

Grundlagen für eine Fahrzeug-Funktionsdiagnose mithilfe akustischer Verfahren am Beispiel Traktor

Manuel Lindner

Bei der Entwicklung von Traktoren entstehen aufgrund individueller Anforderungen viele Varianten von Fahrzeugen. Viele Unternehmen suchen daher nach objektiven und reproduzierbaren Methoden zur Qualitätskontrolle. Mithilfe akustischer Analysen können Komponenten oder ganze Fahrzeuge kontrolliert und fertig montierte Fahrzeuge schnell und kosteneffizient überprüft werden. Ziel der vorliegenden Studie war es zu validieren, ob der Einsatz von akustischen Messmethoden in der Endkontrolle einer Traktorproduktion technisch und wirtschaftlich sinnvoll ist. Es zeigte sich, dass Fahrzeugkomponenten, z. B. Verzahnungen, mithilfe eines ausgewählten akustischen Diagnoseverfahrens unter der Anwendung von Ordnungsanalysen anhand ihres spezifischen akustischen Fingerabdrucks erfolgreich überprüft werden können. Zusätzlich konnte ein selbst erstelltes Ziel-Geräuschspektrum definiert werden, das es ermöglicht, eine objektive und reproduzierbare Fahrzeug-Funktionsdiagnose im Rahmen der Qualitätsendkontrolle umzusetzen. Darüber hinaus stellte sich die Messung von Gesamtschallpegeln im Halbfreifeld als praktikabel dar.

Schlüsselwörter

Fahrzeug-Funktionsdiagnose, Traktor, akustische Verfahren, Ordnungsanalyse, Qualitätsendkontrolle

Die Entwicklung neuer Technologien, der vermehrte Einsatz von Elektronik oder Innovationen in der Steuerung (GPS) führen zu immer mehr unbekanntem Einflüssen auf den Traktor. Klein- und mittelständische Unternehmen (KMU), wie sie in der Landtechnik häufig vorzufinden sind, produzieren einerseits oftmals ohne teil- oder vollautomatisierte Fertigung, andererseits können Kosten für eine Umstrukturierung in den Bereichen Prozess und Qualität nicht immer getragen werden (ZÄH und LINDEMANN 2013). Gerade deshalb werden für die Qualitätssicherung qualitativ hochwertige, jedoch kostengünstige Methoden und Systeme benötigt, um Produkte, Waren, Halbzeuge und vieles mehr wirtschaftlich überprüfen zu können. Vor allem bei klein- und mittelständischen Unternehmen in der Fahrzeugindustrie kommt noch hinzu, dass viele Zulieferer, die Komponenten wie Motoren, Getriebe usw. liefern, in der Wertschöpfungskette vorgeschaltet sind. Daher ist es wichtig, die Qualität einfach und effizient sicherstellen zu können. Vor allem bei komplexen Fahrzeugen wie Traktoren gibt es unbekanntem Einflüsse, die erst im Endzustand überprüfen werden können. Der Einsatz von gut ausgebildetem Personal ist zwar unersetzbar, dennoch wird es immer wichtiger diese oftmals subjektiven Wahrnehmungen durch reproduzierbare Messgrößen zu unterstützen. Akustische Verfahren bieten dafür einen geeigneten Ansatzpunkt (KIRSTE 1989).

