung 21** ist zu erkennen, dass die reduzierte Restfeuchte von 52 auf 26 % bezüglich des korrigierten Nutzsignals sowohl eine Abnahme der relativen Amplitude (um ca. 20 dB) als auch der Amplitude bei tiefen Frequenzen bewirkt. Dies ist bei 0,3 bis 0,4 s und Frequenzen unter 250 Hz am Farbumschlag von **gelb** nach **grün** in den Spektrogrammen zu erkennen.

Wie in **Abbildung 22** zu sehen ist, steigt die relative Amplitude bei weiterer Trocknung auf 5 % Textilfeuchte (klimatrocken) bei tiefen Frequenzen (< 250 Hz) leicht an.



- **Trockner A20**

In Trockner A20 wurden die Abroll- und Fallgeräusche der Wäscheposten mit den am Trommelmantel befestigten Körperschallmikrofonen aufgenommen. Die Betriebsgeräusche (Stör-signale) wurden mit Luftschallmikrofon LM1, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, aufgenommen.

Die Textilfeuchte des Wäschepostens wurde zu Beginn, zu definierten Zeiten während des Trocknungsprozesses und nach dem Trocknungsprozess durch Wiegen bestimmt, wobei der Trocknungsprozess wie oben beschrieben alle 3 min zum Wiegen unterbrochen wurde. Gleichzeitig wurden die Abluft- und Zulufttemperatur-Profile sowie die relative Feuchte der Abluft (**Abbildung 23**) während der Trocknung aufgenommen.

Beim angewandten Füllverhältnis von 25 l/kg betragen der g-Faktor 0,8, die Trommeldrehrichtung reversierte alle 87 s mit Pausen von 3 s, während die am Tumbler eingestellte maximale Ablufttemperatur 70 °C betrug.

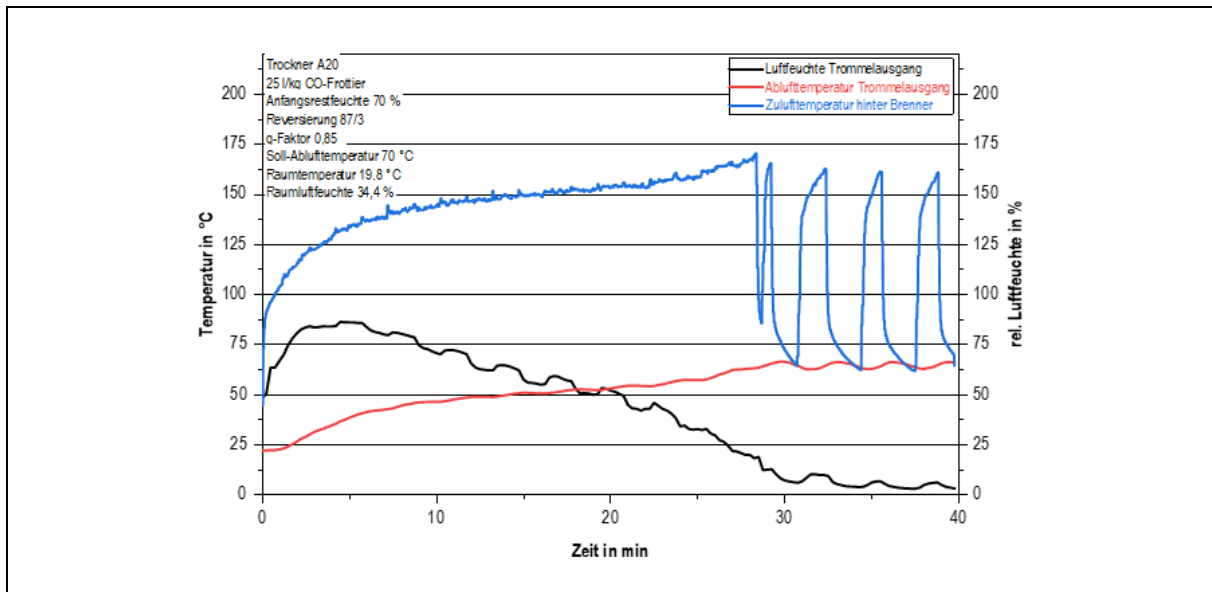


Abbildung 23: Temperatur-Zeit-Profil und zeitlicher Verlauf der relativen Abluft-Feuchte von Tumbler A20 während der Trocknung von Frottierwaren von 70 % auf 6 % (Füllverhältnis 25 l/kg, 70 °C Ablufttemperatur)

Das entsprechende Spektrogramm in **Abbildung 24** zeigt die Änderung der korrigierten Nutzsingale mit abnehmender Restfeuchte.

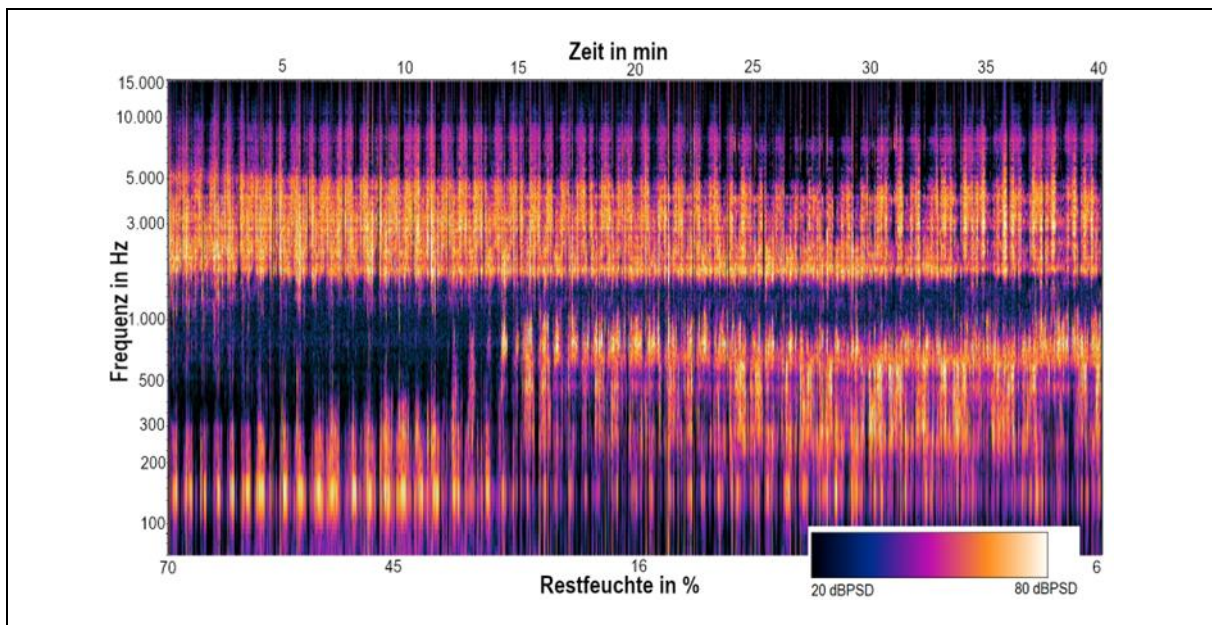


Abbildung 24: Zeitlicher Verlauf der Frequenzen mit farbcodierter Amplitude in dB_{PSD} des korrigierten Nutzsingals in Abhängigkeit von der Restfeuchte während des Trocknungsverlaufs nach **Abbildung 23**

Es ist zu sehen, dass mit abnehmender Restfeuchte bei fortschreitendem Trocknungsprozess die Amplitudenstärke des korrigierten Nutzsingals bei verschiedenen Frequenzen zu oder abnimmt. Auf dieser Grundlage sollte das KNN eine Korrelation zwischen textiler Restfeuchte

und korrigiertes Nutzsignal ermitteln und eine Vorhersage für die momentane Textilfeuchte generieren.

5.3.2 Einfluss Restfeuchte

- **Versuchsbedingungen**

Um die zur Entwicklung und zum Anlernen des KNN zur Verfügung stehende Anzahl an Datensätzen zu erhöhen, wurden die folgenden Kombinationen der vier untersuchten Prozessparameter festgelegt (**Tabelle 7**).

Tabelle 7: Versuchsparameter zum Einfluss der Prozessparameter im Tumbler			
Ablufttemperatur in °C	Luftdurchsatz in m³/h	g-Faktor	Füllverhältnis in l/kg
20	1250	0,8	20
60	1250	0,8	20
70	1250	0,8	20
70	1500	0,8	20
70	890	0,8	20
70	600	0,8	20
20	1250	0,9	20
60	1250	0,9	20
70	1250	0,9	20
70	1250	0,8	25
70	1250	0,8	30
70	1250	0,8	17

Die Messungen mit diesen Prozessparametern wurden mehrmals wiederholt, bis die Menge an Audiodaten bzw. die Erfassungsdauer für die jeweiligen Textilfeuchten 50, 40, 30, 20, 10, 8, 6, und 5 % mindestens 20 min betrug (ca. 3 Wiederholungen pro Lauf mit gleichen Prozessparametern).

In **Abbildung 25** sind die für die obigen Untersuchungen einzustellenden Frequenzen des Frequenzumrichters für den Luftdurchsatz (Volumendurchflussrate bzw. Strömungsgeschwindigkeit gemessen mit Anemometer im Abluftrohr) sowie den g-Faktor dargestellt, die über die Drehzahl des Gebläse- bzw. Antriebsmotors eingestellt wurden.

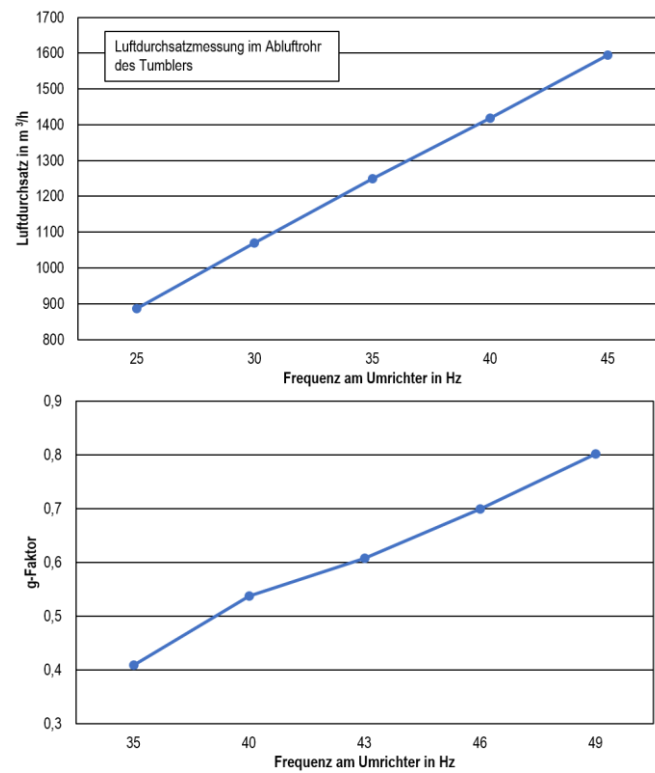
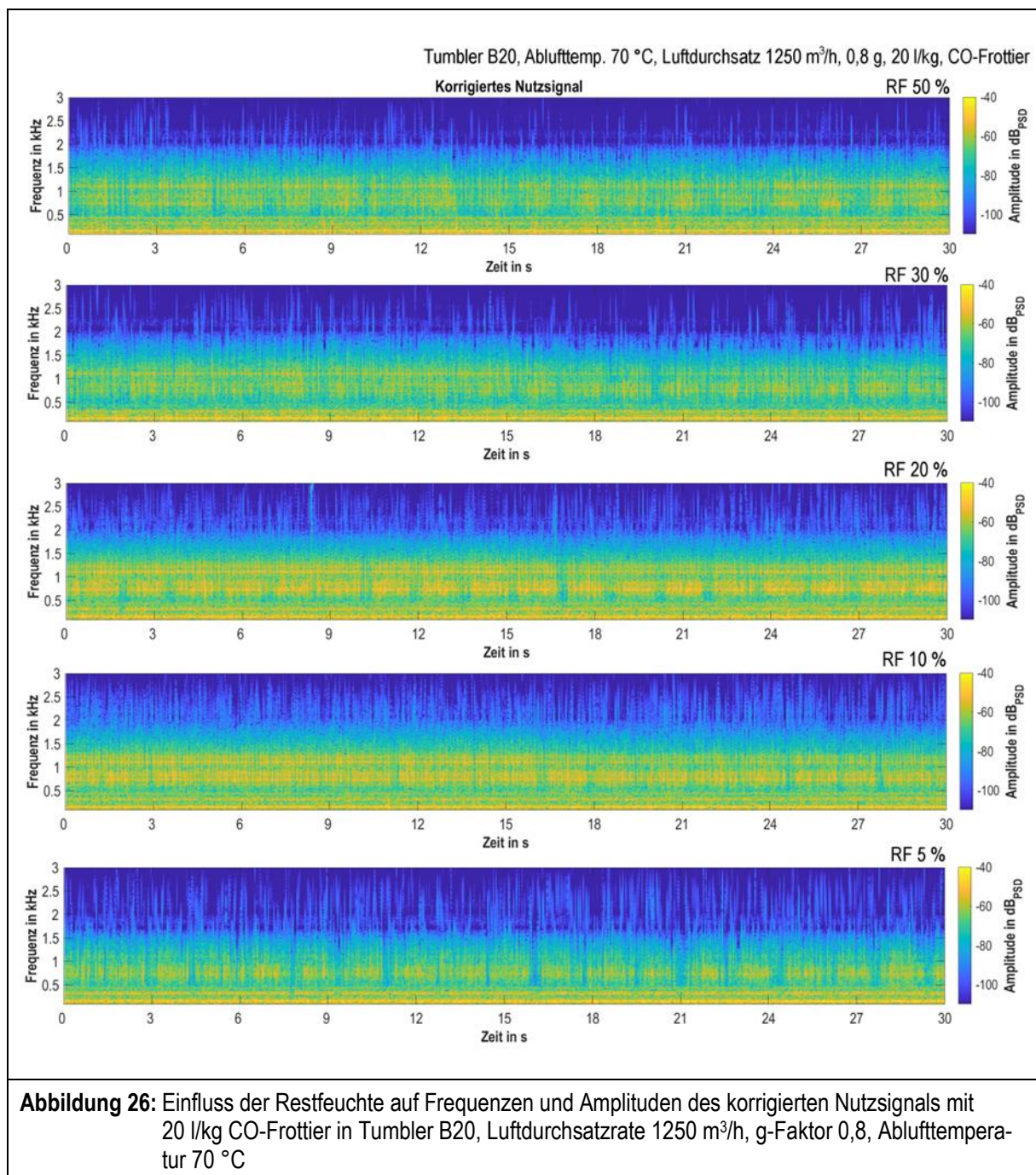


Abbildung 25: Luftvolumendurchflussrate (gemessen mit Anemometer im Abluftrohr) und Trommeldrehzahl/g-Faktor in Abhängigkeit von der eingestellten Frequenz am Frequenzumrichter

- **Ergebnisse**

Die Ergebnisse der Untersuchung zum Einfluss der Restfeuchte auf die korrigierten Nutzsiganale sind in Form von Spektrogrammen in **Abbildung 26** zu sehen.



Es wurden geringe Unterschiede in der Farbgebung der Spektrogramme ermittelt: Bei 20 – 10 % Textilfeuchte nimmt zunächst die Amplitude im Frequenzbereich von 500 – 1300 Hz zu. Unterhalb von 10 % Textilfeuchte nimmt die Menge an **hellblauen** Bereichen (niedrigere Amplitude) stark zu. Zu erwarten ist eine Verringerung der Amplitude, da das Gewicht des Postens mit zunehmender Trocknung abnimmt und somit eine geringere Kraft beim Aufprall auf die Trommel ausübt, was sich in einer geringeren Amplitude (Lautstärke) des Nutzsignals äußert.

Eine derart geringfügige Veränderung sowie an den Spektrogrammen nicht visuell feststellbare Unterschiede können von einem KNN erkannt werden und als Kriterium für die Vorhersage der Textilfeuchte genutzt werden. Die Ergebnisse des KNN werden in Kapitel 5.5 vorgestellt.

5.3.3 Einfluss g-Faktor

Zur Bestimmung des g-Faktor-Einflusses auf die korrigierten Nutzsignale wurden die praxisüblichen g-Faktoren 0,8, 0,9 und 1 untersucht (**Tabelle 7**).

Abbildung 27 zeigt den Einfluss des g-Faktors auf Frequenzen und Amplituden des korrigierten Nutzsignals mit 20 l/kg CO-Frottier (CO₂ nach Kapitel 4.8) in Tumbler B20, Luftdurchsatzrate 1250 m³/h, Ablufttemperatur 70 °C und Textilfeuchte 30 %.

