

Modellgestützte Zustandsdiagnose eines Luftfilters

Durch zustandsabhängige Instandhaltung kann einerseits das Verschleißpotenzial einer Baugruppe sehr gut ausgenutzt werden und zum anderen lassen sich Ausfallzeiten vermeiden. Die Herausforderung besteht dabei allerdings in der zuverlässigen Zustandsdiagnose der in Stand zu haltenden Baugruppe, insbesondere wenn sich deren Zustand nicht unmittelbar aus einer Messgröße ableiten lässt. Hier bietet sich die Verwendung von modellgestützten Methoden an, um die Messwerte in Abhängigkeit der jeweiligen Betriebsbedingungen richtig bewerten zu können. Zur Zustandsüberwachung eines Luftfilters wurden am ILF eine solche modellgestützte Methode erarbeitet, auf einem Traktor prototypisch implementiert und in Feldversuchen erprobt.

Dipl.-Ing. Thomas Göres ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, Dr.-Ing. Thorsten Lang ist akademischer Oberrat und cand. mach. Jörn Torben Oetker ist Student am Institut für Landmaschinen und Fluidtechnik (ILF) der TU Braunschweig (Leitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. H.-H. Harms), Langer Kamp 19a, 38106 Braunschweig; e-mail: t.goeres@tu-braunschweig.de

Schlüsselwörter

Luftfilter, modellbasierte Zustandsüberwachung, Online Condition Monitoring - OCM, zustandsabhängige Instandhaltung

Keywords

Air filter, model based condition monitoring, online condition monitoring - OCM, condition-oriented maintenance

Bei selbstfahrenden Landmaschinen handelt es sich heutzutage um hochkomplexe Einheiten. Für die Instandhaltung besteht dabei folgender Zielkonflikt: Aus Kostengründen soll einerseits das Verschleißpotenzial von Maschinenteilen und Baugruppen möglichst weit ausgenutzt werden, bevor es zu einem Austausch kommt. Andererseits sollen aber unvorhergesehene Stillstands- und Ausfallzeiten bei diesen Maschinen so gering wie möglich gehalten werden. Eine zustandsabhängige Instandhaltungsstrategie stellt hier eine viel versprechende Lösungsmöglichkeit dar, die jedoch die Herausforderung einer zuverlässigen Zustandsdiagnose der in Stand zu haltenden Baugruppe mit sich bringt. Am ILF wurde hierzu eine modellgestützte Methode entwickelt, die eine Online-Zustandsdiagnose des Luftfilters ermöglicht, der dem Verbrennungsmotor vorgeschaltet ist.

Stand der Technik bei Überwachung und Instandhaltung des Luftfilters

Luftfilter haben die Aufgabe, den in der Ansaugluft enthaltenen Staub am Eintritt in den Motor zu hindern. Die mittlere Staubkonzentration der Ansaugluft kann zum Beispiel bei einem Mähdrescher im Kolonnenbetrieb bis zu 35 mg/m³ betragen [1]. Zur Überwachung wird meist ein Grenzwertschalter eingesetzt, der beim Erreichen eines fest eingestellten Differenzdrucks, der über dem Luftfilter abfällt, schaltet. Eine Warnleuchte informiert den Fahrer dann über den voll beladenen Luftfilter. *Bild 1* zeigt den herkömmlichen Systemaufbau in Form eines Blockschaltbildes. Heute wird beispielsweise der Luftfilter eines Mähdreschers im Zuge der regelmäßigen Wartung sehr häufig vorsorglich gereinigt, unabhängig von dessen tatsächlichem Beladungszustand, was zu einer Beanspruchung des Filtergewebes und damit zu einer Verkürzung der Gesamtstandzeit des Filters führt.

Modellgestützte Zustandsüberwachung

Da der Differenzdruck stark vom aktuell angesaugten Frischluftvolumenstrom und so-

mit auch vom aktuellen Betriebspunkt des Verbrennungsmotors abhängt, ist allein auf Basis einer Differenzdruckmessung kein quantitativer Rückschluss auf den Beladungszustand des Filters möglich. Um online eine Information über den Beladungszustand zu erhalten, wurde am ILF eine modellgestützte Methode erarbeitet und untersucht, die im Folgenden vorgestellt werden soll. *Bild 2* zeigt den prinzipiellen Systemaufbau.

Parallel zum realen Luftfilter ist ein mathematisches Ersatzmodell der Luftfilterbaugruppe geschaltet. In diesem Modell wird das Systemverhalten des Luftfilters in Form von mathematischen Formeln hinterlegt, so dass die Ausgangsgröße X_a als Funktion von den Eingangsgrößen X_e errechnet werden kann. Die Ausgangsgröße ist für den betrachteten Fall der über dem Luftfilter abfallende Differenzdruck. Die Eingangsgröße ist der aktuelle Motorbetriebspunkt. Dieser ist über die beiden Messwerte Motordrehzahl und Motorauslastung, die vom CAN-Bus der Maschine gelesen werden können, in Kombination mit der Drehmomentdrehkurve des Motors eindeutig zu bestimmen. Darüber hinaus wird das motorspezifische Verbrennungsluftmassenstrom - Kennfeld benötigt, in welchem der Verbrennungsluftmassenstrom in Abhängigkeit des Motorbetriebspunktes hinterlegt ist. Ein beispielhaftes Verbrennungsluftmassenstromkennfeld ist in *Bild 3* dargestellt.