Messtechnik und Verfahren

Vibroakustische Aufnahmen an Fahrzeugen sind heutzutage hauptsächlich Entwicklungs- und Forschungsabteilungen vorbehalten. Der Einsatz der Verfahren in der Qualitätsendkontrolle ist in der Praxis noch nicht gebräuchlich. Aufgrund der Komplexität und der hohen Anzahl an Ausführungsvarianten von Traktoren werden diese Methoden für serienbegleitende Kontrollen nicht genutzt. Durch neue Schlüsseltechnologien in bedienungsfreundlicher Hard- bzw. Software ist jedoch eine Einführung in der Endabnahme zu überlegen. Vor allem wirtschaftlich gesehen können diese Analysen Unternehmen unterstützen, um Fahrzeuge mit konstanter Qualität auszuliefern. Das würde mittel- und langfristig zu einer Kostensenkung führen. Des Weiteren kann anhand kontinuierlicher Diagnose der Fahrzeuge und genauer Dokumentation eine Trendanalyse zur Überwachung von Fertigungsprozessen ermöglicht werden. Mit dieser die Fertigung begleitende Trendanalyse ist es möglich, nicht nur die Qualität der gefertigten Teile über längere Zeit zu überwachen, sondern Schritt für Schritt Qualitätskriterien enger zu fassen. Dabei könnten nicht nur Qualitätsschwankungen von Zulieferern, sondern auch unsichere Prozesse oder Produktionsmaschinen mit zu hohem Toleranzmaß festgestellt werden. Zusätzlich zu den aktuell hohen Anforderungen an den Abgasemissionsschutz wird zukünftig auch der Lärmschutz seitens des Gesetzgebers an Bedeutung gewinnen. Nach den EG-Richtlinien 151 und 3112 sind jetzt schon zulässige Geräuschpegel für bereifte Traktoren massiv beschränkt (RENIUS 2013a). Die Firmen, die sich frühzeitig auf diesen Trend zur Lärmminimierung einstellen, können sich langfristigen Unternehmenserfolg sichern.

In dieser Arbeit wurden übliche Verfahren in der Fahrzeug-Endkontrolle bewertet sowie darauf aufbauend die Grundlagen für akustische Diagnoseverfahren ermittelt. Die ersten Erkenntnisse wurden dann im Hinblick auf die Anwendung bei Traktoren vertieft. Unterschieden wurde inhaltlich dabei auch zwischen Hardware (Mikrofone, Verstärker, usw.) und Software. Darüber hinaus wurde anschließend einem Unternehmen ein konkretes Projekt vorgeschlagen, welches durch Vorversuche am Traktor durchgeplant und unterstützt wurde. Es beinhaltete die Auswahl eines akustischen Diagnoseverfahrens mit Geräte- und Kostenplan sowie eine Wirtschaftlichkeits- und Risikoabschätzung. Der Fokus der Arbeit lag dabei auf der Möglichkeit, das System möglichst ohne kostenintensiven Rollenprüfstand zu realisieren sowie auf einer für den Anwender einfachen Handhabung. Das ausgewählte Messsystem besteht aus folgenden relevanten Komponenten (Abbildung 1):

- Sensoren (Mikrophone, Drehzahlmesser)
- Mess-Frontend zur Signalaufbereitung
- Computer mit Software zur Analyse, Darstellung und Dokumentation



Abbildung 1: Messkette

Um eine effiziente und kostengünstige akustische Qualitätskontrolle in der Endabnahme für ein mittelständisches Unternehmen umzusetzen, wurden Versuche an Traktoren durchgeführt und die Kriterien zur Auswahl eines geeigneten Analyseverfahrens von Tschöke und Henze (2003) berücksichtigt. Zusätzlich sollte ein für die Endkontrolle geeignetes Verfahren die relevanten Bereiche eines Fahrzeugs – hier eines Traktors – abbilden können. Deshalb musste neben dem Messverfahren auch das richtige Analyseverfahren ausgewählt werden.