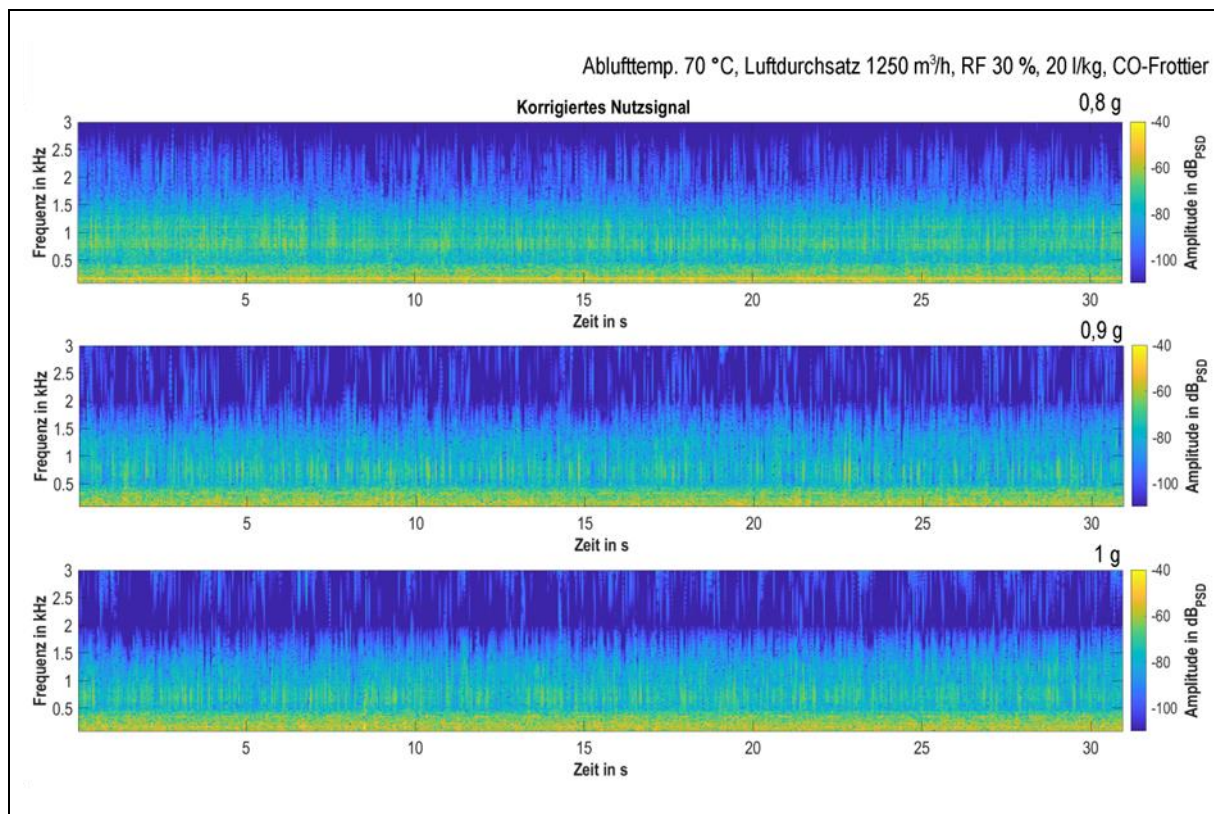


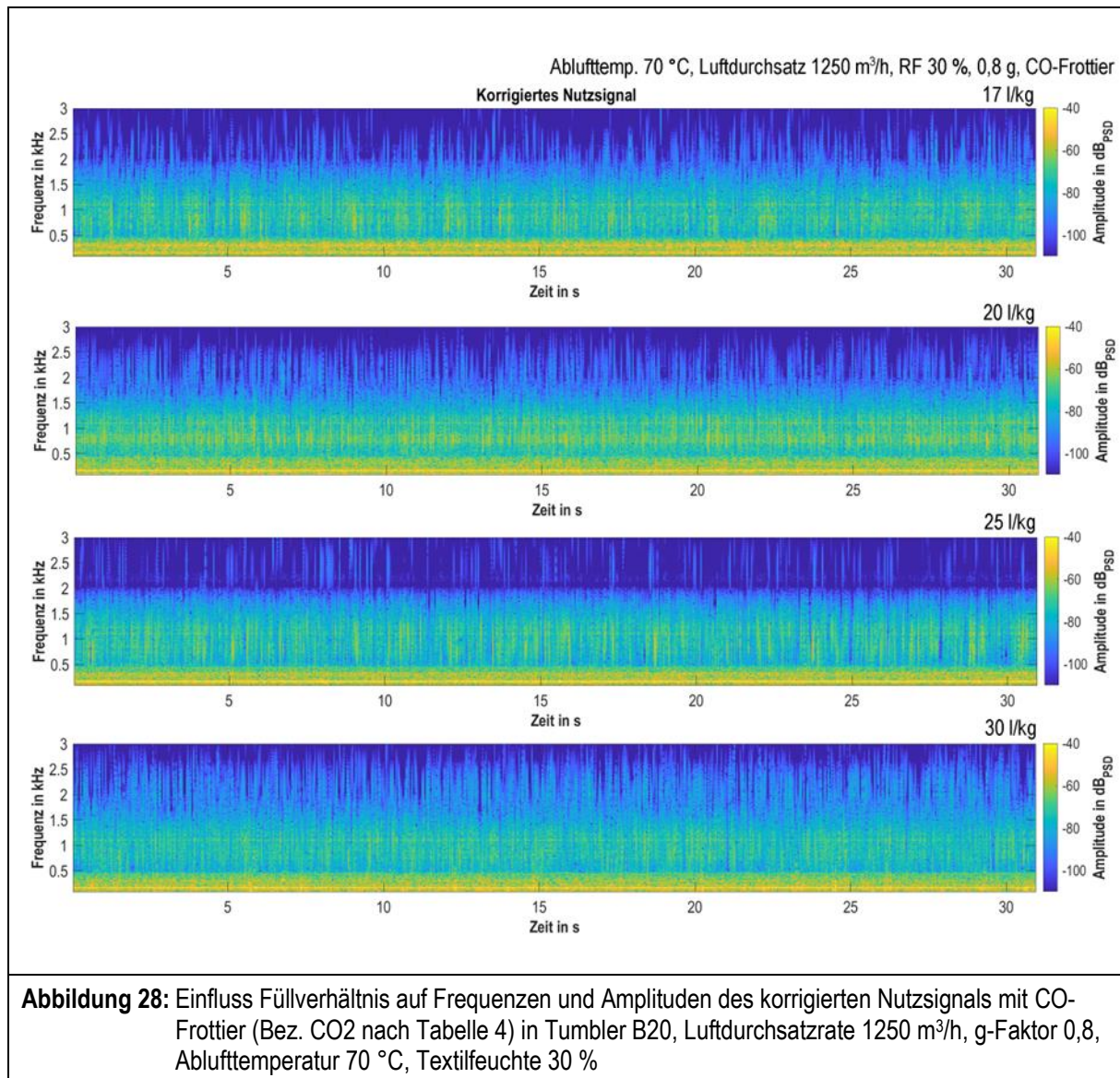
Abbildung 27: Einfluss des g-Faktors auf Frequenzen und Amplituden des korrigierten Nutzsignals mit 20 l/kg CO-Frottier (Bez. CO₂ nach Tabelle 4) in Tumbler B20, Luftdurchsatzrate 1250 m³/h, Ablufttemperatur 70 °C Textilfeuchte 30 %

Die Spektrogramme der Messungen unterscheiden sich visuell kaum voneinander. Die Unterschiede der Amplituden liegen im Bereich der Messunsicherheit von ± 5 dB. Dass die Frequenz des Aufpralls mit Zunahme des g-Faktors steigt, wie in Arbeitsschritt 1 am Versuchstand ermittelt (Kapitel 5.1), ist hier aufgrund der stärkeren Störsignale (Antrieb, Luftdurchströmung) selbst nach Audiokorrektur schwieriger zu erkennen. Der g-Faktor im Bereich 0,8 - 1 hatte demnach in den am Tumbler B20 durchgeführten Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale.

5.3.4 Einfluss Füllverhältnis

Nach **Tabelle 6** wurde Tumbler B20 mit dem CO-Frottier Posten CO2 (**Tabelle 4**, Kapitel 4.8) mit 17, 20, 25 und 30 l/kg beladen, um den Einfluss von Überbeladung, maximaler Beladung und Unterbeladung auf die Nutz- und Störsignale zu untersuchen.

Die Ergebnisse in **Abbildung 28** zeigen, dass die Spektrogramme sich kaum voneinander unterscheiden. Die Amplituden unter 400 Hz sind für alle untersuchten Füllverhältnisse höher als - 50 dB und die Amplituden über 2 kHz liegen unter - 80 dB.

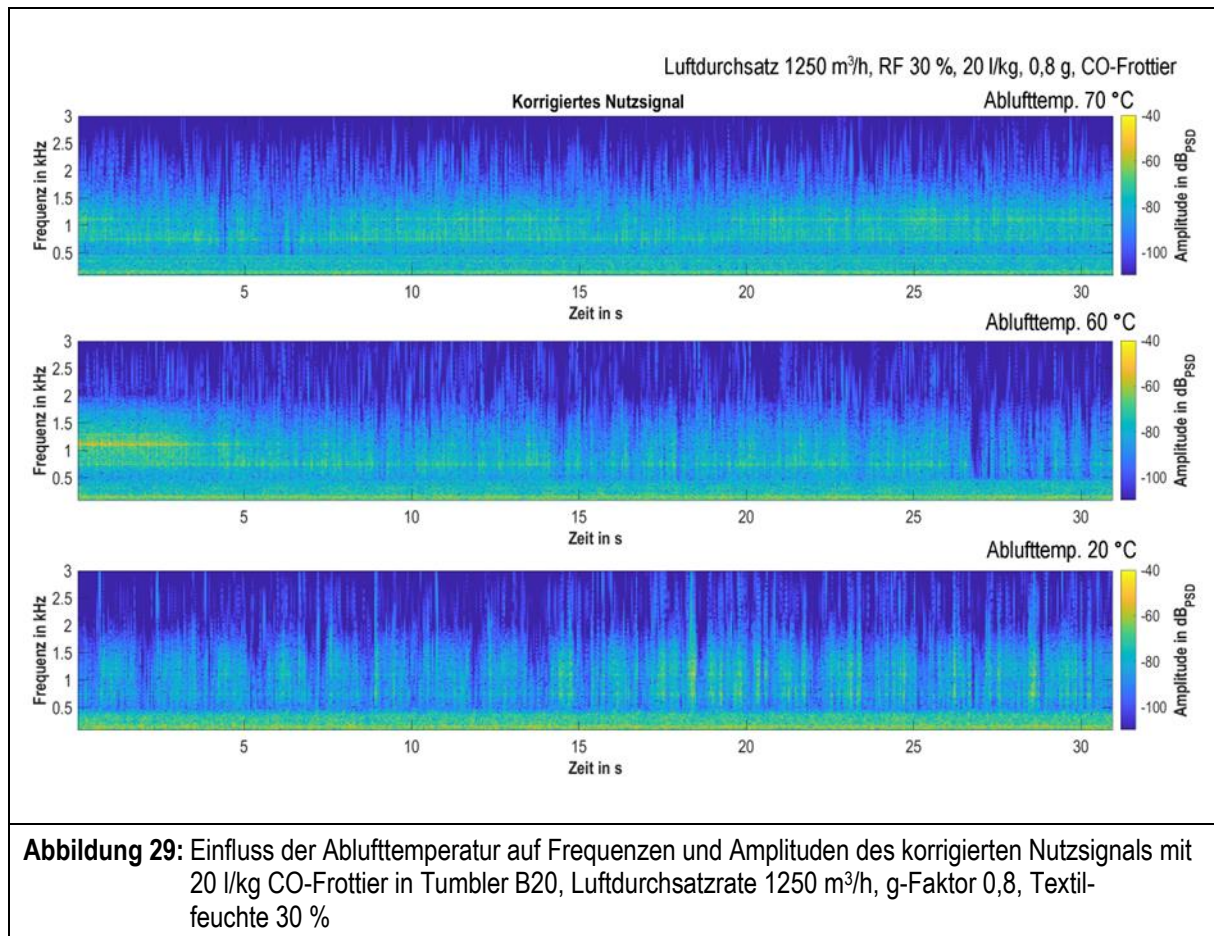


5.3.5 Einfluss Ablufttemperatur

Nutz- und Störsignale wurden unter Variation der Ablufttemperatur bei sonst gleichbleibenden Prozessparametern (Luftdurchsatzrate 1250 m³/h, g-Faktor 0,8, ohne Reversierung und Pausen) und mit demselben Posten CO2 (Tabelle 4, Kapitel 4.8) untersucht.

Die Spektrogramme (Amplituden und Frequenzen in Abhängigkeit von der Aufnahmedauer) in **Abbildung 29** deuten darauf hin, dass die Ablufttemperatur nur einen geringen Einfluss auf

die korrigierten Nutzsingale hat. Die Spektrogramme bei 70 °C und 60 °C unterscheiden sich über den gesamten gezeigten Zeitabschnitt kaum. Geringe Unterschiede befinden sich innerhalb des Bereichs von Messunsicherheiten (± 5 dB).



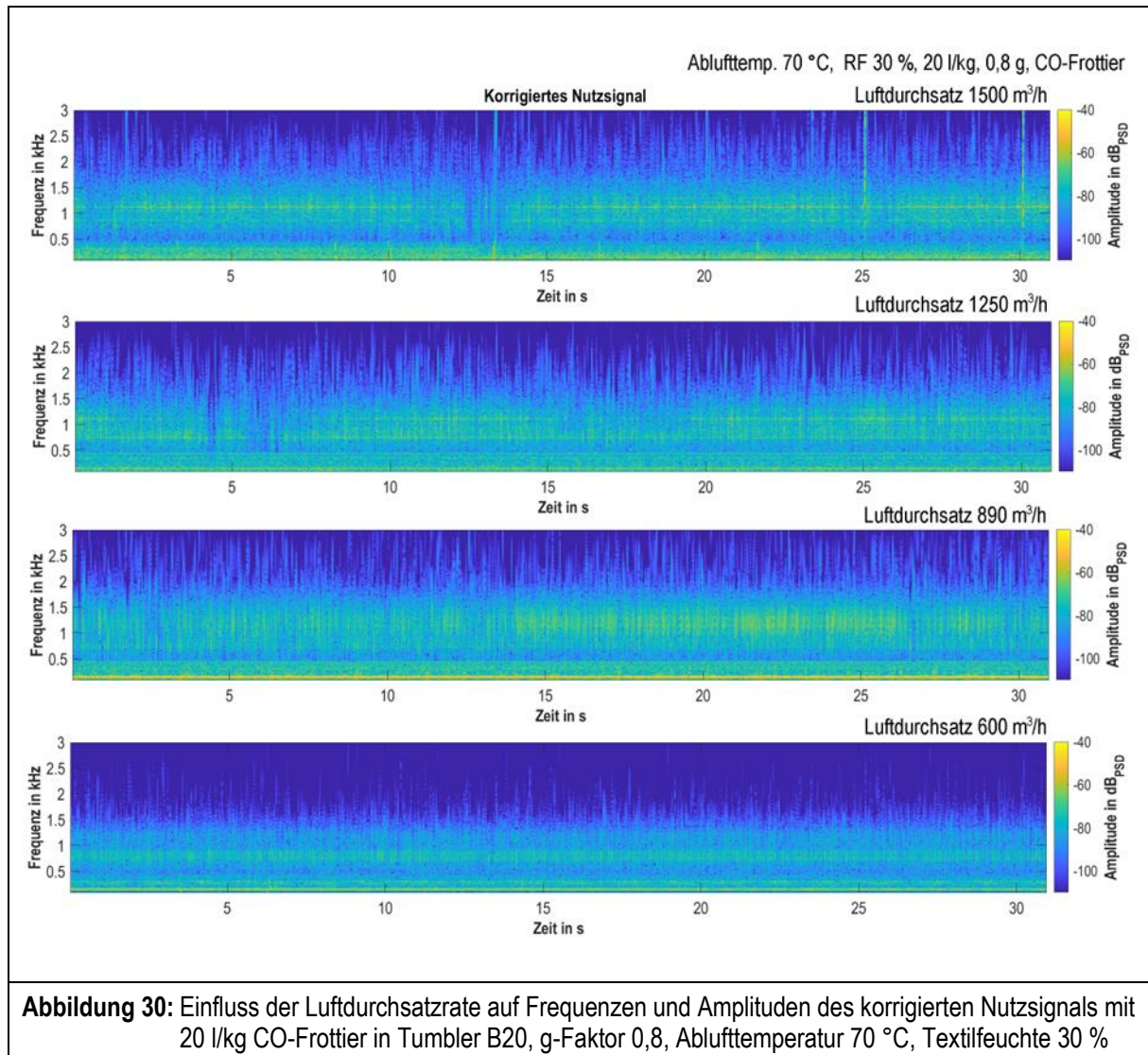
Bei 20 °C sind Pausen (dunkelblaue Bereiche) geringer Amplitude (< -100 dB) im Bereich zwischen 500 und 1.500 Hz des korrigierten Nutzsingals zu erkennen, die aus dem Wegfall von Geräuschen zur Erzeugung der Heißluft resultieren.

5.3.6 Einfluss Luftdurchsatz

Um den Einfluss der Luftdurchsatzrate zu untersuchen, wurden Nutz- und Störsingale am Tumbler B20 mit 20 l/kg CO-Frottier, g-Faktor 0,8, Ablufttemperatur 70 °C und vier verschiedenen Luftdurchsatzraten (1500, 1250, 890, 600 m³/h) aufgenommen (**Tabelle 6**).

Die in **Abbildung 30** dargestellten Spektrogramme der korrigierten Nutzsingale (Amplituden und Frequenzen in Abhängigkeit von der Aufnahmedauer) unterscheiden sich bei Werten zwischen 1500 und 890 m³/h kaum (hellgrüne bis gelbe Bereiche sind bei den gleichen Frequenzen zu finden). Das heißt, dass nach optischer Bewertung der Spektrogramme die Luftdurchsatzrate von 890 bis 1.500 m³/h keinen oder nur geringen Einfluss auf die korrigierten Nutzsingale hat.

Bei einer Luftdurchsatzrate von 600 m³/h zeigt sich eine erniedrigte Amplitude im Vergleich zu höheren Luftdurchsatzraten. Hier sind die Störsignale durch Wegfall von Gebläse-Betriebsgeräuschen vermindert, sodass diese Anteile in den korrigierten Nutzsignalen ebenfalls um ca. 10 dB reduziert sind.



5.3.7 Zusammenfassung

Bezüglich des Einflusses von Prozessparametern auf die Abroll- und Fallgeräusche von Wäscheposten (korrigierte Nutzsignale) im gewerblichen Tumbler B20 zeigte sich, dass – wie am Versuchsstand nach Kapitel 4.2 – Veränderungen der korrigierten Nutzsignale mit Abnahme der Restfeuchte auftreten. Zum einen verringert sich die Amplitude über alle Frequenzen aufgrund der Masseabnahme des Wäschepostens. Zum anderen fallen trockene Wäscheteile vermehrt einzeln, sodass die Stärke des Aufpralls abnimmt.

Die Prozessparameter Luftdurchsatzrate, Füllverhältnis, Ablufttemperatur und g-Faktor hatten in Tumbler B20 bei visueller Bewertung der aufgenommenen Spektrogramme geringen bis keinen Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Die Unterschiede lagen im Bereich der Messunsicherheit.

5.4 Analyse der Abroll- und Fallgeräusche im Tumbler abhängig von textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile im Wäscheposten

Für die Untersuchungen zum Einfluss textilspezifischer Eigenschaften wurden verschiedene Wäscheposten mit CO, PES/CO 90/10 und PES/CO 42/58 (Füllverhältnis 25 l/kg) zusammengestellt (**Tabelle 4**, Kapitel 4.8). Dabei wurden Teileanzahl, die Abmessungen oder das Flächengewicht (jeweils voneinander abhängige Parameter) variiert.

Für die Messungen wurde Trockner B20 ausgewählt, da hier alle relevanten Prozessparameter (g-Faktor, Temperatur, Luftdurchsatz) eingestellt werden konnten. Die korrigierten Nutzsignale wurden bei den Wäscheposten unter Variation von Fasersubstrat, Flächengewicht, Teileanzahl und Füllverhältnis (**Tabelle 4**, Kapitel 4.8) bei den konstanten Prozessparametern g-Faktor 0,8 ohne Reversierung, Soll-Ablufttemperatur 70 °C und Luftdurchsatz 1.250 m³/h aufgenommen und die Restfeuchten durch Wiegen (Entnahme der Posten nach 3 min und anschließendem Weiter Trocknen) bestimmt.

Nach Audiokorrektur zur Minimierung der Störsignale wurden die aufgenommenen Audiodaten in die für das KNN erstellte Datenbank eingepflegt.