Um das Systemverhalten mathematisch zu beschreiben, wurde im ersten Ansatz der Filter als Drossel modelliert. Die sogenannte Drosselgleichung (1) beschreibt dabei die Beziehung zwischen dem Volumenstrom Q und der Druckdifferenz Δp (nach [2]). Weitere Formelzeichen sind die Drosselquerschnittsfläche A_D , die Durchflusszahl α und die Expansionszahl ε .

$$Q = \alpha \cdot c \cdot A_D \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho_{Luft}}} \leftrightarrow \Delta p = \left(\frac{Q}{A_D \cdot \alpha \cdot \varepsilon} \right)^2 \cdot \rho_{Luft} \quad (1)$$

Es wird angenommen, dass die Drosselquerschnittsfläche A_D mit zunehmender Beladung des Filters kleiner wird. Auf Basis dieses mathematischen Ersatzmodells kann nun permanent der zu erwartende Differenz-

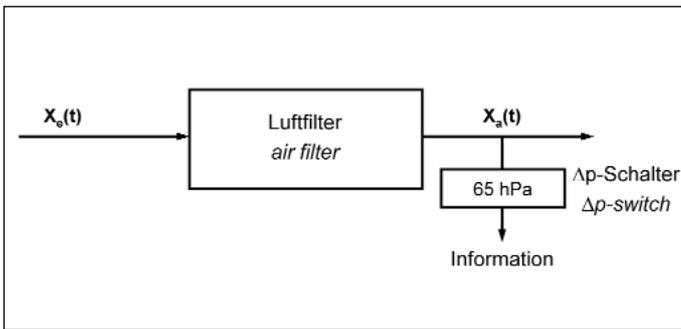


Bild 1: Blockschaltbild einer herkömmlichen Luftfilterüberwachung

Fig. 1: Block diagram of a common air condition monitoring

druck errechnet und mit dem gemessenen Wert verglichen werden. Die Differenz der beiden Werte liefert eine quantitative Information über den Beladungszustand des Filters.

Praktische Umsetzung

Am ILF wurde eine solche Luftfilterüberwachung als Prototyp auf einem Versuchstraktor aufgebaut. Als Entwicklungsplattform diente dabei eine dSPACE-Micro-AutoBox-Hardware in Verbindung mit dem Programmpaket Matlab/Simulink und es kam ein Differenzdrucksensor der Fa. Keller vom Typ PD23 (0-200 hPa) zum Einsatz.

Vom CAN-Bus des Traktors werden die Motordrehzahl und die Motorauslastung gelesen und über das hinterlegte Verbrennungsluftmassenstromkennfeld der aktuelle Luftmassenstrom des Motors ermittelt. Geteilt durch die Standard-Luftdichte ergibt sich der Volumenstrom Q , der den Filter durchströmt.

Bevor nun der zu erwartende Differenzdruck mit Hilfe der Drosselgleichung (1) errechnet werden kann, müssen noch einige unbekannte Größen bestimmt werden.

Die Querschnittsfläche der Drossel wird dabei zunächst auf 1 m^2 bei neuem Filter festgelegt. Außerdem wird die Expansionszahl α zur Durchflusszahl α hinzugezogen und eine funktionale Abhängigkeit zwischen α und dem Volumenstrom Q angenommen. Nach einer Referenzphase mit neuem Luftfilter wird mit Gleichung (2) die Abhängigkeit $\alpha = f(Q)$ mit Hilfe einer linearen Regression aus den Messwerten ermittelt und im Modell hinterlegt.

$$\alpha = f(Q) = \frac{Q}{A_D} \cdot \sqrt{\frac{p_{1,all}}{2 \cdot \Delta p}} \quad (2)$$

Als letzte noch fehlende Größe wird der minimale Drosselquerschnitt $A_{D,min}$, der sich bei maximal beladenem Filter einstellt, mit Hilfe von Gleichung (3) ermittelt. Dabei wird die Schaltschwelle des werkseitig montierten Differenzdruckschalters als maximal zulässiger Differenzdruck $\Delta p_{max,zul}$ bei größtmöglichem Volumenstrom Q_{max} angenommen. Damit sind alle fehlenden Größen für die Zustandsüberwachung bekannt.

$$A_{D,min} = \frac{Q_{max}}{\alpha} \cdot \sqrt{\frac{p_{1,all}}{2 \cdot \Delta p_{max,zul}}} \quad (3)$$