Aufgrund der Tatsache, dass sich der Großteil der in einem Fahrzeug verbauten Komponenten drehen, wie z.B. im Getriebe oder im Motor, sind Verfahren wie die Rotationsanalysen gut geeignet. Für eine Fahrzeug-Funktionsdiagnose, bei der vor allem die Motorfunktion, die Getriebefunktion und die Funktionstauglichkeit von Pumpenantrieben essenziell ist, bieten sich Verfahren wie die Ordnungsanalyse, die Drehschwinganalyse oder die Grad-Kurbelwinkelanalyse an. Außerdem wurde auch der Einsatz der etwas einfacher gestalteten Frequenzanalyse geprüft. Dabei wurde auch die an der Technischen Universität München erfolgreich durchgeführte Methode zur Lärmreduzierung an Klein-LKW mittels Frequenzanalyse (Renius 2013b) berücksichtigt. Dabei könnte die gleichzeitige Drehzahlerfassung zur Analyse entfallen. Es ergaben sich bei den Messungen am Gesamtsystem Traktor aber teilweise hohe Pegelschwankungen, da ohne Rollenprüfstand nicht die für jede Messung notwendigen, exakt entsprechenden Anregungsbedingungen geschaffen werden konnten. Deshalb war es auch bei gleichartig durchgeführten Hochläufen nur sehr schwierig, Informationen zu gewinnen. Die Ordnungsanalysen hingegen, die online an einem im Traktor mitgeführten Messrechner durchgeführt wurden, überzeugten mit sehr guten und anschaulichen Messergebnissen und ließen eine praktikable Umsetzung in der Fahrzeugendkontrolle erwarten. Den Unterschied zwischen einer Ordnungs- und einer Frequenzanalyse zeigt Abbildung 2. Im Gegensatz zur Frequenzanalyse wird bei der Ordnungsanalyse der Energiegehalt des Geräusches nicht über der Frequenz, sondern über der Ordnung aufgetragen (Hübner 2005, Klein 2003). Relevante Pegelwerte sind also mittels Übersetzung des Getriebes (Normierung auf eine Bezugswelle) genauen Ordnungen zugewiesen. Die Ordnung ist dabei ein Vielfaches der Drehzahl.

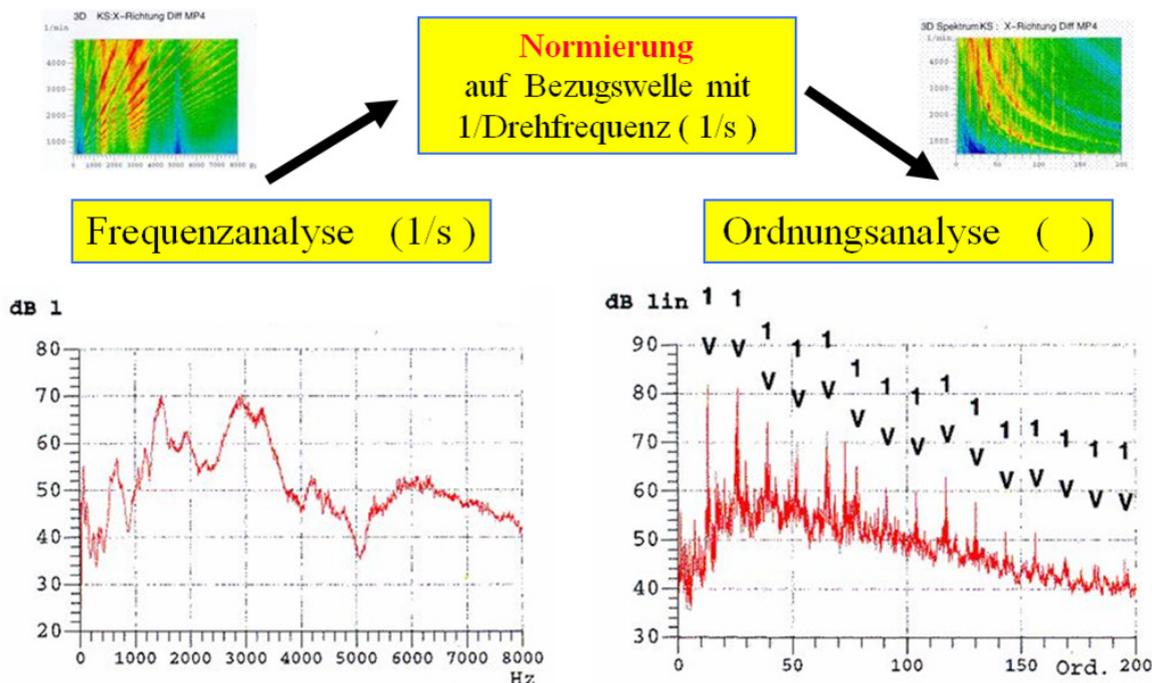


Abbildung 2: Von der Frequenz- zur Ordnungsanalyse (WAGNER 2005)