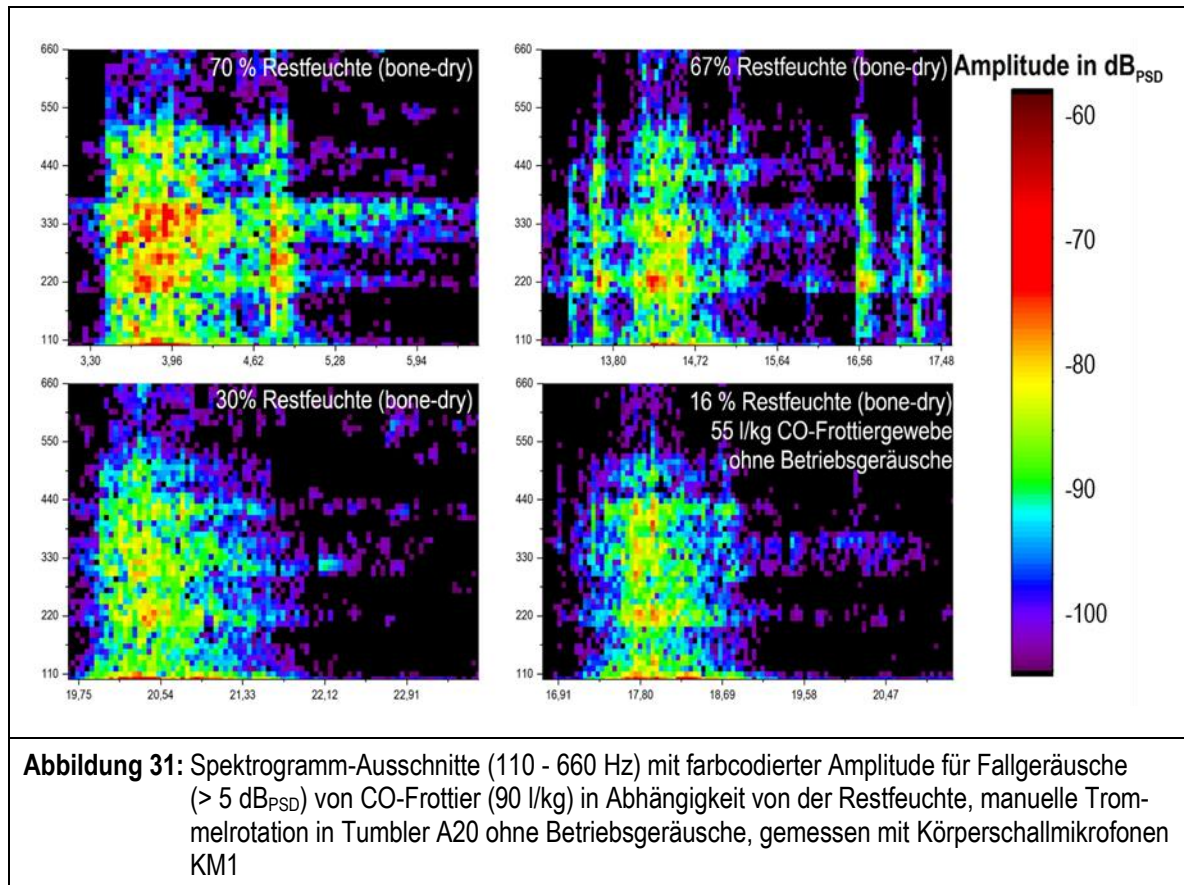
5.4.1 Einfluss der Textilrestfeuchte

- **Untersuchungen ohne Betriebsgeräusche (manuelle Trommelrotation)**

Die Trocknertrommeln von Tumbler A20 wurde zunächst manuell in eine Richtung gedreht, um die Betriebsgeräusche weitgehend auszuschließen. Dabei wurden die Nutzsignale (keine Audiokorrektur, da ohne Betriebsgeräusche) mit den Körperschallmikrofonen KM1 bei Verwendung von 5 kg CO-Frottier (Füllverhältnis 90 l/kg) für unterschiedliche Restfeuchten in Tumbler A20 ohne Betriebsgeräusche (Antrieb und Gebläse für Heißluft) gemessen.

Die relativen Amplituden in dB_{PSD} und Frequenzen der Nutzsignale bei manueller Rotation in Tumbler A20 sind in **Abbildung 31** als Spektrogramme dargestellt.

Darin sind Unterschiede der Abroll- und Fallgeräusche mit abnehmender Restfeuchte bzw. zunehmender Trocknungsdauer in den Spektrogrammen erkennbar: Der Bereich mit hoher Amplitude (> 30 dB_{PSD}) nimmt zwischen 110 Hz und 660 Hz mit abnehmender Restfeuchte bzw. zunehmender Trocknung der Beladung deutlich ab.

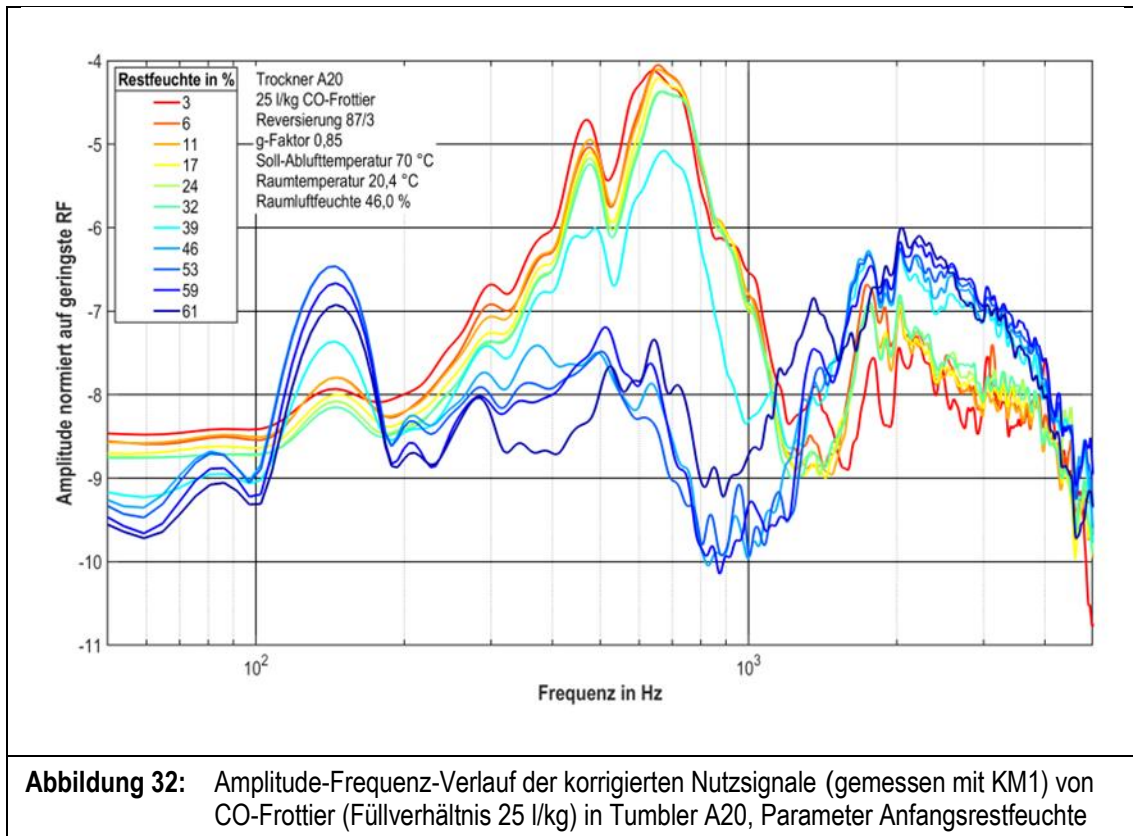


- **Untersuchungen mit Betriebsgeräuschen**

In **Abbildung 32** ist das korrigierte Nutzsignal (ohne Betriebsgeräusche bzw. Störsignal) eines Wäschepostens mit CO-Frottier (25 l/kg) für Textilfeuchten von 3 bis 61 % in Tumbler A20 dargestellt.

Die normierte Amplitude, bezogen auf den Wert bei geringster gemessenen Restfeuchte 3 % (rote Kurve in **Abbildung 32**) und gemittelt über die Aufnahmezeit bzw. Trocknungsdauer von 30 min in Abhängigkeit von der Frequenz des korrigierten Nutzsignals mit zunehmender Trocknung wird für bestimmte Frequenzen entweder reduziert oder verstärkt: Mit abnehmender Restfeuchte sinkt der Anteil in den Frequenzbereichen 100 - 200 Hz und 2000 - 4000 Hz. Der Anteil mittlerer Frequenzen (300 - 1000 Hz) nimmt zu.

Des Weiteren sind auch die Kurven im Bereich von Restfeuchten unter 10 % zu unterscheiden, d. h. es liegt ein Einfluss der Textilfeuchte auf die Nutzsignale vor.



In **Abbildung 33** sind die Spektrogramme der korrigierten Nutzsignale von 20 l/kg CO-Gewebe (CO1, nach **Tabelle 4**) mit abnehmender Restfeuchte zu sehen. Dabei fällt auf, dass die Amplitude bei Frequenzen unter 500 Hz mit der Restfeuchte abnimmt. Wenn der Posten trockenet führt der Masseverlust zu einer Verringerung der Aufprallintensität und somit der Lautstärke beim Wäscheaufprall.

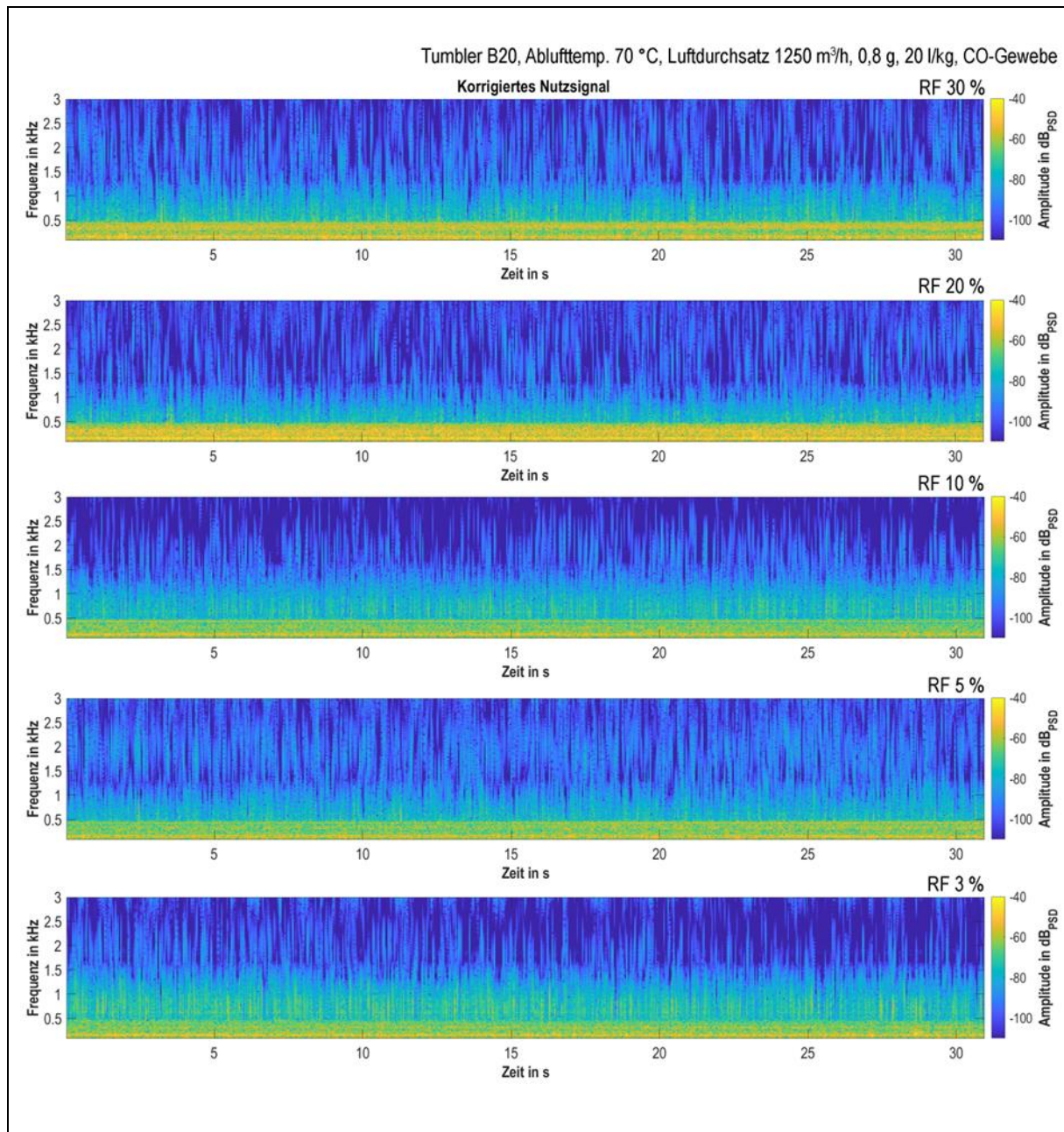
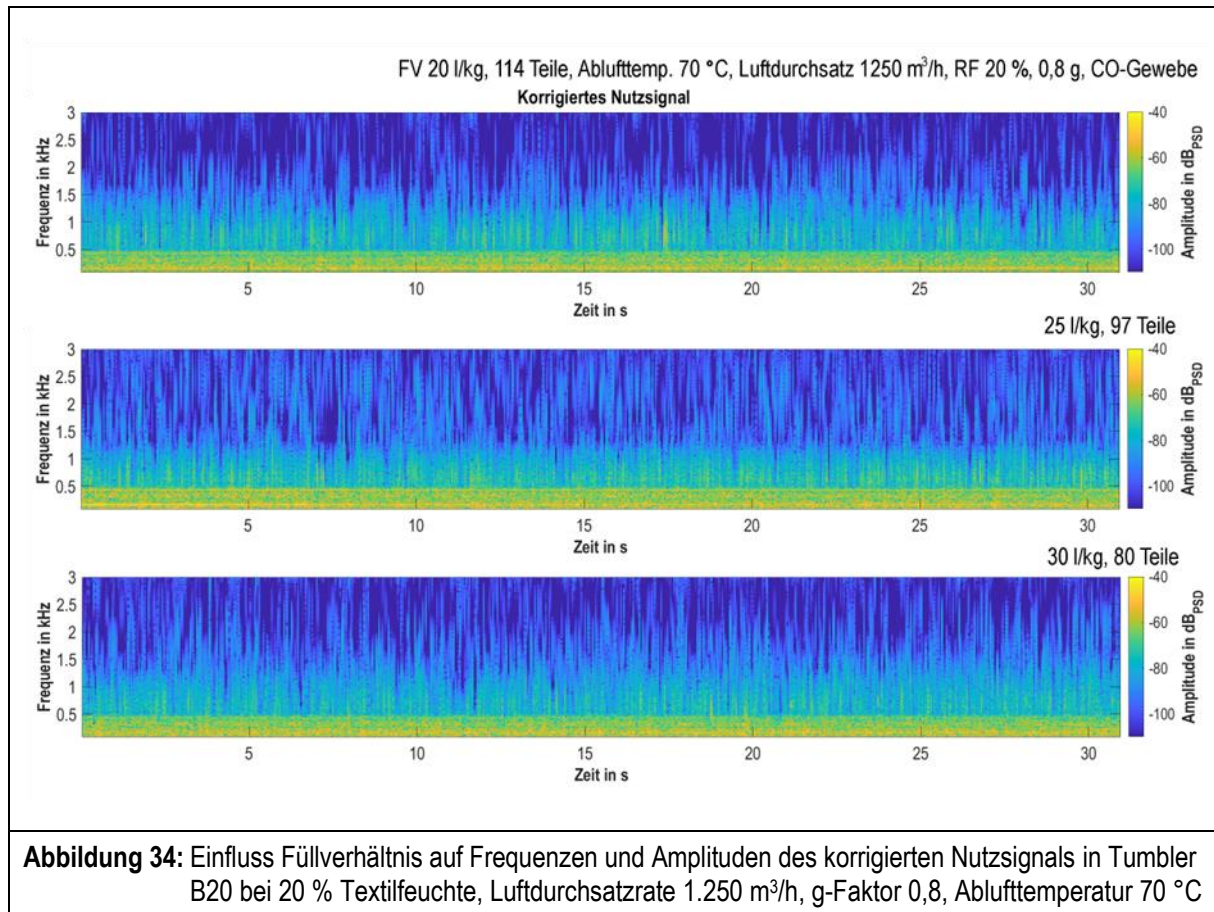


Abbildung 33: Einfluss der Restfeuchte auf Frequenzen und Amplituden des korrigierten Nutzsignals bei 20 l/kg CO-Gewebe CO1 (**Tabelle 4**) in Tumbler B20, Luftdurchsatzrate 1.250 m³/h, g-Faktor 0,8, Ablufttemperatur 70 °C

5.4.2 Einfluss Füllverhältnis

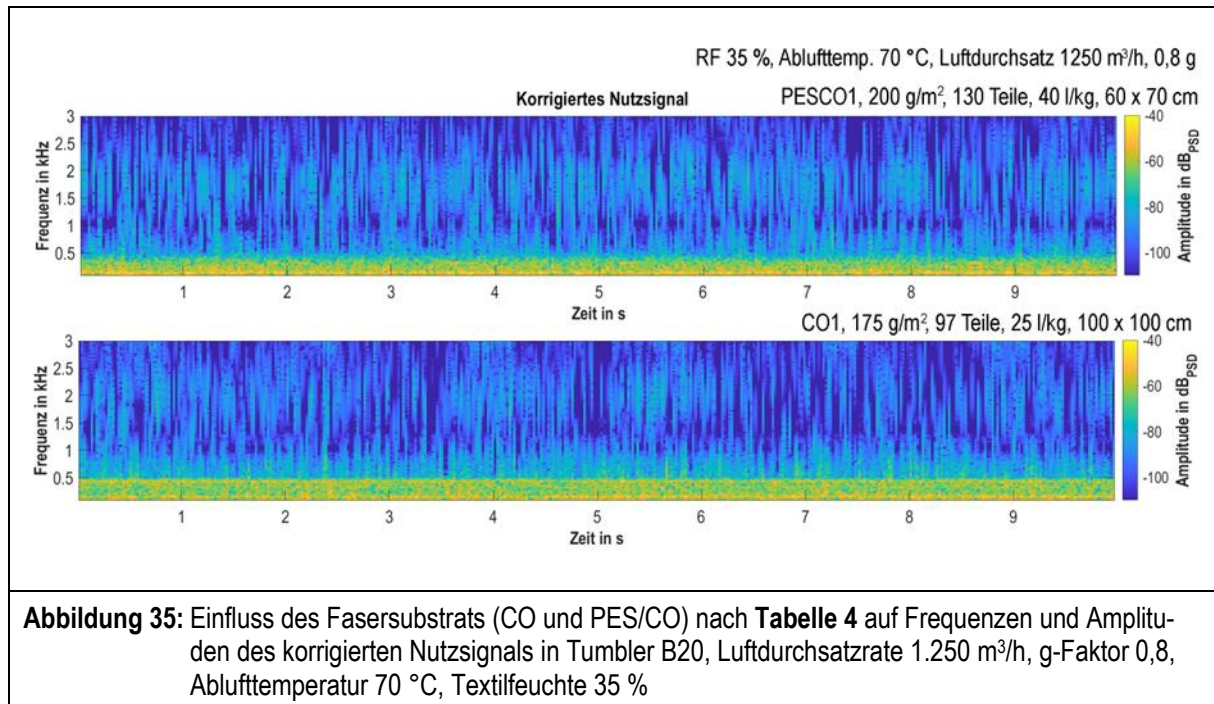
Bei Untersuchungen mit variierendem Füllverhältnis bzw. Teileanzahl zeigt sich bei CO-Gewebe kein Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale (**Abbildung 34**), wie auch zuvor bei Frottiertergewebe in **Abbildung 28** (Kapitel 5.3).