Während der Betriebsphase der Zustandsüberwachung wird dann auf Basis des aktuellen Motorbetriebspunktes jeweils der minimal zu erwartende Differenzdruck Δp_{min} bei neuem Filter ($A_D = 1 \text{ m}^2$) und der maximale zu erwartende Differenzdruck Δp_{max} bei voll beladenem Filter ($A_D = A_{D,min}$) mathematisch ermittelt. Der real gemessene Differenzdruck Δp_{Sensor} wird abschließend mit Hilfe der Gleichung (4) zu den beiden errechneten Werten ins Verhältnis gesetzt, um einen Wert für die Filterbeladung zu erhalten.

$$\text{Beladung}[\%] = \frac{\Delta p_{Sensor} - \Delta p_{min}}{\Delta p_{max} - \Delta p_{min}} \cdot 100\% \quad (4)$$

In ersten Feldversuchen konnte die prinzipielle Funktionsweise der modellgestützten Methode zur Luftfilterüberwachung nachgewiesen werden. Jedoch führen insbesondere schnelle Veränderungen des Motorbetriebspunktes noch zu stark schwankenden Werten in der Ausgabe des Beladungszustandes. Dies ist auf die zeitlichen Verzögerungen beim Aufbau des Differenzdruckes zurückzuführen, die sich auf Grund der Saugrohrgeometrie und der räumlichen Distanz zwischen Filter und Motor einstellen.

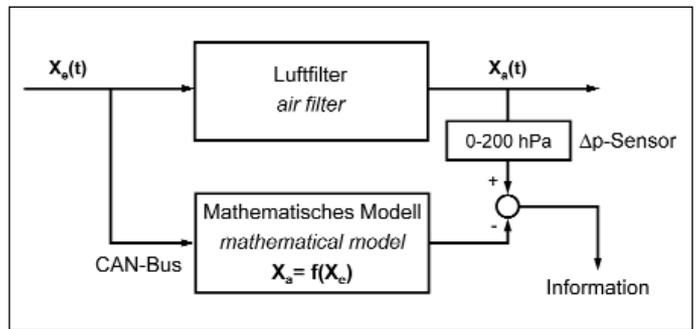


Bild 2: Blockschaltbild der modellgestützten Luftfilterüberwachung

Fig. 2: Block diagram of the model based air filter monitoring

Zusammenfassung

Bei stark wechselnden Betriebsbedingungen ist die Beobachtung einer direkt messbaren Größe zur Zustandsüberwachung einer Baugruppe oft nicht ausreichend. Modellgestützte Methoden berücksichtigen die wechselnden Betriebsbedingungen und ermöglichen so eine quantitative Interpretation der gemessenen Werte hinsichtlich einer Zustandsdiagnose. Am ILF wurde für den Luftfilter eines Traktors eine modellgestützte Methode zur Überwachung des Beladungszustandes erfolgreich eingesetzt und untersucht. Darüber hinaus sind Feldversuche an einem Mähdrescher im Ernteeinsatz geplant.

Literatur

- Bücher sind mit • gezeichnet
- [1] • Parr, O.: Luftfilter. In: Handbuch Dieselmotoren, 3. Auflage (Hrsg: Mollenhauer, K.; Tschöke, H.), Springer Verlag, 2007
 - [2] Harms, H.-H.: Ölhydraulik 1, Vorlesungsskript Wintersemester 2007/2008, ILF, TU Braunschweig, 2007

Danksagung

Wir bedanken uns beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Förderung des Verbundprojektes DAMIT, in dessen Rahmen die Untersuchungen durchgeführt wurden.

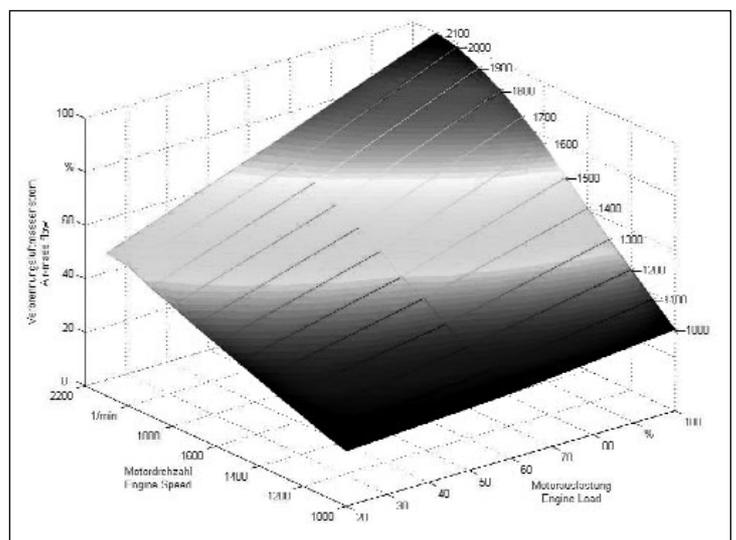


Bild 3: Verbrennungsluftmassenstromkennfeld

Fig. 3: Air-mass flow characteristic diagram