

EXAMPLE OF BIG DATA STATISTICAL HANDLING IN ENGINEERING APPLICATION

BEISPIEL FÜR DIE ANWENDUNG MODERNER STATISTISCHER METHODEN AUF MESSDATEN IN DER PROZESSTECHNIK

Von L. Fabrykowski, F. Legerer, Wien

ABSTRACT

Due to developments in micro-electronics during last few decades progress in computing has reached a level enabling analyses of large amounts of data. Quantities can be dealt with in a manner previously considered only pipe-dreams of mathematicians in theoretical statistics, generally called "Big Data". This paper provides an example of an engineering application; it consists of two parts: The first one is of general interest in process technology: By monitoring of parameters the detection of "fishy" parts, may the cause be a failure either of the sensor or of the transmitter of signals or even a real failure. The second part of the paper is of specific interest manufacturers of operators of filters for the exhaust of internal combustion engines, in this particular case the prediction of the next ash-removal; however, it may be generally interesting to process engineers, that signals some orders of magnitude below the noise level are detected and processed. Data for preparing this paper have been provided from VERT-Association's retrofit campaigns, a Swiss based certification organisation for best available technology.

ZUSAMMENFASSUNG

Zufolge der Fortschritte der Mikroelektronik hat die Computertechnik ein Niveau bezüglich Datenmenge und Rechengeschwindigkeit erreicht, das statistische Analysen ermöglicht, die früher nur von theoretischem Interesse waren; dafür hat sich der Begriff „Big Data“ eingebürgert. Die vorliegende Arbeit demonstriert eine spezifische Ingenieur-Anwendung von Big Data; sie besteht aus zwei Teilen, der erste davon ist von unmittelbarem Interesse für alle Prozesse beim Monitoring von Parametern: Es handelt sich um sehr lange Folgen von Messdaten periodisch aufgenommen über längere Zeitspannen. Die Frage nach der Zuverlässigkeit steht immer im Raum, etwa von möglichen Fehlern eines Sensors oder der Übertragung des Signals. Dieser erste Teil der Arbeit befasst sich mit der Identifizierung von vermutlich fehlerhaften Abschnitten. Der zweite Teil erscheint vordergründig nur von speziellem Interesse für die Industrie von Abgasfiltern für Verbrennungsmotoren zu sein; etwa für Hersteller und Betreiber, um die Voraussage der nächsten fälligen Aschereinigung zu präzisieren. Bei genauerer Betrachtung erkennt man jedoch eine spezielle Lösung eines Ingenieurproblems von generellem Interesse: Die Erkennung und Verarbeitung von Signalen (Daten), deren Intensität Größenordnungen unterhalb des Rauschpegels liegt. Die erforderlichen Datenmengen für diese Arbeit wurden vom VERT-Verein zur Verfügung gestellt, einer Schweizer Zertifizierungsorganisation, die der jeweils besten verfügbaren Technologie verschrieben ist.

1 RECHTFERTIGENDE UND ERKLÄRENDE VORBEMERKUNG

FÜR MITGLIEDER UNSERER INGENIEURZUNFT, DIE SICH NICHT MIT VERBRENNUNGSVORGÄNGEN BEFASSEN

„Big Data“ ist gerade das hoch aktuelle Thema; es handelt sich dabei um überaus rechenaufwendige statistische Themen, wovon ein spezielles dargelegt wird, dessen Ursprung im Tunnelbau wurzelt, nämlich in der Betriebserlaubnis für die Baustelle des 2016 eröffneten Eisenbahntunnels durch den Sankt Gotthard [1]. Voruntersuchungen der SUVA (=Schweizerische Unfallversicherungsanstalt), dem Pendant der AUVA in Österreich, das aber als Behörde zusätzlich noch die Agenden unseres Arbeitsinspektorates wahr nimmt, hatten die Unmöglichkeit ergeben, die vorgeschriebene Mindestqualität der Luft in der Baustelle durch Luftwechsel zu erreichen, also mussten Diesel-Abgase entgiftet werden [2].

Die vorliegende Arbeit stellt beispielhaft die Anwendung von „Big Data“ dar, die aus den Monitoring-Daten von Nachrüstungen mit Abgasfiltern gewonnen wurden; dieses Retrofit begann mit den Arbeiten für die Baustellen-Betriebserlaubnis zum Sankt Gotthard-Tunnel wegen der erwähnten Unmöglichkeit die geforderte Luftqualität durch Luftwechsel zu erreichen. Diese Wurzel der verwendeten Daten möge als Rechtfertigung angesehen werden für die Veröffentlichung genau in dieser Monographie zum Baustellenbetrieb.