5.4.3. Einfluss Fasersubstrat und Abmessungen

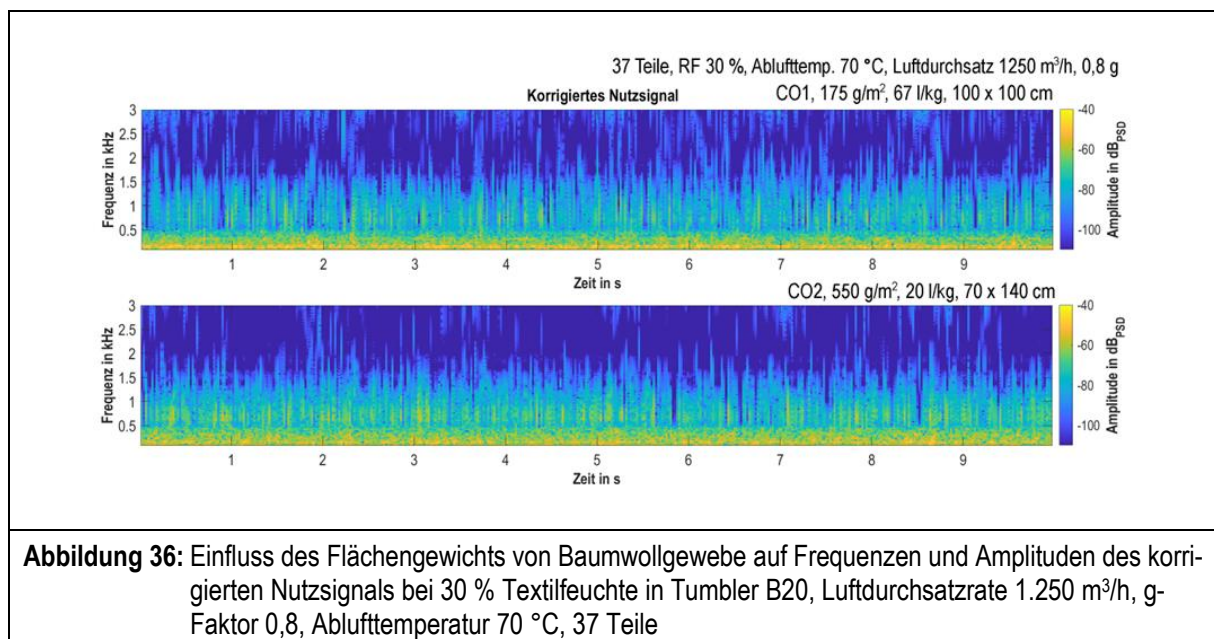
Zur Untersuchung des Einflusses des Fasersubstrats wurden die Posten CO1 (100 x 100 cm², 175 g/m²) und PESCO1 (60 x 70 cm², 200 g/m²) nach **Tabelle 4** (Kapitel 4.8) ausgewählt. Dabei unterschieden sich neben dem Fasersubstrat auch das Füllverhältnis und die Abmessungen der einzelnen Teile. Da kein signifikanter Einfluss des Füllverhältnisses nachgewiesen wurde (Kapitel 5.4.2), kann das unterschiedliche Füllverhältnis hier bei diesem Vergleich vernachlässigt werden.

Wie man in **Abbildung 35** erkennen kann, unterscheiden sich die korrigierten Nutzsignale dieser beiden Posten nicht signifikant voneinander. Sowohl das Fasersubstrat als auch die Maße haben demnach keinen in den Spektrogrammen erkennbaren Einfluss auf die Abroll- und Fallgeräusche der Posten.



5.4.4 Einfluss Flächengewicht

Um den Einfluss des Flächengewichts zu ermitteln, wurden bei gleichem Fasersubstrat (100 % CO) die korrigierten Nutzsignale der Wäscheposten CO1 (100 x 100 cm², 175 g/m²) und CO2 (70 x 140 cm², 550 g/m²) nach **Tabelle 4** (Kapitel 4.8) für eine Teileanzahl von jeweils 37 untersucht. Dabei unterschieden sich zwar die Abmessungen der Einzelteile beider Posten und somit auch das Füllverhältnis, deren Einflüsse jedoch nach Kapitel 5.4.2 und 5.4.3 vernachlässigt werden können. Selbst bei einem Flächengewicht-Unterschied von 375 g/m² erkennt man keine signifikanten Unterschiede in den Spektrogrammen des korrigierten Nutzsignals (**Abbildung 36**).



5.4.5 Zusammenfassung

Der Einfluss der textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile auf die korrigierten Nutzsignale im Tumbler ist vor allem signifikant von der Textilfeuchte abhängig. Bei geringer Textilfeuchte ($< 10\%$) nimmt der Einfluss von Flächengewicht zu, da die Teile vermehrt einzeln fielen. Das Fasersubstrat und die Textilabmessungen haben bei gleicher Textilfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Gleiches gilt für den Einfluss des Textilflächengewichts.

Die korrigierten Nutzsignale wurden mittels diskreter Fourier-Transformation in diskrete Frequenzen mit dazugehörigen, zeitabhängigen Amplituden umgewandelt und die aufgenommenen Audiodaten nach Textilfeuchten sortiert in die für die Entwicklung und das Anlernen des künstlichen neuronalen Netzwerks (KNN) erstellte Datenbank eingepflegt.

5.5 Entwicklung eines KNN zur Audioanalyse der textilen Restfeuchte

Auf Basis der aus den vorhergehenden Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnisse und der gesammelten Audiodaten wurde eine geeignete Netzwerktopologie (Anzahl von Eingangsdaten, Neuronen, Gewichtungen, Aktivierungsfunktionen) für die Audioanalyse entwickelt (**Abbildung 37**).

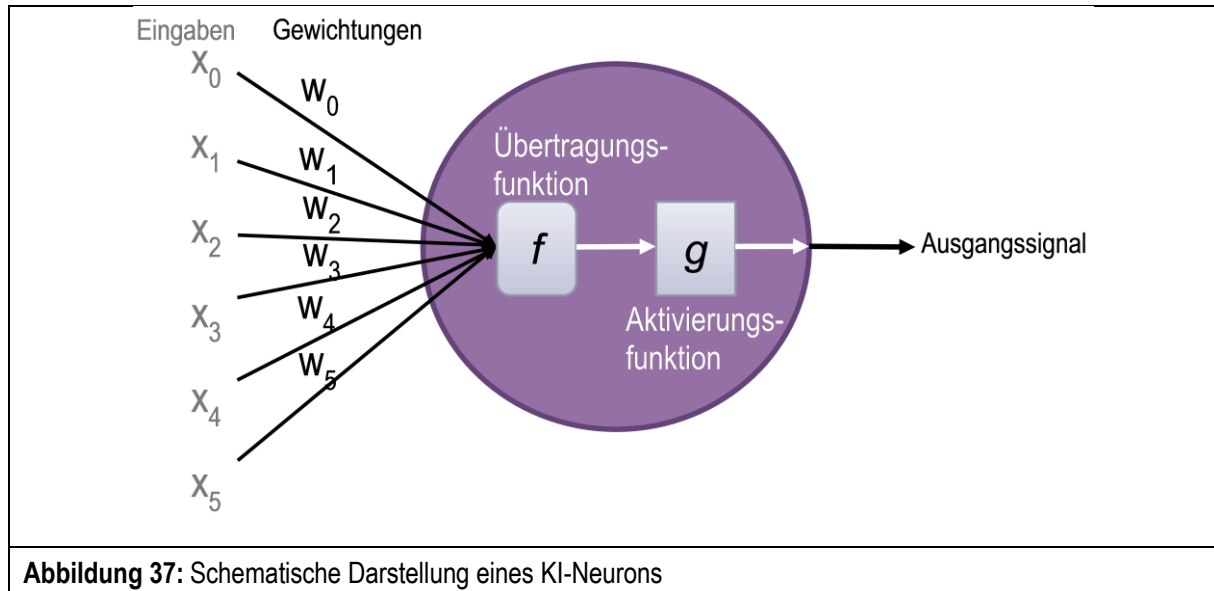


Abbildung 37: Schematische Darstellung eines KI-Neurons

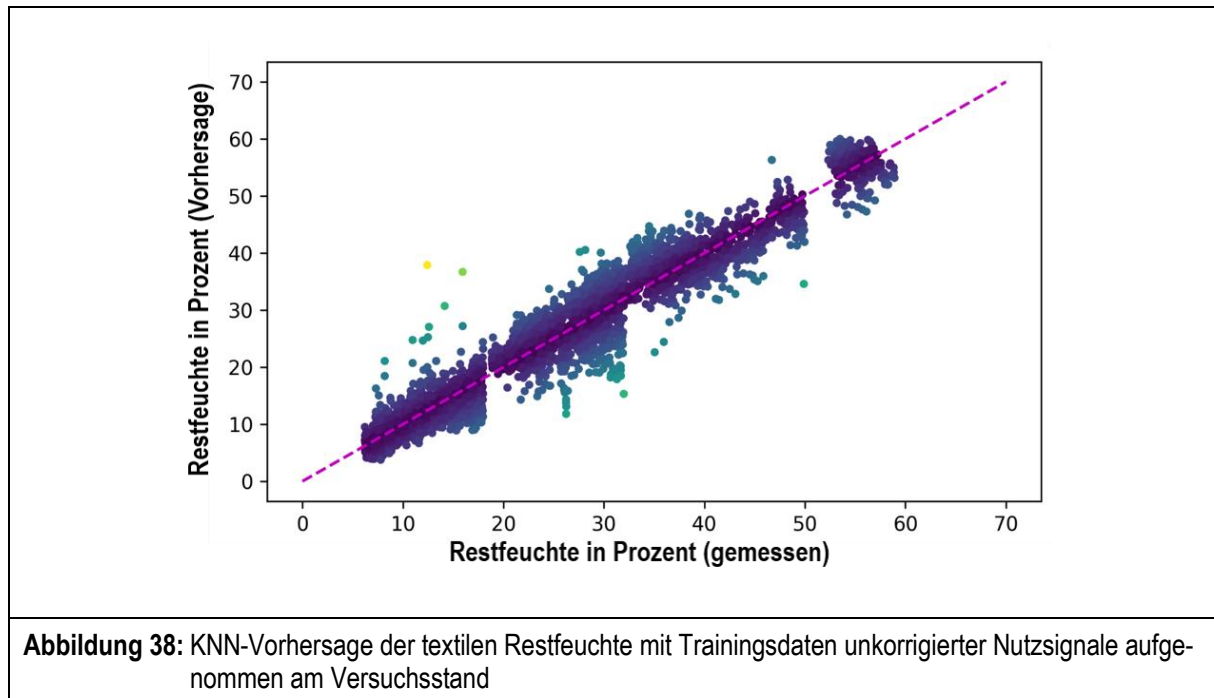
Für das KNN wurde ein sogenanntes neuronales Faltungsnetzwerk (Convolutional Neural Network, CNN) ausgewählt, da es eine ausreichende Komplexität für die Analyse der Audiodaten besitzt, aber nicht unnötig rechenaufwendig ist. Es besteht aus zwei neuronalen faltenden Schichten (convolutional layers), die jeweils auf die zwei Dimensionen der Eingangsdaten angewandt wurden. Diese Schichten filtern die Daten (Erkennung von Kanten in Bildern etc.), sodass sie von der KI verarbeitet werden können. Für die Eingangsdaten werden die gemessenen Audiodaten in zweidimensionale Matrizen über eine diskrete Fourier Transformation konvertiert. Eine $m \times n$ - Matrix kann wie ein zweidimensionales Bild verstanden werden, das von einer vertikalen Achse mit m Werten und einer horizontalen Achse mit n Werten aufgespannt wird, d. h. die Matrixwerte an den Punkten (n, m) setzen sich zusammen aus den Amplitudenwerten für jede diskrete Frequenz und jeden Zeitpunkt. In jeder neuronalen Schicht werden die Daten dimensionsweise, d. h. reihen- und spaltenweise, gefaltet und anschließend als eindimensionale Spalten bzw. Reihen ausgegeben.

Beim sogenannten Überwachten Lernen, das hier angewendet wurde, sind Paare von Eingangsdaten und Ergebnissen bekannt. Das KNN erhält die Eingangsdaten und erzeugt einen Ausgabewert. Dieser wird dann mit dem bekannten Ergebnis verglichen und eine Abweichung, bezeichnet als Fehler, wird berechnet. Anhand dieser Vorgehensweise wird das KNN laufend angepasst.

Die Audiomessdaten (gestörte und korrigierte Nutzsignale sowie Störsignale) wurden in Datensätze abhängig von Trommelvolumen, g-Faktor und Textilfeuchte eingeteilt und anschließend in Trainings- und Testdatensätze aufgeteilt. Das entworfene KNN wurde nur mit dem Teilsatz der Trainingsdaten angeleitet.

Nach Identifikation geeigneter Hyperparameter wurde das KNN mit den Testdaten überprüft, wodurch eine Überanpassung (Overfitting) vermieden wurde.

Eine Ausgabe des KNN für Audiodaten, aufgenommen am Versuchstand mit Trommel E120 ohne Heißluft, ist in **Abbildung 38** zu sehen. Die durch Wiegen des Wäschepostens gemessene Textilfeuchte ist gegen die durch das KNN vorhergesagte Textilfeuchte aufgetragen. Bei perfekter Vorhersage wäre eine lineare Ursprungsgerade zu sehen.



Mit den ersten Testdatensätzen lieferte das antrainierte KNN Vorhersagen der momentanen textilen Restfeuchte mit Korrelationskoeffizienten von 0,9, wobei bei einem Korrelationskoeffizienten größer als 0,5 ein starker linearer Zusammenhang zwischen Vorhersage und Messung besteht. Das bedeutet, dass das KNN hier eine sehr hohe Erfolgsquote bei der Bestimmung der Restfeuchte aufweist.

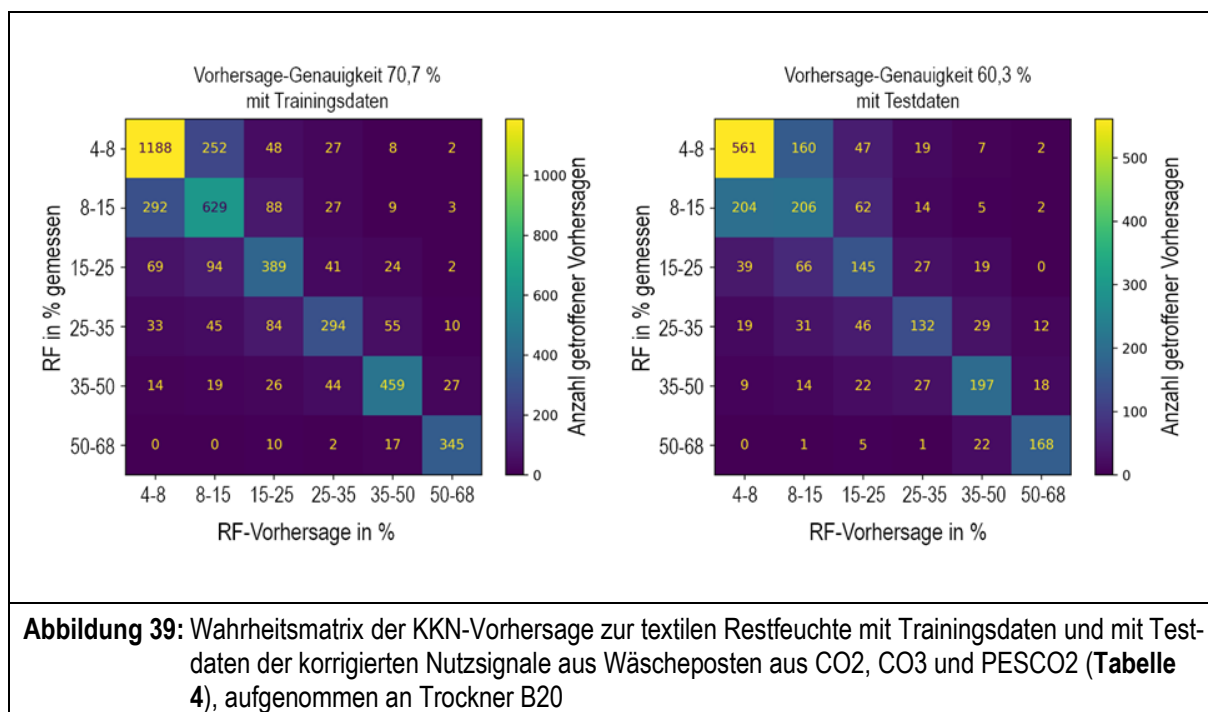
Durch Hinzunahme von Datensätzen, die an dem mit Heißluft betriebenen gewerblichen Trockner generiert wurden, verloren die KNN-Modelle allerdings an Vorhersagegenauigkeit zur Bestimmung der exakten Restfeuchte.

Dies ist in den größeren Unterschieden der gemessenen Restfeuchten begründet, an die die Modelle antrainiert werden. Dies liegt zum einen darin, dass die Wäscheposten kontinuierlich getrocknet, aber ihre Restfeuchte nur diskontinuierlich gemessen werden konnte. Ferner ist davon auszugehen, dass nicht alle Teile des Wäschepostens mit der gleichen Intensität getrocknet werden und die gemessene Restfeuchte nur ein Mittelwert der Restfeuchte des gesamten Wäschepostens darstellt. Die Restfeuchten einzelner Teile schwanken um diesen Mittelwert, wodurch die Aufprallgeräusche nicht exakt einer Restfeuchte, sondern einer Spanne an Restfeuchten entsprechen.