Die zentrale Größe für eine qualitativ hochwertige Ordnungsanalyse ist eine genau gemessene Drehzahl. Der erste Versuch mit einem optischen Sensor führte zu keinem optimalen Ergebnis. Daher wurde die Drehzahl direkt am Steuergerät des Getriebes gemessen. Die Datenverbindung (Sitz-Messrechner) ist dadurch kürzer und es entfällt die aufwendige Anbringung eines optischen oder magnetischen Sensors. Zu beachten ist, dass für eine Ordnungsanalyse an einem leistungsverzweigten Getriebe zukünftig drei Drehzahlen benötigt werden: die An- und Abtriebsdrehzahl und – für den hydrostatischen Anteil – die variable Drehzahl.

Aus den Versuchen und der Bewertung unterschiedlicher Verfahren wurde abgeleitet, dass zur Funktionsdiagnose in der Endabnahme die Schalldruckpegel mit zwei Mikrofonen gemessen werden sollten, da sich die Verwendung von Beschleunigungssensoren als zu aufwendig erwiesen hat. Am Fahrzeug wurden lineare Mikrophone mit A-Bewertung (Abbildung 3) verwendet (ZELLER 2012). Zudem entsprachen die eingesetzten Mikrophone dem ICP-Prinzip.



Abbildung 3: Mikrophonposition (Luftschall-Mikrophon Fahrer, Luftschall-Mikrophon Nahfeld Getriebe hinten) am Lintrac 90 (Foto: Lindner Traktorenwerk GmbH)

Zur Schallpegelmessung wird zusätzlich ein Frontend bzw. eine Auswerte-Elektronik benötigt, welche die Signale für den Messrechner aufbereitet. Neben großen und eher schweren Mess-Frontends mit vielen Kanälen wurden im Rahmen der Arbeit auch kompaktere Systeme getestet. Zu den getesteten Geräten gehörten unter anderem das Messfrontend Pak Mobil MKII (Müller BBM Vibro-Akustik Systeme GmbH) sowie das System SQuadriga (Head acoustics GmbH). Die allgemeine Bedienung erfolgte über die jeweilige System-Software am Rechner im Fahrzeug. Die im Handel erhältlichen Auswerte-Elektroniken sind großteils modular aufgebaut und entsprechend den Anforderungen erhältlich. Für die Anwendung mittels zweier Mikrophone war eine Ausführung mit zwei Slots bzw. Modulen ausreichend. Der Aufbau gestaltete sich bei beiden Systemen sehr robust und nicht störanfällig. Ein großer Vorteil des eingesetzten Frontends der Firma Müller BBM VibroAkustik Systeme GmbH war die hohe Genauigkeit des Tacho-Eingangs mit einem 50-MHz-Zähler und der damit verbundenen Eignung für Ordnungsanalysen (MÜLLER BBM VAS GMBH 2014).