Um diese Fehler zu minimieren, wurde die während der Trocknung gemessene Restfeuchte in unterschiedlich große Feuchtebereiche bzw. Kategorien unterteilt. Gute Ergebnisse konnten

mit der Unterteilung in sechs Kategorien erzielt werden, wobei die Textilfeuchten in die Kategorien 4-8, 8-15, 15-25, 25-35, 35-50 und 50-68 % unterteilt wurden.

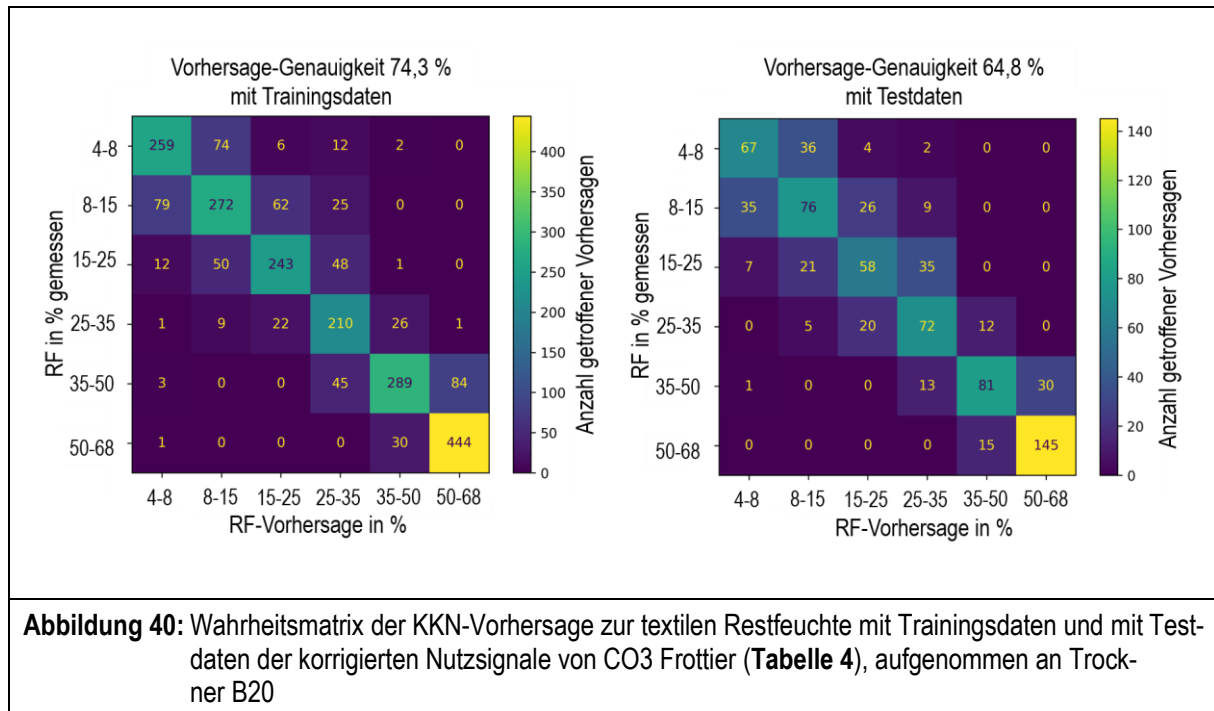
In **Abbildung 39** sind die entsprechenden Wahrheitsmatrizen dargestellt, die die Vorhersage-Genauigkeit des KNN für jede Restfeuchte-Kategorie gegenüber der gemessenen Textilfeuchte angeben. Die Vorhersage-Genauigkeit ist definiert als der Anteil korrekter Vorhersagen im Vergleich zu allen getroffenen Vorhersagen. Die korrekten Vorhersagen sind in der Diagonalen der Wahrheitsmatrix zu erkennen, während alle anderen Felder falsche Vorhersagen darstellen. In der Farbskala ist die absolute Anzahl der Vorhersagen für die gegebenen Restfeuchten von violett (niedrig) bis gelb (hoch) angegeben. Die Messungen basieren auf den Untersuchungen an Trockner B20, die mit drei verschiedenen Wäscheposten durchgeführt wurden. Dies waren Wäscheposten aus CO₂, CO₃, PESCO₂ (**Tabelle 4**, Kapitel 4.8), die mit 20 kg (Füllverhältnis 20 l/kg), Ablufttemperatur 70 °C, Luftdurchsatz 1.250 m³/h und g-Faktor 0,8 behandelt wurden. Dabei ist auf der y-Achse die durch Wiegen bestimmte Restfeuchte RF in % dargestellt und auf der x-Achse die KNN-Vorhersage der Restfeuchte in %.



Danach ergab sich eine bessere Vorhersage-Genauigkeit von 70,7 % mit bereits durch das Antrainieren bekannten Daten (Trainingsdaten) im Vergleich zu unbekanntem Testdaten mit der Vorhersage-Genauigkeit von 60,3 %.

In **Abbildung 40** sind die Ergebnisse weiterer Trainingsdurchläufe an Trockner B20 mit neuen Messdaten und der Beschränkung auf eine Textilart (Frotter CO₃, **Tabelle 4**) – mit ansonsten gleichen Trocknungsbedingungen von **Abbildung 39** – dargestellt.

Unter diesen Bedingungen konnte die Vorhersage-Genauigkeit auf 74,3 % für Trainingsdaten und 64,8 % für Testdaten gesteigert werden.



Eine weiter erhöhte Genauigkeit der KNN-Vorhersage zur textilen Restfeuchte konnte im Rahmen der begrenzten Bearbeitungsdauer des Projektes nicht erreicht werden. Auf mögliche Anpassungen des Auswertalgorithmus bzw. des Untersuchungsdesigns zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit an Tumblern wird bei der Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxishen Bedingungen in Kapitel 5.6 und in der Zusammenfassenden Diskussion (Kapitel 7) eingegangen.

- **Zusammenfassung**

Unter Einsatz von Tensorflow mit Keras wurden KNN erstellt und mit Daten aus den vorherigen Arbeitsschritten angelernt. Diese KNN bestehen aus einigen faltenden Schichten gefolgt von einem tiefen Neuronalen Netzwerk. Die Anzahl der jeweiligen Schichten und die Anzahl der Neuronen in ihnen wurden als Hyperparameter ausgewählt und optimiert. Es konnte ein Modell erstellt werden, welches eine gute Vorhersagbarkeit (74,3 %) für die Restfeuchte bietet und bei Übertragung auf neue Werte weniger als 10 % an Vorhersagegenauigkeit einbüßt.

5.6 Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxisnahen Bedingungen

Das Funktionsmuster des Audioaufnahmesystems und das KNN wurden unter praxisnahen Bedingungen im Technikum des wfk-Instituts erprobt und deren Eignung zur Trocknungsprozessregelung bewertet.

5.6.1 Experimentelles

- **Audioanalyse**

Zur Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxisnahen Bedingungen wurde in den gewerblichen Tumbler B20 (**Tabelle 3**, Kapitel 4.6) ein Kleinrechner mit Tensor-Recheneinheit (Raspberry Pi 4; 8 GB RAM; USB-Beschleuniger, Coral Edge Tensor Processing Unit Coprocessor) integriert und das angelernte künstliche neuronale Netzwerk (KNN) aufgespielt. Die Tensor-Prozessoreinheit ermöglicht maschinelles Lernen auf dem Kleinrechner, indem die Anwendung eines bereits antrainierten KNN oder auch das Antrainieren der KNN beschleunigt wird.

Das Raspberry Pi 4 wurde mit einem Audio-Interface (Preonus Studio 24c) verbunden, an das zwei Körperschallmikrofone (3-fach Piezo-Kontaktmikrofone) angeschlossen waren. Ein Luftschallmikrofon erfasste die gestörten Nutzsignale direkt unter der Trommel und ein zweites die Störsignale am Außengehäuse des Trockners.

Ein eigens entwickeltes Python-Skript zeichnete über beide Körperschallmikrofone ein 2 s langes Audiosignal auf, gefolgt von einer 2-sekündigen Pause, sodass alle 4 s eine neue Aufnahme gestartet wurde. Die Störsignale wurden von den Nutzsignalen subtrahiert, um – analog den vorhergehenden Untersuchungen – das bereinigte Nutzsignal zu erhalten, aus dem kontinuierlich die Spektrogramme erstellt wurden.

- **Regelung des Trocknungsprozesses**

Um die Regelung des Trocknungsprozesses unter Energieeinsparaspekten in Abhängigkeit von der tatsächlichen Textilfeuchte vornehmen zu können, wurden am Trockner B20 weitere Anpassungen vorgenommen. Dies betraf insbesondere die Variation der Gebläsedrehzahl zur Steuerung des zugeführten Luftvolumenstroms sowie von Trommeldrehzahl und Drehrichtung. Durch Einbau jeweils eines Frequenzumrichters für die Antriebsmotoren von Trockner-trommel und Gebläse konnte der g-Faktor auf Werte von 0,4 - 0,8 und der Luftdurchsatz auf 890 bis 1.600 m³/h variabel eingestellt werden. Da die Brennersteuerung eine sicherheitsrelevante Schaltung darstellt, wurde diese nicht verändert. Um die Brennerleistung des Gasbrenners zu variieren bzw. den Anstieg der Heißlufttemperatur zu beeinflussen, wurde der Brenner getaktet.

Zur flexiblen Änderung der zu variierenden Prozessparameter des Trockners wurde eine SPS-Steuerung als Ersatz für die interne Trocknersteuerung eingesetzt (**Abbildung 41**).

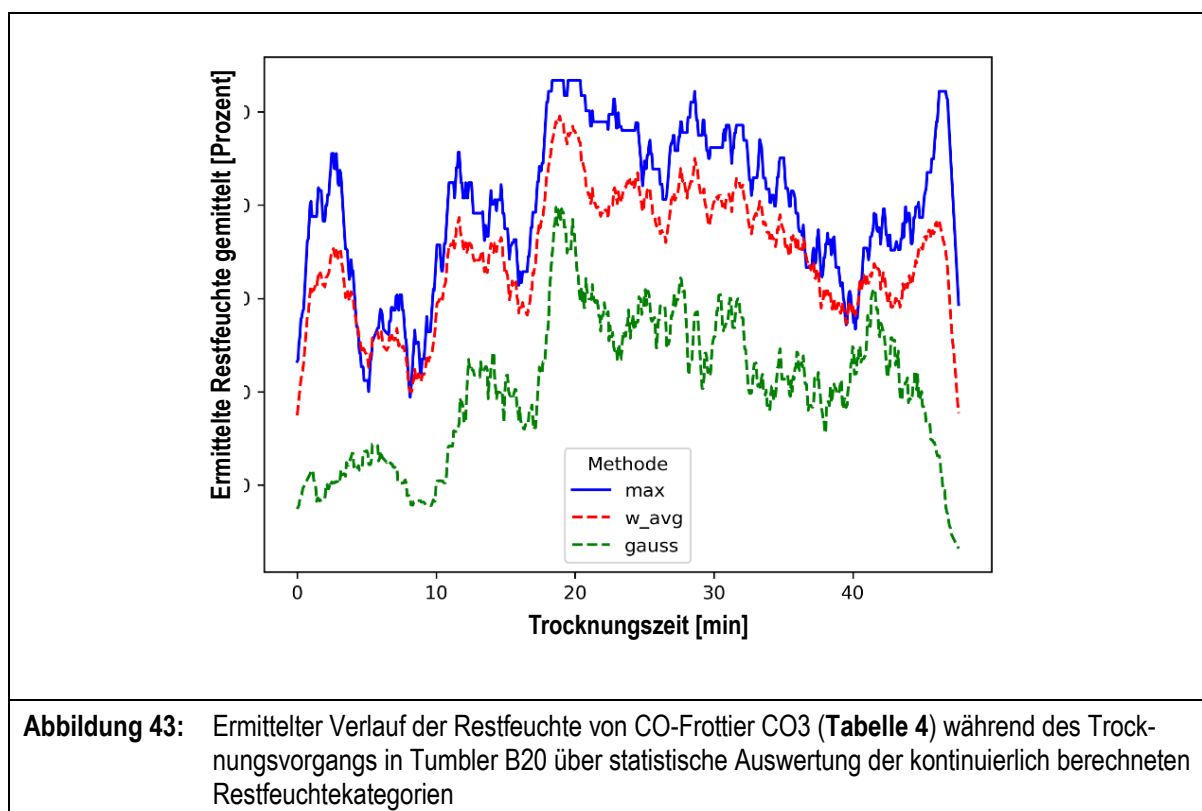
- **Erfassung der Textilfeuchte mittels Audioanalyse**

Zunächst wurde das künstliche neuronale Netzwerk (KNN) am Tumbler B20 (Kapitel 4.6) für den Einsatz auf der Coral Edge TPU optimiert, die nur ein spezifisches komprimiertes 8-Bit-Dateiformat akzeptiert. Das Trainieren erfolgte mit den Daten der Audioanalyse, die mit dem Wäscheposten aus CO-Frottier (CO3 nach **Tabelle 4**) mit der Restfeuchte 50 % beim Füllverhältnis 20 l/kg mit g-Faktor 0,8 ohne Reversierung bei der Soll-Ablufttemperatur 70 °C und dem Luftdurchsatz 1.250 m³/h erhalten wurden. Nach der Übertragung auf das Raspberry Pi 4 wurde das KNN-Modell in den Python-Code integriert.

Das KNN-Modell verarbeitete die aus den bereinigten Nutzsignalen erstellten Spektrogramme (Dauer: 2 s, Frequenzbereich: 0 - 2 kHz) und gab entsprechend Kapitel 5.5 kontinuierlich Restfeuchtekategorien (0 - 8, 8 - 15, 15 - 25, 25 - 35, 35 - 50, 50 - 100) aus. Dadurch konnte das Raspberry Pi 4 während des Trocknerbetriebs kontinuierlich die Restfeuchte des Wäschepostens ermitteln und die Daten zur späteren Analyse abspeichern.

5.6.2 Ergebnisse

In **Abbildung 43** ist der ermittelte Restfeuchteverlauf während der Trocknung anhand von drei verschiedenen statistischen Auswertemethoden der Audioanalyse dargestellt. Dazu wurde das Maximum (max), der gewichtete Durchschnitt (w_avg) und die Gauss'sche Methode (gauss) angewandt.

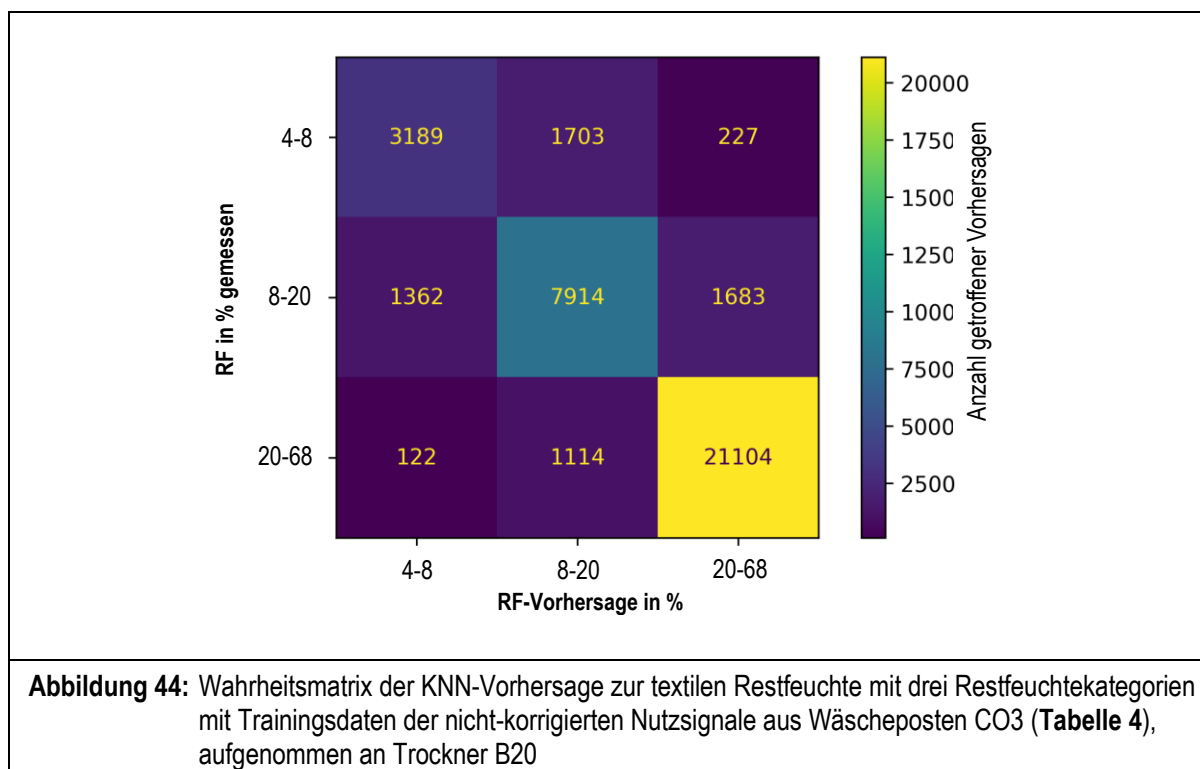


Erwartet wurde ein Kurvenverlauf, der bei einer Restfeuchte von 50 % beginnt und mit fortschreitender Trocknungsdauer kontinuierlich abnimmt. Dieser Verlauf wurde jedoch nicht beobachtet.

Hauptproblem bei der Vorhersage der Restfeuchte war die Audiokorrektur, speziell der Subtraktion von Störsignalen aus den gestörten Nutzsignalen. Dieses Problem entstand, weil die für das Training des KNN-Modells verwendeten fortgeschrittenen Korrekturmethode mit Matlab, der verwendeten Software für mathematische Problemlösungen, auf dem Raspberry Pi 4 nicht verfügbar waren. Alternative Softwarebibliotheken, die für die Restfeuchteerfassung während des Betriebs des Trockners genutzt wurden, konnten diese spezialisierten Audiokorrekturprozesse nicht adäquat unterstützen, was zu einer verminderten Genauigkeit führte. Zusätzlich beeinträchtigte die erforderliche Konversion von 32-Bit- auf 8-Bit-Werte, die von der Tensorrechenheit des Systems gefordert wurde, die Präzision der korrigierten Nutzsignale sowie der ausgegebenen Restfeuchtekategorien des KNN-Modells.

Aufgrund dieser Probleme wurde bei der Entwicklung des Modells zur Vorhersage der Restfeuchte unter praxisnahen Bedingungen in Tumbler B20 auf die Verwendung der Audiokorrektur verzichtet. Dies vereinfachte den Vorhersagealgorithmus im Python-Skript. Außerdem wurde die Anzahl der Feuchtekategorien von sechs auf drei reduziert, wobei die Textilfeuchten in die Kategorien 4-8, 8-20 und 20-68 unterteilt wurden. Die Bestimmung und Vorhersage von Restfeuchten über 20 % wurde als weniger kritisch eingestuft, da der Fokus vor allem auf der Ermittlung von Restfeuchten im für die Textilschädigung kritischen Bereich unter 20 % liegt. Die obigen Anpassungen verbessern die Genauigkeit des Modells in diesem Bereich. Für das Training wurde erneut der CO-Frottier Wäscheposten CO3 eingesetzt, während alle anderen Behandlungsparameter konstant gehalten wurden, um eine konsistente Basis für die Trainingsdaten zu gewährleisten.

In **Abbildung 44** sind die entsprechenden Wahrheitsmatrizen dargestellt, die die Vorhersagegenauigkeit des KNN für jede Restfeuchte-Kategorie gegenüber der gemessenen Textilfeuchte angeben.



Durch die Verringerung der Anzahl der Kategorien auf 3 ließ sich die Vorhersagegenauigkeit auf diese weitergefassten Kategorien verbessern. Im Test mit Daten, die zum Antrainieren genutzt wurden, konnte eine Vorhersagegenauigkeit von 83,8 % erreicht werden. Tests mit neuen Daten gaben eine Vorhersagegenauigkeit von 78,3 %. Dies ist eine erhebliche Verbesserung zu den Vorhersagegenauigkeiten aus dem vorigen Kapitel (**Abbildung 40**) mit 74,3 % für antrainierte Daten und 64,8 % für neue Daten.

Basierend auf dem neuen KI-Modell mit drei Restfeuchte-Kategorien wurden im Tumbler B20 drei wiederholte Trocknungsdurchgänge mit dem Wäscheposten aus CO-Frottier unter den gleichen Parametern wie während des Trainings des neuen KI-Modells und ohne Audiokorrektur durchgeführt.

In **Abbildung 45** sind die derart ermittelten Restfeuchteverläufe während der Trocknung anhand der statistischen Auswertemethode „gewichteter Durchschnitt“ dargestellt.

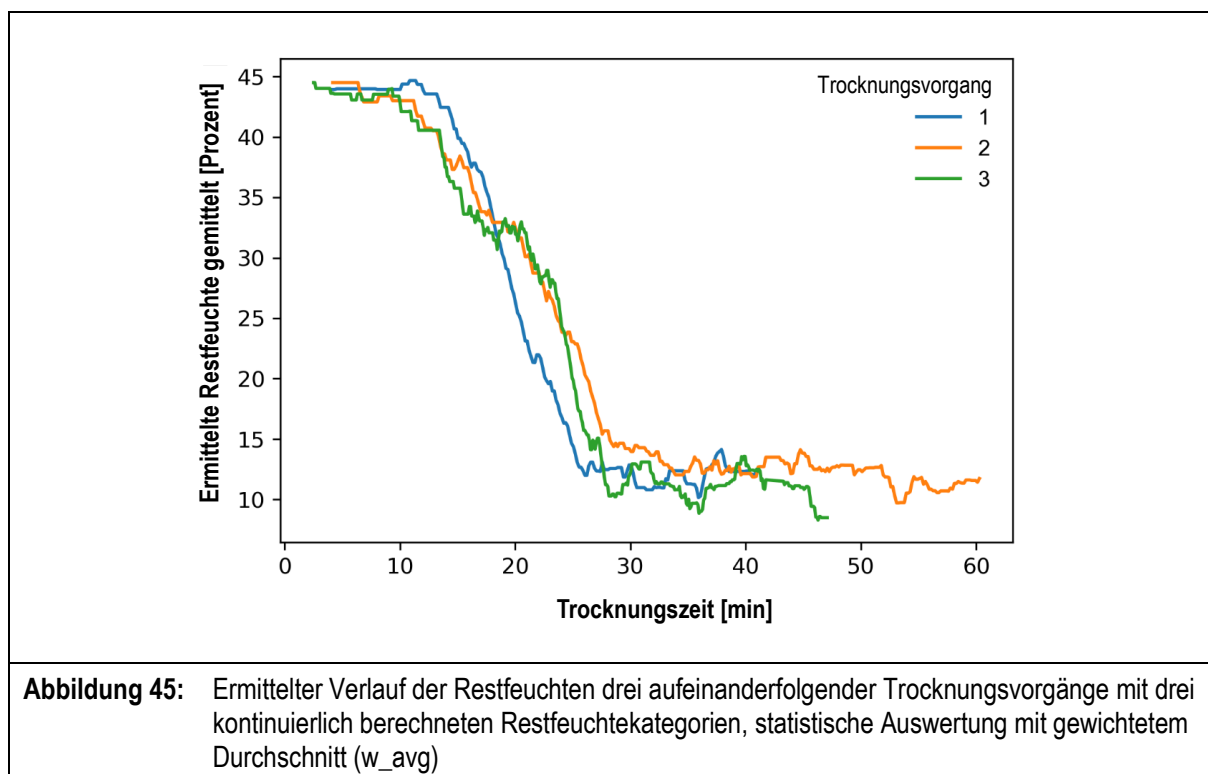
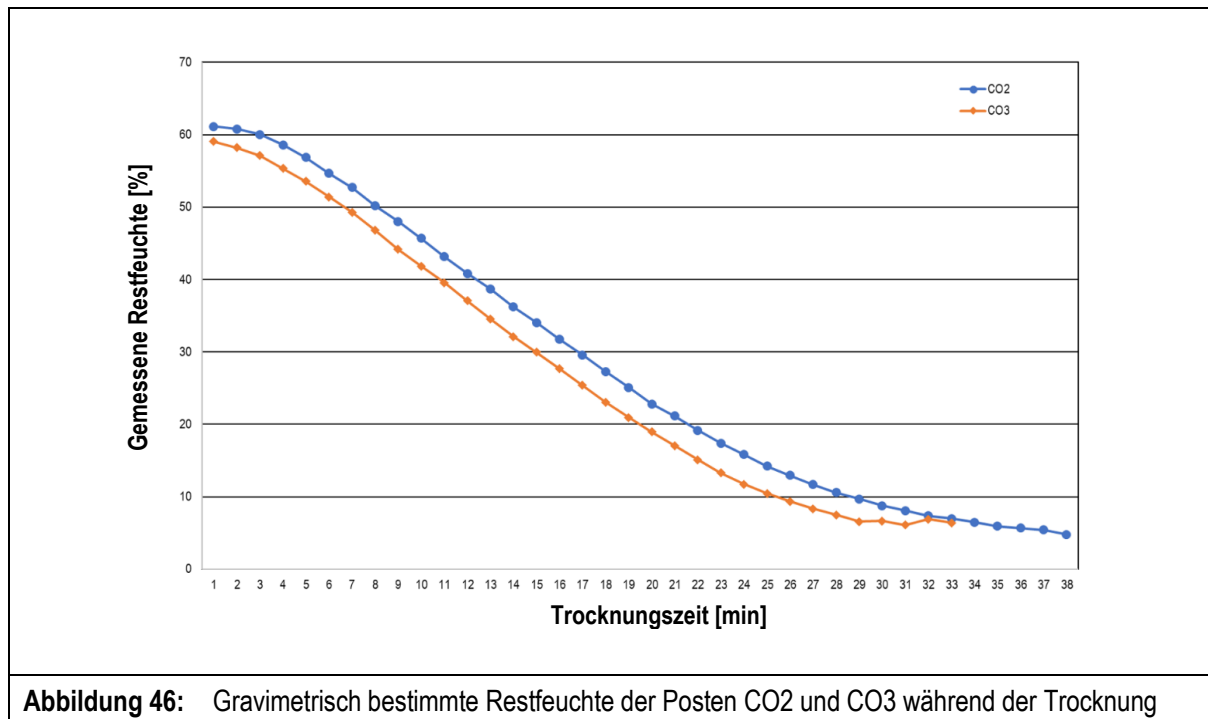


Abbildung 45: Ermittelter Verlauf der Restfeuchten drei aufeinanderfolgender Trocknungsvorgänge mit drei kontinuierlich berechneten Restfeuchtekategorien, statistische Auswertung mit gewichtetem Durchschnitt (w_{avg})

Die Ergebnisse zeigen den erwarteten Verlauf, bei dem die Restfeuchte mit fortschreitender Trocknungszeit kontinuierlich abnimmt. Darüber hinaus zeigen sie, dass eine reproduzierbare Vorhersage der Restfeuchte möglich ist, da etwa der gleiche Verlauf in drei wiederholten Versuchen beobachtet wurde.

In **Abbildung 46** wird die reale Restfeuchte gezeigt, die durch die kontinuierliche Gewichtsmessung der gesamten Trommel B20, einschließlich des Wäschepostens, bestimmt wurde.



Es ist zu erkennen, dass die durch das KNN vorhergesagten Kurvenverläufe der Restfeuchten in **Abbildung 45** weitgehend mit den tatsächlichen Verläufen in **Abbildung 46** übereinstimmen. Ab einer Trocknungszeit von über 30 min ist unter gleichen Trocknungsparametern keine weitere Veränderung der Restfeuchte zu sehen, was darauf hindeutet, dass der Trocknungsvorgang abgeschlossen ist.

Bei der Bewertung der vorhergesagten Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass die absoluten Werte der Restfeuchte durch Messungenauigkeiten des Audiosystems verfälscht werden. Dies gilt hier – aufgrund zu geringer Rechnerkapazität des eingesetzten Kleinrechners – insbesondere wegen des Verzichts auf eine Audiokorrektur während der Messungen am Tumbler unter praxisnahen Bedingungen. Folge ist eine fehlerhafte Erfassung der tatsächlichen Restfeuchten.

Als Nachweis der prinzipiellen Anwendbarkeit des entwickelten Audiosystems für die Praxis kann jedoch die Tatsache herangezogen werden, dass damit das Trocknungsende – der Textil-schädigende Trocknungsbereich, in dem keine signifikante Veränderung der Restfeuchte (Hinweis auf Übertrocknung) mehr feststellbar ist – erfasst werden kann. Dies kann für die Optimierung der Trocknungsparameter und die daraus resultierende Vermeidung von Übertrocknung genutzt werden, was sowohl die Energieeffizienz verbessert als auch die Lebensdauer der Textilien verlängert.

Die Genauigkeit und Präzision der mittels Kleinrechner vorhergesagten Restfeuchtwerte kann durch eine umfassende Optimierung des Python-Skriptes für die kontinuierliche Verarbeitung der Audiodaten während des bereits laufenden Trocknungsprozesses, ähnlich den auf dem PC verwendeten Bibliotheken, erheblich verbessert werden. Hierbei kann auch die Audiokorrektur durch Subtraktion des Störsignals vom gestörten Nutzsignal berücksichtigt werden.

Aufgrund der begrenzten Laufzeit des Projekts konnten jedoch keine weiteren Untersuchungen zur Optimierung der KI-basierten Audioanalyse durchgeführt werden, wobei die KI-Vorhersage unter Praxisbedingungen grundsätzlich funktioniert.

5.6.3 Zusammenfassung

Die KI-basierte Audioanalyse wurde unter praxisnahen Bedingungen im Technikum des wfk-Instituts anhand eines gewerblichen Tumblers erprobt. Ein integriertes System, bestehend aus einem Raspberry Pi 4 mit einer Coral Edge TPU und angeschlossenen Körperschallmikrofonen, ermöglichte es, Audiodaten während der Trocknung zu erfassen und zu verarbeiten. Aufgrund der geringeren Rechnerkapazität wurde die Aufzeichnung der Audiodaten ohne Audiokorrektur vorgenommen, wobei das gestörte Nutzsignal für die kontinuierliche Ermittlung der Restfeuchte verwendet wurde. Dabei wurde die Restfeuchte über das KNN-Modell in drei Kategorien klassifiziert und die Vorhersagegenauigkeit in verschiedenen Feuchtebereichen analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass diese vereinfachte KI-basierte Vorhersage der Restfeuchte unter diesen Bedingungen grundsätzlich funktioniert, jedoch durch die fehlende Audiokorrektur und die Datenkompression auf 8-Bit Einschränkungen in der Genauigkeit aufwies.

5.7 Konzepte zur Integration der KI-Audioanalyse in gewerbliche Tumbler

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden Konzepte zur Integration des Audiosystems (Mikrofone und Aufnahmeeinheit) und Implementierung der KI-basierten Audioanalyse in gewerbliche Tumbler sowie zur Adaption an die Kontrolleinheit erstellt, wobei sowohl die Integration bei der Produktion neuer Maschinen als auch die Nachrüstung vorhandener Maschinen (modulare Upgrades) berücksichtigt wurden.

Wie in Kapitel 5.8 beschrieben, können bei Erreichen der gewünschten Restfeuchtwerte (gemessen über die Mikrofone, analysiert und ausgewertet über Kleinrechner und KNN) die oben angegebenen Prozessparameter geregelt oder ein Ausgang der USB-Schnittstellenkarte so geschaltet werden, dass die Trocknung abgebrochen wird. Dies lässt sich prinzipiell bei den meisten am Markt befindlichen Trocknern umsetzen.

Dabei können die Mikrofone, wie in Kapitel 4.5 und 4.7 erläutert, ohne großen Aufwand in gewerbliche Tumbler integriert werden. Zur Aufnahme der Nutzsignale werden Kontaktmikrofone mit flacher Bauweise verwendet, sodass diese am Trommelmantel bzw. bei perforierter Trommel in Trommelnähe angebracht werden können. Die Kontaktmikrofone müssen im Frequenzbereich zwischen 70 und 3.000 Hz ein Maximum in der Aufnahme-Empfindlichkeit aufweisen, da in diesem Bereich die Lautstärke, also Amplituden der Nutz- und Störsignale, am höchsten sind. Des Weiteren müssen die Kontaktmikrofone in direktem Kontakt an die zu untersuchende und zugängliche Oberfläche angebracht werden, um so eine möglichst hohe Aufnahmefähigkeit der Signale durch die Mikrofone zu gewährleisten. Die Störsignale können ebenfalls über die oben genannten Körperschallmikrofone durch Anbringung am Maschinengehäuse aufgenommen werden. Zusätzlich muss ein Luftschallmikrofon verwendet werden, welches die Betriebsgeräusche, die über Luftschall übertragen werden (z. B. Umgebungsgeräusche, Motorgeräusche) erfasst. Das Luftschallmikrofon kann den Aufnahmebereich 50 - 20.000 Hz abdecken, sollte jedoch wie bei den Kontaktmikrofonen ein Maximum zwischen 70 und 3.000 Hz aufweisen.

Für die Umsetzung von Kommunikation und Datenauswertung kann ein gekapselter und aktiv gekühlter Kleinrechner, wie z. B. ein Raspberry Pi (erweitert um eine Tensorrecheneinheit) eingesetzt werden. Dieser kann zudem mit einem berührungssensitiven Bildschirm zur einfacheren Bedienung erweitert werden. Die Audiodaten können über AUX-Anschluss oder USB-Anschluss an den Kleinrechner angeschlossen werden. Die Daten werden auf dem Rechner vom KNN analysiert und können im Speicher des Kleinrechners, z. B. auf SD-Karten mit beliebiger Speicherkapazität, gespeichert werden.

Je nach eingesetztem Trockner sind die meisten der Regelgrößen in der internen Trocknerregelung bereits implementiert. Mit größerem konstruktivem Aufwand kann bei älteren Trocknern beispielsweise die Regelung des Luftdurchsatzes bzw. der Gebläsedrehzahl und der Trommeldrehzahl zur Anpassung der Wäschebewegung realisiert werden.

Einfacher umzusetzen ist dagegen die Adaptierung des entwickelten KI-basierten Audiosystems in praxisübliche gewerbliche Trockner, was die Prozesssteuerung über KI-basierte Bestimmung der Textilfeuchte durch Messung der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens mit dem Audiosystem bezüglich der Prozessgrößen Heißlufttemperatur und Dauer der einzelnen Trocknungsphasen ermöglicht. Dies erfordert lediglich einen analogen oder digitalen Eingang an der Trocknersteuerung, der über die herstellerseitig bereits vorhandene Steuerung

überwacht wird. Dies können beispielsweise Eingänge zur Funktions- oder Fehlerüberwachung sein, die ansonsten z. B. den Trockner bei Öffnen der Tür abschalten. Durch Einsatz einer sehr flexibel einsetzbaren analog/digitalen USB-Schnittstellenkarte sind außerdem weitere Anpassungen an die Erfordernisse des jeweiligen Steuereingangs an der Trocknersteuerung einfach umzusetzen.

Um Maschinenherstellern eine Anpassung des KNN im Rahmen der Produktentwicklung an spezielle Maschinencharakteristika oder der Maschinenwartung zu ermöglichen, wurden unter deren Mitwirkung die in Kapitel 7 aufgeführten Empfehlungen erarbeitet.

5.8 Gegenüberstellung von Zielen und erreichten Ergebnissen

5.8.1 Verwendung der Zuwendung

Die Durchführung der beschriebenen Untersuchungen erfolgte im Berichtszeitraum durch wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplanes) im Umfang von insgesamt 21,35 Personenmonaten.

Der beantragte Versuchsstand für Trocknertrommeln (Einzelansatz B des Finanzierungsplanes; Solvution GmbH; 14.180,04 €) wurde beschafft und für Untersuchungen zum Einfluss von Trommeleigenschaften auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens eingesetzt.

5.8.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Ausgaben während der Projektlaufzeit waren für die Durchführung der geleisteten Arbeit notwendig und angemessen. Die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten stellen die Umsetzung der im Forschungsantrag vorgesehenen Arbeitsschritte dar und waren für die Erreichung des Forschungsziels wichtig. Die geleisteten Arbeiten waren zur Bearbeitung der genannten Arbeitspakete erforderlich.