Ergebnisse

Dass die gewählte Messtechnik auswertbare und reproduzierbare Analysen zulässt, wurde an sechs dafür gezielt manipulierten Fahrzeugen gezeigt. Eine Beispielmessung zeigen die Abbildungen 4, 5 und 6. Untersucht wurde dabei ein Geotrac (Lindner Traktorenwerk GmbH) mit einem mechanischen Getriebe. Der Allrad schaltete sich während der Messung immer wieder undefiniert zu, vor allem bei Kurvenfahrt. Der Grund für diese Allradzuschaltung waren eventuell Systemdruckeinbrüche. Auffallend war nach anschließender Ordnungsanalyse, dass die beiden Allrad-Räderpaare M und N (M = Z33/Z28 und N = Z32/Z58) bei zugeschaltetem Allradantrieb sehr laut waren. Auch der Kegelradsatz K, mit der Ordnung 18,41, zeigte erhöhte Pegel nach gefahrenem Hochlauf. Die Überprüfung des Tragbildes und der Einstellung der auffällig gewordenen Zahnradpaare bestätigte das Ergebnis der Analyse. Da die Verzahnungspegel im Gegensatz zu vorher in der Serie gemessenen Fahrzeugen inakzeptabel waren, erforderte dies einen Umbau der Allrad-Räderpaare und des Kegelradsatzes.

Die im Getriebeschema des untersuchten Geotracs gekennzeichneten Komponenten (orange unterlegt) zeigen die aus dem Ordnungsspektrum abgeleiteten inakzeptablen Zahnradpaare M, N und K. Zusätzlich wurden die Räderpaare im Schema zum besseren Verständnis alphabetisch durchnummeriert (Abbildung 4).

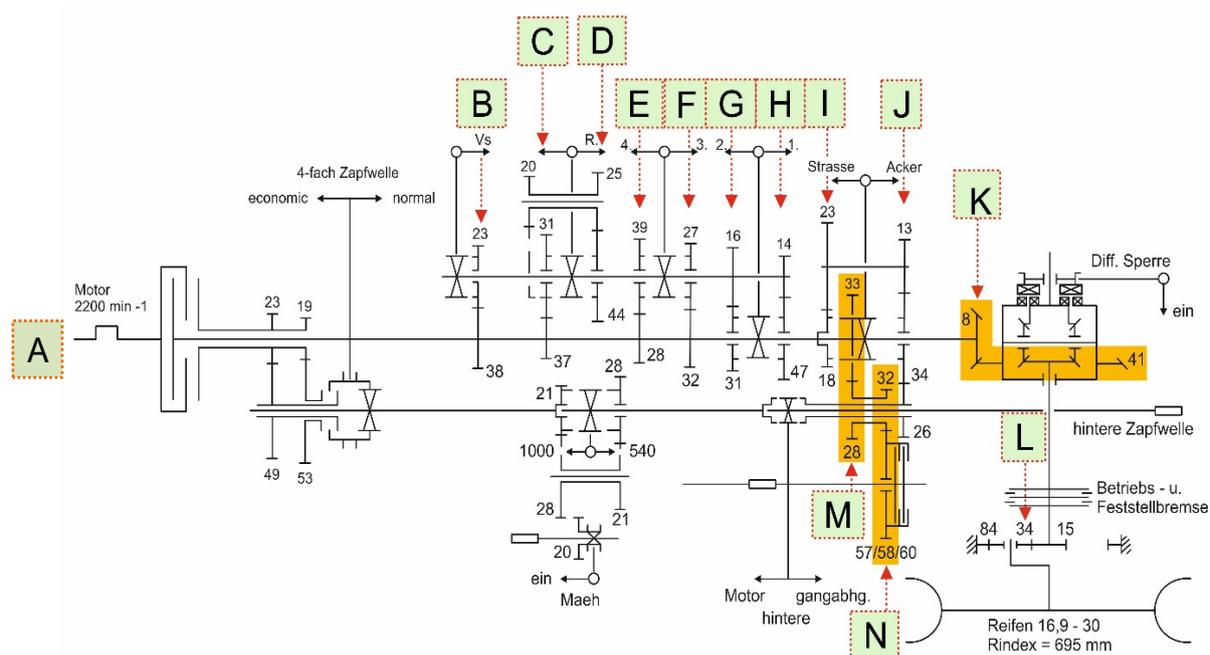


Abbildung 4: Getriebeschema

Aus den ermittelten Daten wurde ein Campbell-Diagramm erstellt. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen einem Spektrum und der Motordrehzahl und kann dadurch den spektralen Verlauf eines Hochlaufs gut darstellen. Das Diagramm bildet also den Pegel in Abhängigkeit von der Drehzahl und der Ordnung ab. Am Beispiel eines untersuchten Traktors ist im Campbell-Diagramm durch die roten, senkrechten Linien (hohe Pegelwerte) ersichtlich, welche Ordnungen und infolgedessen welche

Zahnräder betroffen sind (Abbildung 5). Neben den auftretenden roten Linien des Kegelradsatzes und der Allrad-Radpaare sind auch Resonanzen als Hyperbeln erkennbar.

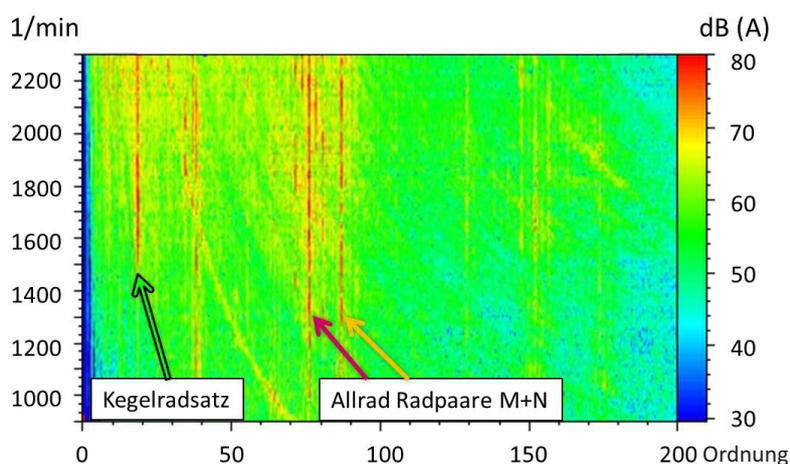


Abbildung 5: Messung Geotrac, Campbell-Diagramm der Ordnungsanalyse (Luftschall im Nahfeld Getriebe hinten)

Noch eindeutiger zeigt sich die Situation in Abbildung 6, in der die Spitzen der 3., 5. und 6. Ordnungen eindeutig hervortreten. Die Zahnradpaare erreichen dabei Maximalwerte von über 80 dB(A).

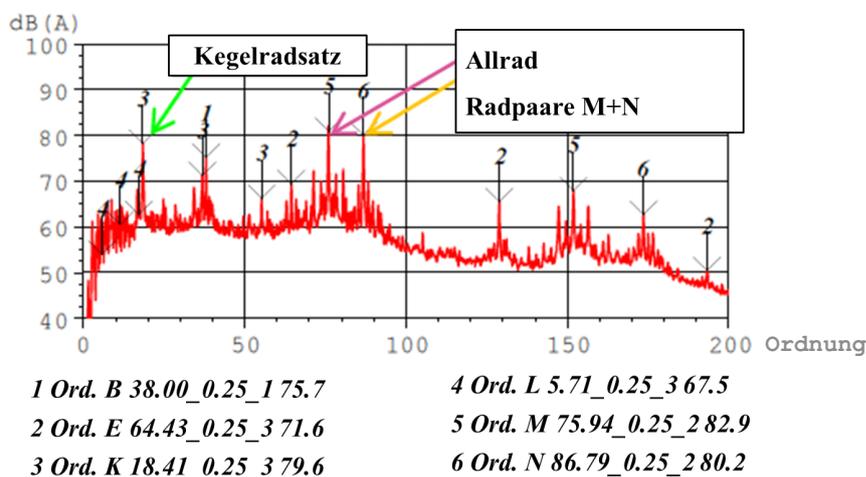


Abbildung 6: Messung Geotrac – Ordnungsanalyse des Luftschalls im Nahfeld Getriebe hinten