Nr.	Ziel der Arbeitsschritte	Erreichte Ergebnisse
1	Untersuchungen zum Einfluss von Maschinencharakteristika bzw. Trommeleigenschaften auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens	Nach Ermittlung geeigneter Positionen für Körperschallmikrofone (Nutz- und Störsignal) und Luftschallmikrofone (Störsignal) konnte am entwickelten Versuchsstand unter Variation von Textilfeuchte, Füllverhältnis und g-Faktor der Einfluss von Maschinencharakteristika bzw. Trommeleigenschaften (fünf Trommeln mit unterschiedlichem Trommelvolumen, Rippenanzahl und Perforation) auf die Abroll- und Fallgeräusche eines Wäschepostens aufgezeigt werden. Danach ist eine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Textilfeuchten unter Variation der Trommelcharakteristika möglich. An den aufgenommenen Spektrogrammen konnte beispielsweise bei hohen Frequenzen eine Zunahme der Amplitude mit geringerer Textilfeuchte gemessen werden. Die korrigierten Nutzsignale konnten zum Antrainieren des KNN genutzt werden. → Erfolgreich durchgeführt
2	Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler	Zur Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler konnten die optimalen Positionen für die Mikrofone zur Aufnahme der Nutz- und Störsignale ermittelt werden. Zur Aufnahme der Nutzsignale wurden Körperschallmikrofone verwendet. Die Aufnahme der Störsignale erfolgte sowohl über Körperschall als auch über Luftschall, wobei das Luftschallmikrofon in der Nähe des Antriebs positioniert wurde und ein Körperschallmikrofon am Maschinengehäuse angebracht wurde. Damit wurde ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (hoher Anteil an Nutzsignalen, geringer Anteil an Störsignalen) erreicht. → Erfolgreich durchgeführt
3	Analyse der Abroll- und Fallgeräusche abhängig von den Prozessparametern	Bezüglich des Einflusses von Prozessparametern auf die Abroll- und Fallgeräusche von Wäschepostens (korrigierte Nutzsignale) in einem Tumbler zeigte sich, dass reduzierte Restfeuchte die korrigierten Nutzsignale beeinflusst: die Amplitude des Spektrogramms verringert über alle Frequenzen aufgrund der Masseabnahme des Wäschepostens das Signal und trockene Wäscheteile fallen vermehrt einzeln, sodass die Stärke des Aufpralls abnimmt. Die Prozessparameter Füllverhältnis und g-Faktor zeigten keinen signifikanten Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Sowohl bei niedrigster Ablufttemperatur (20 °C) als auch der Luftdurchsatzrate (600 m ³ /h) waren die Amplituden der Störsignale, bedingt durch leisere Betriebsgeräusche, niedriger. → Erfolgreich durchgeführt

4	Analyse der Abroll- und Fallgeräusche im Tumbler abhängig von textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile im Wäscheposten	<p>Der Einfluss der textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile auf die korrigierten Nutzsignale im Tumbler ist vor allem signifikant von der Textilfeuchte abhängig. Bei geringer Textilfeuchte unter 10 % steigt der Einfluss des Flächengewichts, da die Teile vermehrt einzeln fallen. Das Fasersubstrat und die Textilabmessungen haben bei gleicher Textilfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Die korrigierten Nutzsignale wurden mittels diskreter Fourier-Transformation in diskrete Frequenzen mit dazugehörigen, zeitabhängigen Amplituden umgewandelt und die aufgenommenen Audiodaten nach Textilfeuchten sortiert in die für die Entwicklung und das Anlernen des künstlichen neuronalen Netzwerks (KNN) erstellte Datenbank eingepflegt.</p> <p>→ Erfolgreich durchgeführt</p>
5	Entwicklung eines KNN zur Audioanalyse der textilen Restfeuchte	<p>Es wurde ein Faltungsnetzwerk mit zwei neuronalen Schichten für das KNN zur Bestimmung der textilen Restfeuchte entwickelt. Dies beinhaltet die Anwendung eines Kantenfilters auf die zeitabhängigen Amplituden- und Frequenzdaten (Lautstärke und Tonhöhe) der umgewandelten korrigierten Nutzsignale und die Herunterskalierung der Eingangsdaten auf eindimensionale Daten. Das KNN wurde mit Trainingsdatensätzen sowohl aus korrigierten Nutzsignalen als auch separat aus Aufnahmen ohne Audiokorrektur) antrainiert. Anhand des Fehlers zwischen Ausgabewert (IST) des KNN und bekanntem Ergebnis (SOLL) wurde das neuronale Netzwerk laufend angepasst (Überwachtes Lernen). Die Anzahl der jeweiligen Schichten und die Anzahl der Neuronen in ihnen wurden als Hyperparameter ausgewählt und optimiert. Es konnte ein Modell erstellt werden, das eine gute Vorhersagbarkeit für die Restfeuchte bietet und welches bei Übertragung auf neue Werte wenig an Vorhersagegenauigkeit einbüßt.</p> <p>→ Erfolgreich durchgeführt</p>
6	Erprobung der KI-basierten Audioanalyse unter praxisnahen Bedingungen	<p>Die prinzipielle Eignung der entwickelten KI-basierten Audioanalyse zur kontinuierlichen Erfassung der Restfeuchte an einem gewerblichen Tumbler unter praxisnahen Bedingungen konnte nachgewiesen werden. Die Audiodaten wurden mit einem integrierten System aus einem Raspberry Pi 4 mit einer Coral Edge TPU und angeschlossenen Körperschallmikrofonen während der Trocknung erfasst. Die dabei angewandte, vereinfachte KI-basierte Vorhersage der Restfeuchte ohne Audiokorrektur mit Klassifizierung in drei Restfeuchtekategorien über das KNN-Modell funktioniert grundsätzlich, wies jedoch durch die fehlende Audiokorrektur und die Datenkompression auf 8-Bit Einschränkungen in der Genauigkeit auf.</p> <p>→ Erfolgreich durchgeführt</p>
7	Konzepte zur Integration der KI-Audioanalyse in gewerbliche Tumbler	<p>Es wurden bautechnische Maßnahmen zur Integration von Kontaktmikrofonen und Luftschallmikrofonen in typische Trocknerbauarten entwickelt und Empfehlungen zur Anwendung des entwickelten Audiosystems mit zugehöriger Hard- und Software zur Anwendung der KI-basierten Audioanalyse zum feuchtigkeitsgeregelten Trocknungsprozesses erarbeitet. Damit ist eine Regelung ausgewählter Trocknungsparameter auch unter den in Wäschereien herrschenden klimatischen und akustischen Bedingungen möglich. Mit einem leistungsstarken Rechner sind Kommunikation und Datenauswertung möglich.</p> <p>→ Erfolgreich durchgeführt</p>
8	Dokumentation und Berichterstattung	<p>Die Ergebnisse wurden kontinuierlich dokumentiert.</p> <p>→ Erfolgreich durchgeführt</p>

6 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

6.1 Spezifische Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Vorhabens

Transfermaßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
wfk-Homepage	Schnelle Verbreitung des neuen Forschungsthemas	Vorstellung des Projektes	Mai 2022
Publikation in „wfk-news“	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung ausgewählter Ergebnisse	April 2023 April 2024
wfk-Activity Report	Ergebnistransfer an textile Dienstleister	Zusammenfassende Darstellung als Kurzfassung und Verbreitung	April 2023
Sitzung wissenschaftlicher Beirat der Forschungseinrichtung	Transfer in die Branche der textilen Dienstleister	Vorstellung erzielter Ergebnisse, Diskussion des weiteren Vorgehens	22. Juni 2022 22. Juni 2023 27. Juni 2024
Zeitschrift „Wäscherei + Reinigungspraxis“	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung ausgewählter Ergebnisse	April 2023
Zeitschrift „RW Textilservice“	Transfer in die Wirtschaft	Vorstellung ausgewählter Ergebnisse	März 2023
Projektbegleitender Ausschuss (PA)	Die Ergebnisse werden kontinuierlich im PA diskutiert.	Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten Vorstellung erzielter Ergebnisse, Diskussion des weiteren Vorgehens Abschlusspräsentation und Diskussion	08.02.2023 16.05.2023 29.11.2023 11.06.2024

6.2 Spezifische Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Transfermaßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Datum/Zeitraum
wfk-Homepage	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Kurzfassung der Ergebnisse	3. Quartal 2024
Publikation in „wfk-news“	Ergebnistransfer an textile Dienstleister	Zusammenfassung der Ergebnisse	4. Quartal 2024
Texcare 2024	Ergebnistransfer an textile Dienstleister	Zusammenfassung der Ergebnisse	4. Quartal 2024
wfk-Activity Report	Ergebnistransfer an textile Dienstleister	Zusammenfassung der Ergebnisse	2. Quartal 2025
Zeitschrift „Wäscherei + Reinigungspraxis“	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse	1. Quartal 2025

Die Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts wird als gut eingeschätzt. Durch die genannten Transfermaßnahmen kommt es zu einer Verbreitung der erzielten Projektergebnisse bei Herstellern von Tumbler- und bei textilen Dienstleistern. Hersteller von Wäschereimaschinen können hierdurch die Projektergebnisse aufgreifen und im Rahmen der Produktentwicklung präzisere Trocknungsprozesssteuerungen auf Basis der Erfassung der Wäscheposten-Restfeuchte entwickeln. Auch bei den textilen Dienstleistern im Bereich Leasingtextilien wird eine hohe Nachfrage nach derartigen Temperaturregelungen generiert, da durch die Erfassung der Restfeuchte des Wäschepostens die Erstellung und Archivierung von in-situ Temperatur-Zeit-Profilen für jeden Wäscheposten ermöglicht wird. Diese können im Zuge innerbetrieblicher Eigenkontrollen zur Dokumentation des korrekten Prozessablaufs im Rahmen der Qualitätskontrolle verwendet werden. Des Weiteren profitieren textile Dienstleister, insbesondere Anbieter von Leasingtextilien, von der textilschonenderen und energiesparenden Trocknung.

7 Zusammenfassende Diskussion und Folgerungen für die Praxis

Nach der mechanischen Entwässerung erfolgt die Entfernung des Restwassers bei der Textilaufbereitung durch Trocknung in Trommeltrocknern mittels Konvektionswärme. Dieser energie- und kostenintensive Prozess verursacht etwa 15 bis 40 % des Wärmeenergieeinsatzes bzw. etwa 90 % des Gesamtenergieeinsatzes einer Wäscherei. Der Trocknungsenergiebedarf wird neben der aus den Textilien entfernten Wassermenge durch die Trocknungsprozessführung bestimmt.

Bei gewerblichen Trocknern ab etwa 40 kg wird die Textilfeuchte meist über Infrarot-Messungen der textilen Oberflächentemperatur erfasst, wobei aus der so bestimmten Textilfeuchte – abhängig von Beladungsart und -menge – große Unterschiede in der Textilfeuchte des Wäschepostens resultieren. Außerdem besteht keine ausreichende Korrelation der Oberflächentemperatur mit der Textilrestfeuchte. Ältere Trockner arbeiten meist mit zeitgesteuerter Trocknung über vorgegebene Programme, in denen sich die Prozessparameter Heißlufttemperatur und Dauer nach den Textileigenschaften (Feuchtgehalte, Temperaturbeständigkeit) richten, was die Gefahr der Textilschädigung (Übertrocknung, Stockfleckenbildung) birgt. Eine Senkung der Heißlufttemperatur bei gleichzeitig verlängerter Trocknungsdauer ist aufgrund des reduzierten Maschinendurchsatzes oder des Einsatzes mehrerer Trockner unwirtschaftlich.

Eine kontinuierliche Erfassung der tatsächlichen Feuchte des Wäschepostens in Kombination mit einer Regelung des Trocknungsprozesses über die momentane Textilfeuchte würde den Wärmeenergiebedarf reduzieren und eine textilschonende Trocknung ermöglichen. Dies sind das Vermeiden von Stockfleckenbildung aufgrund unzureichender Trocknung während der üblichen Wäschelagerung in verpacktem Zustand sowie Vergilbung, verminderte Festigkeit baumwollhaltiger Textilien und Anschmelzen von Faserspitzen synthese-faserhaltiger Mikrofasertextilien durch Überhitzung. Derartige Textilschäden verringern die Lebensdauer der Textilien, was insbesondere bei Leasingbetrieben die Wirtschaftlichkeit verschlechtert.

In diesem Forschungsprojekt sollte daher erstmalig eine KI-basierte Methode zur kontinuierlichen in-situ Messung der Textilfeuchte eines Wäschepostens während der Trocknung über die Erfassung der Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignale) des Wäschepostens unter Berücksichtigung der Umgebungsgeräusche (Störgeräusche) mit direkter Korrelation zur Textilfeuchte im Tumbler entwickelt werden.

Um dies zu erreichen, wurde zunächst das KNN (Künstliches Neuronales Netzwerk) mit Abroll- und Fallgeräuschen des Wäschepostens in unterschiedlichen Trommelvolumina mit dem Funktionsmuster des entwickelten Audioaufnahmesystems antrainiert.

Dazu wurden zunächst die Positionen für die Mikrofone ermittelt, an denen die Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignale) aus den Audiodaten mithilfe der Audiokorrektur extrahiert werden konnten (korrigiertes Nutzsignal). Als Referenzwert für die Nutzsignale wurde eine manuelle Trommeldrehung ohne Störsignale genommen. Die so mit den Körperschallmikrofonen am Trommelmantel erfassten Nutzsignale wurden für die Bestimmung der Positionen für die Mikrofone zur Erfassung der Störsignale verwendet. Das korrigierte Nutzsignal wurde ermittelt, indem das Störsignal vom gestörten Nutzsignal subtrahiert wurde, sodass anschließend das korrigierte Nutzsignal vor allem die Geräusche der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens enthielt. Dabei wurden zuvor die Lautstärke sowohl vom gestörten Nutzsignal als auch vom Störsignal angeglichen.

Dabei zeigten sich für Textilfeuchten zwischen 50 und 5 % unterschiedlich hohe Amplitudenwerte des korrigierten Nutzsignals sowohl in Hinblick auf tiefe Frequenzen (< 500 Hz) als auch bei hohen Frequenzen (> 500 Hz). Die Menge an stillen (< -100 dB) Bereichen nimmt ab, da die Wäscheteile im Posten mit zunehmender Trocknung als Einzelteile fallen, d. h. mit geringerer Masse und mit höherer Frequenz. Die visuellen Unterschiede ließen bereits darauf schließen, ob das KNN anhand von Mustererkennung in den Audiodaten die momentane Textilfeuchte des Postens vorhersagen könnte.

Das Füllverhältnis hat keinen signifikanten Einfluss auf Frequenz und Amplitude des korrigierten Nutzsignals, während der g-Faktor durch Erhöhung der Trommeldrehzahl eine Zunahme der Frequenz des Wäscheaufpralls zur Folge hatte, was sich in den Spektrogrammen als Erhöhung der Anzahl vertikaler Linien (hohe Amplitude im gesamten Frequenzbereich) äußerte.

Trommelcharakteristika, wie Trommelvolumen, Rippenanzahl und Perforation, äußerten sich im korrigierten Nutzsignal vor allem dadurch, dass in Trommeln mit kleinen Volumina Nutzsignale mit hohen Amplituden bei hohen Frequenzen erzeugt werden. Des Weiteren war die Aufprallgeschwindigkeit der Wäscheteile auf den Trommelmantel bei größerem Durchmesser erwartungsgemäß höher als bei kleinerem Durchmesser, sodass das Nutzsignal, vor allem bei Frequenzen unter 500 Hz höhere Amplituden enthielt.

Die Unterscheidung zwischen den verschiedenen Textilfeuchten war somit für die untersuchten Trommelcharakteristika möglich, die KI-basierte Audioanalyse kann in Trommeln verschiedener Konstruktion und Volumen angewendet werden. Visuell waren die Unterschiede in den Spektrogrammen erkennbar, z. B. Zunahme der Amplitude bei hohen Frequenzen mit geringerer Textilfeuchte.

Zur Integration der Mikrofone in gewerbliche Tumbler konnten – abhängig von Typ und Konstruktion des Tumblers sowie der Mikrofonart – die optimalen Positionen für die Mikrofone zur Aufnahme der Nutz- und Störsignale ermittelt werden. Dabei wurden Körperschallmikrofone zur Aufnahme der Nutzsignale verwendet, die zudem idealerweise mittig (relativ zur Trommeltiefe) am Trommelmantel bzw. bei perforiertem Mantel in dessen Nähe angebracht wurden. Die Aufnahme der Störsignale geschah sowohl über Körperschall als auch über Luftschall, wobei das Luftschallmikrofon mit Nierencharakteristik in geringem Abstand (3 cm) zum Antrieb positioniert wurde und das zweite Körperschallmikrofon am Maschinengehäuse angebracht wurde, um Störsignale über Vibrationen aufzunehmen.

Die so ermittelten Positionen lieferten ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Verhältnis der mittleren Nutzsignalamplitude und der Standardabweichung des Störsignal-Rauschens) um somit eine effektive Audiokorrektur zu ermöglichen, bei der das sich ergebende korrigierte Nutzsignal einen hohen Anteil an Nutzsignalen und geringen bis keinen Anteil an Störsignalen enthielt.

Bezüglich des Einflusses von Prozessparametern auf die Abroll- und Fallgeräusche von Wäscheposten (korrigierte Nutzsignale) in einem gewerblichen Tumbler zeigte sich, dass – wie am Versuchsstand – Veränderungen der korrigierten Nutzsignale mit Abnahme der Restfeuchte auftreten. Zum einen verringert sich die Amplitude über alle Frequenzen aufgrund der Masseabnahme des Wäschepostens. Zum anderen fallen trockene Wäscheteile vermehrt einzeln, sodass die Stärke des Aufpralls abnimmt.

Die Prozessparameter Luftdurchsatzrate, Füllverhältnis, Ablufttemperatur und g-Faktor hatten in diesem Tumbler bei visueller Bewertung der aufgenommenen Spektrogramme geringen bis

keinen Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Die Unterschiede lagen im Bereich der Messunsicherheit.

Der Einfluss der textilspezifischen Eigenschaften der Wäscheteile (Teileanzahl, Abmessungen und Flächengewicht) auf die korrigierten Nutzsignale im Tumbler war vor allem signifikant von der Textilfeuchte abhängig. Bei geringer Textilfeuchte (< 10 %, bezogen auf bone-dry) nahm der Einfluss von Flächengewicht zu, da die Teile vermehrt einzeln fielen. Das Fasersubstrat und die Textilabmessungen hatten bei gleicher Textilfeuchte keinen signifikanten Einfluss auf die korrigierten Nutzsignale. Gleiches gilt für den Einfluss des Textilflächengewichts.

Auf Basis der aus den vorhergehenden Arbeitsschritten gewonnenen Erkenntnisse und der gesammelten Audiodaten wurde eine geeignete Netzwerktopologie (Anzahl von Eingangsdaten, Neuronen, Gewichtungen, Aktivierungsfunktionen) für die Audioanalyse entwickelt.

Dazu wurde ein KNN entwickelt, bestehend aus zwei Faltungsschichten, welche die eingehenden Spektren der korrigierten Nutzsignale entlang des gesamten Frequenz- und Zeitbereichs filtern. Anschließend werden die resultierenden Daten in einen eindimensionalen Vektor umgewandelt und durch fünf vollständig verknüpfte Schichten bis zu einem Restfeuchtwert oder einer Zahl an Restfeuchte Kategorien weiterverarbeitet. Das KNN wurde mit Trainingsdatensätzen sowohl aus korrigierten Nutzsignalen als auch separat aus Aufnahmen ohne Audiokorrektur antrainiert. Anhand des Fehlers zwischen Ausgabewert (IST) des KNN und bekanntem Ergebnis (SOLL) wurde das neuronale Netzwerk laufend angepasst (Überwachtes Lernen). Mit den Testdatensätzen lieferte das antrainierte KNN die Vorhersagen der momentanen textilen Restfeuchte.