Für die vorliegende Beispielmessung wurde die Abtastrate in Hz, eine Auflösung von 0,125 und die Fensterbewertung Hanning gewählt. Das Mikrophon war dabei zentral am Heck des Fahrzeugs im Nahfeld des Getriebes befestigt (Abbildung 3). Die Messergebnisse beziehen sich auf eine Fahrt im 4. Gang - Vorwärts - Getriebegruppe High - Getriebegruppe Straße mit zugeschaltetem Allradantrieb. Der gemessene Drehzahlbereich erstreckte sich von 950 bis 2300 1/min.

Die Ergebnisse der Analysen führten nahezu immer zur Ursache der Störung. Außerdem wurde untersucht, inwieweit es möglich ist eine Ziel-Ordnungskurve für einen Traktor – trotz der hohen Anzahl von Fahrzeugvarianten – zu definieren. Dazu wurde an 10 Traktoren mit gleichem mechanischem Getriebe eine Messreihe durchgeführt. Die gemessenen Pegelwerte der einzelnen Radpaare lagen mit einer gewissen Streuung dicht beieinander. Somit war es möglich, Ziel-Ordnungskurven zu erstellen.

Anhand der durchgeführten Versuche an Fahrzeugen konnte gezeigt werden, dass die Messung von Gesamtschallpegeln im Halbfreifeld praktikabel ist. Infolgedessen ist kein Prüfstand notwendig, um Fahrzeuge in der Endkontrolle reproduzierbar zu überwachen. Dies konnte mit einem geeigneten Fahrzyklus und erforderlichen Rahmenbedingungen umgesetzt werden, die dem Anwender vorgegeben worden waren. Die Messungen erfolgten dabei in einem für die Ordnungsanalyse geeigneten Hochlauf ohne Last über eine fest definierte Strecke von 600 Metern. Die Teststrecke war eine asphaltierte Straße, in deren Umgebung (> 100 m) keine schallreflektierenden Objekte vorhanden waren. Somit konnten mögliche Einflüsse auf das Messergebnis ausgeschlossen werden. Es wurde dabei der Drehzahlbereich von 950 bis 2300 1/min durchfahren. Gemessen wurden alle Gänge mit und ohne Allradzuschaltung bzw. mit und ohne Ackergruppe. Unterschieden wurde auch zwischen den Gruppen High und Low bzw. Vor- und Rückwärtsfahrten. Störgeräusche wie Wind- oder Abrollgeräusche der Reifen hatten keinen Einfluss auf das Ergebnis. Die relevanten Pegelwerte sind mittels Übersetzung des Getriebes (Normierung auf eine Bezugswelle) genauen Ordnungen zugewiesen und waren somit eindeutig identifizier- und auswertbar. Elemente mit zu hoher Lautstärke (z. B. Getriebezahnrad) konnten erfolgreich erkannt werden. Neben den Verzahnungen des Getriebes waren auch Pumpen und Pumpenantriebe als dominante Schallquellen erkennbar. Diese treten eher als Spitzen im Spektrum hervor. Zudem konnten auch die Zündordnungen und störende Drehschwingungen des Motors gezeigt werden. Außerdem wurde für das akustische Diagnoseverfahren ein Ziel-Geräuschspektrum definiert. Damit ist es möglich, selbst erstellte Grenzwerte für Traktorvarianten serienbegleitend zu kontrollieren. Die bei der Funktionsdiagnose eines Traktors gemessenen Ordnungskurven werden dabei mit im Analyseprogramm hinterlegten Zielordnungskurven verrechnet, das Ergebnis wird online graphisch angezeigt.