Durch Hinzunahme von Datensätzen, die an den mit Heißluft betriebenen gewerblichen Trockner generiert wurden, verloren die KNN-Modelle allerdings an Vorhersagegenauigkeit zur Bestimmung der exakten Restfeuchte. Um diese Ungenauigkeit zu minimieren, wurde die während der Trocknung gemessene Restfeuchte in unterschiedlich große Feuchtebereiche bzw. Kategorien unterteilt. Gute Ergebnisse konnten mit der Unterteilung in sechs Kategorien erzielt werden, wobei die Textilfeuchten in die Kategorien 4-8, 8-15, 15-25, 25-35, 35-50 und 50-68 % unterteilt wurden.

Es konnte so ein Modell erstellt werden, das eine gute Vorhersagbarkeit (74,3 %) für die Restfeuchte bietet und bei Übertragung auf neue Werte weniger als 10 % an Vorhersagegenauigkeit einbüßt.

Die KI-basierte Audioanalyse wurde abschließend unter praxisnahen Bedingungen im Technikum des wfk-Instituts an einem gewerblichen Tumbler erprobt. Ein integriertes System, bestehend aus einem Raspberry Pi 4 mit einer Coral Edge TPU und angeschlossenen Körperschallmikrofonen, ermöglichte es, die Audiodaten während der Trocknung zu erfassen und zu verarbeiten. Aufgrund zu geringer Rechnerkapazität wurde die Aufzeichnung der Audiodaten ohne Audiokorrektur vorgenommen, wobei das gestörte Nutzsignal für die kontinuierliche Ermittlung der Restfeuchte verwendet wurde. Dabei wurde die Restfeuchte über das KNN-Modell in drei Kategorien klassifiziert und die Vorhersagegenauigkeit in verschiedenen Feuchtebereichen analysiert. Die Ergebnisse zeigten, dass diese vereinfachte KI-basierte Vorhersage der Restfeuchte unter diesen Bedingungen grundsätzlich funktioniert, jedoch durch die fehlende Audiokorrektur und die Datenkompression auf 8-Bit Einschränkungen in der Genauigkeit aufwies.

Im Test mit Daten, die zum Antrainieren genutzt wurden, konnte eine Vorhersagegenauigkeit von 83,8% vor der Datenkompression erreicht werden. Tests mit neuen Daten gaben eine Vorhersagegenauigkeit von 78,3%. Dies ist eine erhebliche Verbesserung zu den Vorhersagegenauigkeiten aus dem vorigen Kapitel (Abbildung 40) mit 74,3% für antrainierte Daten und 64,8% für neue Daten.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden Konzepte zur Integration des Audiosystems (Mikrofone und Aufnahmeeinheit) und Implementierung der KI-basierten Audioanalyse in gewerbliche Tumbler sowie zur Adaption an die Kontrolleinheit erstellt, wobei sowohl die Integration bei der Produktion neuer Maschinen als auch die Nachrüstung vorhandener Maschinen (modulare Upgrades) berücksichtigt wurden.

Durch die angeführten bautechnischen Maßnahmen und die nachfolgend angeführten Empfehlungen zur Anwendung des entwickelten Audiosystems mit zugehöriger Hard- und Software ist eine Umsetzung der KI-basierten Audioanalyse zum feuchtigkeitsgeregelten Trocknungsprozess problemlos möglich, wobei diese auch unter den in Wäschereien herrschenden klimatischen und akustischen Bedingungen zuverlässig funktioniert.

Da das KI-basierte Audiosystem auch für ein Feedbacksystem zur kontinuierlichen Anpassung und Überwachung der Maschine (z. B. zur Berücksichtigung verschleißbedingter Änderungen der Audiosignale) geeignet ist, können weitere Mikrofone nahe an schnell verschleißenden Bauteilen installiert werden oder an Stellen zur Zustandsüberwachung rotierender Maschinenteile (z. B. in Motoren, Kugellagern), die zu überwachen sind. Die aufgenommenen Audiodaten können dann genutzt werden, um akustische Veränderungen im Tumbler, z. B. Vibrationen des Maschinengehäuses und der Trommel, zu erkennen und für eine frühzeitige Behebung eines Fehlers bzw. Reparatur oder Austausch eines Maschinenbauteils, zu sorgen. Ein solches Audio-Feedbacksystem wäre ohne oder nur mit wenigen Erweiterungen in den in diesem Projekt vorgestellten Aufbau zu implementieren.

Zur Anwendung des entwickelten Audiosystems mit zugehöriger Hard- und Software gelten folgende Empfehlungen:

- Zum **Erhalt geeigneter Trainings- und Testdatensätze** werden Informationen zur optimalen Zusammenstellung von Wäscheposten benötigt. Für den Anlernprozess sollten Wäscheposten mit gleichem Flächengewicht, Abmessungen und Fasersubstrat genutzt werden, die auch in den zu regelnden Trocknungsprozessen zum Einsatz kommen. Ein Anlernen mit Posten gemischter Zusammensetzung, d. h. unterschiedlicher Fasersubstrate etc., ist nicht zu empfehlen, da dies energetisch und in Hinblick auf Textilschädigung ungünstig ist. Sollte das KI-Audioanalysesystem in einem Tumbler anderer Bauart, Konstruktion etc. eingesetzt werden, sollte idealerweise das KNN zuvor erneut für diesen neuen Tumbler angelernt werden, da die Parameter für das künstliche Netzwerk oder für den Audiokorrektur-Algorithmus für eine verlässliche Restfeuchte-Vorhersage angepasst werden müssen.
- Die optimalen Positionen für die Mikrofone zur Aufnahme der Nutz- und Störsignale sind abhängig von Typ und Konstruktion des Tumblers sowie der Mikrofonart.
- Für die **Nutzsignal-Mikrofone** sollten Körperschallmikrofone ausgewählt werden, da diese die Abroll- und Fallgeräusche aus der Trommel am besten erfassen können. Zum einen sind diese leichter anzubringen als ein Luftschallmikrofon. Zum anderen liegt der

Frequenzbereich der Nutzsignale im Bereich hoher Empfindlichkeit der Körperschallmikrofone (70 – 15.000 Hz), die an der Trommel (idealerweise mittig relativ zur Trommeltiefe am Trommelmantel) bzw. in Trommelnähe angebracht werden, sodass ein Schallübertrag ohne hohe Verluste möglich ist.

- Für die Positionierung der **Störsignal-Mikrofone** sollten zunächst die Haupt-Störquellen, wie Brenner und Trommelantrieb, bekannt sein. Hierbei muss die Platzierung der Mikrofone an die bautechnischen Gegebenheiten des Tumblers angepasst werden. Ein Luftschallmikrofon mit Nierencharakteristik lässt sich z. B. am besten am Trommelantrieb in ca. 3 cm Abstand aufstellen. Das Luftschallmikrofon kann bei begrenztem Platzbedarf vernachlässigt werden und stattdessen zusätzliche Körperschallmikrofone am Maschinengehäuse angebracht werden.
- Weiterhin ist es empfehlenswert eine **Kalibrierung** durchzuführen. Dabei werden die Positionen für die Nutzsignal-Mikrofone ermittelt, an denen die Abroll- und Fallgeräusche (Nutzsignale) aus den Audiodaten mithilfe der Audiokorrektur extrahiert werden können (korrigiertes Nutzsignal). Um einen Referenzwert für die Nutzsignale zu erhalten, wird ein Wäscheposten (z. B. 25 l/kg CO-Frottier) bei manueller Trommeldrehung ohne Störsignale untersucht. Die so mit diesen Körperschallmikrofonen am Trommelmantel erfassten Nutzsignale werden für die Bestimmung der Positionen für die Mikrofone zur Erfassung der Störsignale verwendet. Das korrigierte Nutzsignal wird ermittelt, indem das Störsignal vom gestörten Nutzsignal nach Angleichung der Lautstärke subtrahiert wird. Anschließend sollte das korrigierte Nutzsignal vor allem die Geräusche der Abroll- und Fallgeräusche des Wäschepostens enthalten.
- Die so ermittelten **optimalen Positionen** liegen dann vor, wenn ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Verhältnis der mittleren Nutzsignalamplitude und der Standardabweichung des Störsignal-Rauschens) von über 0,5 ermittelt wird. So wird das korrigierte Nutzsignal einen hohen Anteil an Nutzsignalen und geringen bis keinen Anteil an Störsignalen enthalten.

8 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihr innovativer Beitrag und ihre industrielle Anwendungsmöglichkeit

Die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse bestehen in der Entwicklung einer innovativen KI-Audioanalyse zur in-situ Messung der textilen Restfeuchte im Trommeltrockner. Hiermit kann die aktuelle Textilfeuchte des Wäschepostens während der Trocknung direkt bestimmt werden, worüber der Trocknungsprozess geregelt werden kann. Dies ermöglicht erstmalig eine bedarfsgerechte Trocknung mit der textilen Restfeuchte als Regelgröße.

Durch diese bedarfsgerechte Trocknung lässt sich der Energiebedarf zur Trocknung dadurch reduzieren, dass Übertrocknen (thermische Textilschädigung) oder unzureichende Trocknung (Gefahr der Stockfleckenbildung) der Wäsche ausgeschlossen werden. Dies wirkt sich zusätzlich positiv auf die Lebensdauer der Textilien aus. Des Weiteren können den Energiebedarf bestimmende Prozessparameter wie Luftdurchsatz, Heißlufttemperatur etc. an die vorliegende Textilfeuchte angepasst werden, was bei optimierter Prozessführung zu weiteren Energieeinsparungen führt.

Vom verminderten Energiebedarf profitieren alle textilen Dienstleistungsunternehmen direkt durch die Kostenersparnis, da die thermische Trocknung von Textilien generell ein sehr energieintensiver Prozess ist. Von der verlängerten Textillebensdauer profitieren die Besitzer der Textilien, da der Kostenaufwand zur Neubeschaffung der Textilien sinkt. Bei Aufbereitung der Textilien durch Leasinggeber hat das Unternehmen wirtschaftliche Vorteile durch beide obigen Einsparungseffekte.

Es ist davon auszugehen, dass Hersteller von Wäschereimaschinen nach einer auf den Projektergebnissen aufbauenden Produktentwicklung in den nächsten Jahren ein derartiges Audiosystem mit KI-Audioanalyse in ihre Trockner implementieren und somit eine Prozessregelung der Trocknungsprozesse auf Basis der textilen Restfeuchte umsetzen werden.

Eine weitergehende Nutzung der Projektergebnisse, z. B. bei Trocknungsprozessen während der Textilherstellung und -veredelung oder bei der Trocknung von Textilien im Bereich der Oberbekleidung in Textilreinigungen ist ebenfalls zu erwarten, da die dort durchgeführten Trocknungsprozesse grundsätzlich ähnliche Anforderungen und Zielkonflikte aufweisen wie bei der Trocknung nach Waschbehandlungen bei der Textilpflege.

Aufgrund der oben beschriebenen Energieeinsparpotentiale bei der Trocknung im Tumbler und durch die verlängerte Textillebensdauer ist mit einer schnellen Umsetzung bei den ca. 3.600 kleinen und mittelständischen textilen Dienstleistungsbetrieben zu rechnen.

Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass die Ergebnisse branchenübergreifend genutzt werden, da sich das Konzept der KI-basierten Audioanalyse auch auf die Zustandsüberwachung rotierender Maschinenteile (z. B. in Motoren, Kugellagern) übertragen lässt, wodurch Reparaturkosten vermieden werden und die Arbeitssicherheit erhöht wird.

9 Danksagung

Das IGF-Projekt 01IF22182N der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V. (FKT), Reinhardtstraße 14-16, 10117 Berlin, wurde im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Ferner danken wir zahlreichen Unternehmen für die Bereitstellung von Versuchsmaterialien sowie für die Begleitung der Arbeiten mit Beratung und Unterstützung.

10 Literaturnachweis

- [1] Deutscher Textilreinigungs-Verband (2016): Deutscher Textilreinigungs-Verband Ganzheitliche Betrachtung von Wäschereien hinsichtlich Wäschelogistik, Maschinenteknik und Aufbereitungsverfahren zur prozessintegrierten Steigerung der Energieeffizienz von Wäschereien (2. Phase). Deutsche Bundesstiftung Umwelt Abschlussbericht, Aktenzeichen: 28612/02
- [2] Steinel, M., Kelm, D. (2005): Sachliche Struktur in der Wäscheversorgung, http://www.kolleg.loel.hs-anhalt.de/forschung/hauswirtschaft/selbstlernkurs/kurs/themen_druck.php?kurs=3&lenr=15&id=44, Stand: 29.03.2021
- [3] Krause, M. (2023): Vorsitzender Ausschuss Technik und Umwelt im Deutschen Textilreinigungs-Verband
- [4] Deutscher Textilreinigungs-Verband e.V. (2023): DTV-Jahrbuch 2023
- [5] Wei, Y. et al. (2020): Development of an efficient and environmental-friendly drying model for domestic dryer, *The Journal of the Textile Institute* 111(2), 214-225
- [6] Wei, Y. et al. (2018): Enhancing the energy efficiency of domestic dryer by drying process optimization, *Drying Technology* 36(7), 790-803
- [7] Gataric, P. et al. (2019): Modeling of heat pump tumble dryer energy consumption and drying time, *Drying Technology* 37(11), 1396-1404
- [8] Buchheister, F. (2012): Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit, Energiebilanzen - lohnt sich das?, wfk/DTV- Workshop Energieeffizienz, Krefeld, 24.05.2012
- [9] wfk - Cleaning Technology Institute (2018): Trocknungsprozessregelung mit textilen Restfeuchtemonitoren, IGF-Forschungsprojekt 19133 BG
- [10] Ottens, M. (2008): Einführung in die Regelungstechnik, Technische Fachhochschule Berlin
- [11] Martynenko, A. (2018): Artificial intelligence: Is it a good fit for drying?, *Drying Technology*, 36, 891-892
- [12] Martynenko, A., Misra, N. (2019): Machine learning in drying, *Drying Technology*, published online: <https://doi.org/10.1080/07373937.2019.1690502>
- [13] Helm, J. M. et al. (2020): Machine learning and artificial intelligence: definitions, applications, and future directions, *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine* 13, 69-76
- [14] Domingos, P. (2012): A few useful things to know about machine learning, *Communications of the ACM* 55, 78-87
- [15] Carleo, G. et al. (2019): Machine learning and the physical sciences, *Review of Modern Physics* 91, 045002
- [16] Cunningham, P., Cord, M., Delany, S. J. (2008): Supervised learning, In: Cord, M., Cunningham, P. (eds), *Machine learning techniques for multimedia. Cognitive Technologies*, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-540-75171-7_2
- [17] De Simone, A., Jacques, T. (2019): Guiding new physics searches with unsupervised learning, *The European physical journal C* 289, <https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-019-6787-3>
- [18] Usama, M. (2019): Unsupervised machine learning for networking: techniques, applications and research challenges, *IEEE Access* 7, 65579-65615

- [19] Greene, D., Cunningham, P., Mayer, R. (2008): Unsupervised learning and clustering, In: Cord, M., Cunningham P. (eds), Machine learning techniques for multimedia, Cognitive Technologies, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-540-75171-7_3
- [20] Serra, A., Tagliaferri, R. (2018): Unsupervised learning: Clustering. In: Ranganathan, S. et al. (eds), Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology, 350-357
- [21] N.N. (2017): Artificial neural networks, In: Sammut, C., Webb, G. I. (eds), Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_921
- [22] Abraham, A. (2005): Artificial neural networks, In: Handbook of measuring system design, Sydenham, P. H., Thorn, R. (eds), 901-908
- [23] Du, S. S. et al. (2019): Gradient descent finds global minima of deep neural networks, Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning, PMLR 97, 1675-1685
- [24] Bottou, L. (2010): Large-scale machine learning with stochastic gradient descent, Proceedings of COMPSTAT'2010, 177-186
- [25] Kingma, D. P., Ba, J. I. (2015): ADAM: A method for stochastic optimization, Cornell University, <https://arxiv.org/abs/1412.6980>
- [26] Shen, L., Lin, Z., Huang, Q. (2016): Relay backpropagation for effective learning of deep convolutional neural networks, Computer Vision – ECCV 2016, 9911
- [27] Rusiecki, A. (2007): Robust LTS backpropagation learning algorithm, IWANN 2007, Lecture Notes in Computer Science 4507, 102-109
- [28] le Cunn, Y. (1988): A theoretical framework for back-propagation, Proceedings of the 1988 Connectionist Models Summer School, 21-28
- [29] Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J. (1986): Learning representations by back-propagating errors, Nature 323, 533-536
- [30] Miikkulainen, R. (2017): Topology of a neural network, In: Sammut, C., Webb, G. I. (eds), Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Springer, https://doi.org/10.1007/978-1-4899-7687-1_843
- [31] Maclaurin, D., Duvenaud, D., Adams, R. P. (2015): Gradient-based hyperparameter optimization through reversible learning, Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, 2113-2122
- [32] Snoek, J., Larochelle, H., Adams, R. P. (2012): Practical Bayesian optimization of machine learning algorithms, Cornell University, <https://arxiv.org/abs/1206.2944>
- [33] Snoek, J. et al. (2015): Scalable Bayesian optimization using deep neural networks, Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning, 2171-2180
- [34] Jabbar, H. K., Khan, R. Z. (2015): Methods to avoid overfitting and under-fitting in supervised machine learning (comparative study), Proceedings of 5th International Joint Conference on Advances in Engineering and Technology (AET 2014), 163-172
- [35] Sarle, S. S. (1995): Stopped fitting and other remedies for overfitting, Proceedings of the 27th Symposium on the Interface, 352-360
- [36] Kohavi, R. (1995): A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection, IJCAI'95: Proceedings of the 14th international joint conference on Artificial intelligence 2, 1137-1143
- [37] Kollmann, F. G. (2000): Maschinenakustik, Springer Verlag

- [38] Lerch, R., Sessler, G. M., Wolf, D. (2009): Technische Akustik, Springer Verlag
- [39] Kumar, G. G., Sahoo, S. K., Meher, P. K. (2019): 50 years of FFT algorithms and applications, circuits, systems, Signal Processing 38, 5665-5698
- [40] Müller, M. (2015): Fundamentals of music processing, Springer International Publishing Cham
- [41] Giannakopoulos, T., Pikrakis, A. (2014): Introduction to audio analysis, Academic Press Oxford UK
- [42] Zhang, T., Jay Kuo, C.-C. (2001): Audio content analysis for online audiovisual data segmentation and classification, IEEE Transactions on Speech and Audio Processing 9, 441-457
- [43] Kalauni, K., Pawar, S. J. (2019): A review on the taxonomy, factors associated with sound absorption and theoretical modeling of porous sound absorbing materials, Journal of Porous Materials 26, 1795-1819
- [44] Mamtaz, H. et al. (2016): Acoustic absorption of natural fiber composites, Journal of Engineering 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/5836107>
- [45] Wang, F. et al. (2019): Analysis of acoustic performance felts after water absorption and their estimation results by artificial neural network, The Journal of The Textile Institute, published online <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1678559>