Schlussfolgerungen

Für ein mittelständisches Unternehmen ist der Einsatz des vorgestellten Messsystems zu empfehlen. Die in der Abschlussarbeit ausgewerteten Messungen belegen eine erfolgreiche Umsetzung der begleitenden Akustikmessungen zur Diagnose. Die gemessenen Werte einer Funktionsdiagnose sollten dokumentiert werden und dem Unternehmen als rechtliche Grundlage dienen. Neben der Überprüfung von Fahrzeugen können auch Rückschlüsse auf die Qualität in der Produktion gezogen werden. Trendanalysen könnten dazu beitragen, die Prozesse in der Produktion oder von Zulieferern zu stabilisieren. Dabei können neue Wege in der Produktion eingeschlagen und kontinuierlich an der Qualität verarbeitender Prozesse gearbeitet werden. Zum Beispiel können Verzahnungen über längere Zeit beobachtet und neue Fertigungsverfahren qualitativ beurteilt werden. Eine Herausforderung, die mit der Einführung akustischer Messverfahren in der Endabnahme vorerst aber bleibt, sind die zahlreichen Fahrzeugvarianten in der Traktorproduktion. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Versuchen an Traktoren in der vorliegenden Studie konnte der Einfluss der Varianten auf die Effizienz der Funktionsdiagnose nicht gänzlich geklärt werden. Daher empfiehlt es sich für Unternehmen, Messergebnisse serienbegleitend zu kontrollieren und die verwendeten Zielverläufe iterativ anzupassen.

Literatur

- Hübner, C. (2005): Messung der Güte von Kleinelektromotoren am Prüfstand unter Berücksichtigung der Lastkennlinie. Bachelor-Thesis, FH Düsseldorf
- Kirste, T. (1989): Entwicklung eines 30-kW-Forschungstraktors als Studie für lärmarme Gesamtkonzepte. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 14, Nr. 43, Düsseldorf, VDI-Verlag
- Klein, U. (2003): Schwingungsdiagnostische Beurteilung von Maschinen und Anlagen. Düsseldorf, Stahlseisen, 3. Auflage
- Müller BBM VAS GmbH. (2014): Müller BBM Vibroakustik Systeme-Frontends. <http://www.muellerbbm-vas.de/produkte/datenerfassung/frontends>, Zugriff am 11.04.2016
- Renius, K. Th. (2013 a): Vorlesung: Traktoren und Erdbaumaschinen. TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Blatt T 6.4-1
- Renius, K. Th. (2013 b): Vorlesung: Traktoren und Erdbaumaschinen. TU München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Blatt T 6.4-2.
- Tschöke, H., Henze, W. (Hg.) (2003): Motor- und Aggregate-Akustik. Renningen, Expert Verlag
- Wagner, W. (2005): Grundlagen der Akustik. Passau, ZF Friedrichshafen AG
- Zäh, M.; Lindemann, U. (2013): Vorlesung: Qualitätsmanagement – Qualität im Produktlebenszyklus. TU München, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik/Lehrstuhl für Produktentwicklung.
- Zeller, P. (2012): Handbuch Fahrzeugakustik. Wiesbaden, Vieweg+Teubner, 2. Auflage

Autor

B. Sc. Manuel Lindner ist Student der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Fahrzeugtechnik, Arbeitsbereich mobile Arbeitsmaschinen, Boltzmannstr. 15, 85748 Garching b. München, E-Mail: m.lindner@kundl.at.

Danksagung

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. K. T. Renius für seine wertvolle fachliche Betreuung und die Bereitschaft, mir während meiner Bachelorarbeit mit Rat zur Seite zu stehen. Bei Herrn Dipl.-Ing. A. Süßmann und Herrn Dipl.-Ing. M. Sinning bedanke ich mich für ihre professionelle Assistenz bei organisatorischen Fragen. Zusätzlich bedanke ich mich bei meinen Interviewpartnern der ZF Friedrichshafen AG, Abteilung Akustik Achsen und Getriebe und der Fendt AGCO GmbH, Abteilung Quality Management. Für alle technischen Informationen danke ich dem Unternehmen Lindner Traktorenwerk GmbH Kundl/Österreich.