Da nur eine Teilmenge der Menge aller Mitglieder der Ingenieurzunft sich berufsmäßig mit Verbrennungsvorgängen befasst, die ÖIAZ aber sich an das gesamte Ingenieurpublikum wendet, wird hiermit um Verständnis und Nachsicht von Verfahrenstechnikern und Motoreningenieuren gebeten, wegen der nachfolgend etwas kursorischen, oberflächlich erscheinenden Beschreibung.

Idealisierung bildet den Kern aller Bereiche des Ingenieurwesens; bei der idealen, vollständigen Verbrennung gäbe es doch nur Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) als Verbrennungsprodukte, wir hätten gar kein Abgasproblem. Da es die vollständige Verbrennung trotz aller Anstrengung nicht gibt, bleiben auch Reste von Kohlenstoff (= Ruß), von Kohlenwasserstoffen (C_mH_n), teilweise Kohlenmonoxid (CO), von Ballaststoffen (sowohl aus den Treibstoffen wie aus dem Schmieröl) im Abgas übrig. Darüber hinaus gibt es bei hoher Verbrennungstemperatur Verbindungen von Sauerstoff und Stickstoff (NO_2 , NO und N_2O), wobei Stickstoffdioxid (NO_2) in letzter Zeit zum Politikum wurde, weil es selbst in geringer Konzentration geruchsintensiv ist, weswegen es sich für die Mobilisierung der Öffentlichkeit besonders eignet. Hingegen wissen wir aus den Erkenntnissen der Arbeitsmedizin, dass die vom Verkehr verursachten Stickoxidkonzentrationen wohl ärgerlich aber eher auch für Kranke und Kinder als ungefährlich einzustufen sind – im Gegensatz zu den aller kleinsten Feststoffpartikeln, deren Hauptanteil aus elementarem Kohlenstoff (Ruß) besteht.

Gesetzlich limitierte Substanzen im Abgas sind: a) CO (Kohlenmonoxid), b) HC (unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffe), c) NO_x (Stickoxide, Sammelbegriff), d) PM (Partikel nach Masse bestimmt), e) PN (Partikel nach Anzahl bestimmt).

Partikelmasse und Partikelanzahl: Seit 2009 wird die Konzentration von Partikelmasse im Abgas von der EU geregelt; als Kriterium galt „PM10“ [mg/m^3], d.h. die Masse aller Partikel, deren Durchmesser kleiner als $10\ \mu m$ ist, wird bestimmt; es handelt sich also um ein Summenkriterium. Die Verschärfung der gesetzlichen Anforderungen, den die Motoreningenieure in nahezu magischer Weise (ohne

„cheating“) gerecht wurden, erwies sich vom medizinischen Standpunkt, also für die Gesundheit, als wenig wirksam. Die aller kleinsten Teilchen im Nanometer Bereich (1 Nanometer, $1 \text{ nm} = 0,001 \mu\text{m} = 0,000\,001 \text{ mm}$) fallen trotz der großen Zahl nicht ins Gewicht, die Masse ist vernachlässigbar. Gerade gegen diese aller kleinsten Feststoffteilchen (vorwiegend Ruß) besitzt unser Körper keinen Abwehrmechanismus, sie gehen mit der Atmung bis in die Alveolen, wovon ein Teil schädigend in die Blutbahn kommt.

Wegen der Unsicherheit der Messung über die Masse musste auf eine Methode der Nuklearphysik zurückgegriffen werden: Nämlich nach Größenbereichen trennen und dann zählen (PN = number criterion - das mit Euro 6 eingeführt wurde). Die „ultrafeinen“ Nanopartikel waren durch die Verbesserung der motorischen Effizienz eher mehr geworden, während die größeren Partikel ($>1\mu\text{m}$) nahezu eliminiert wurden als Folge der Common-Rail Hochdruck-Einspritzung des Treibstoffes (2000 bar und sogar höher), die noch dazu zwecks Annäherung an den ideellen Carnot-Prozess bis zu 5 mal während jedes Arbeitstaktes erfolgt. Die Nanopartikel lassen sich aber (vorläufig) durch motorisch konstruktive Maßnahmen oder Treibstoffzusätze nicht eliminieren, dazu bedarf es geeigneter Filter! Ein Filter möge nicht mit einem Sieb verwechselt werden, die „Löcher“ sind um ein Vielfaches größer als die einzufangenden Teilchen (größenordnungsmäßig vorzustellen: Luft strömt mit schwebenden Tischtennisbällchen durch eine Scheune mit offenen Toren).

Das Kernstück des Filtersystems bildet das keramische Substrat, wobei die Bezeichnung „System“ wegen der Begleitmaßnahmen für die Funktion durchaus berechtigt ist. Die prinzipielle Filterfunktion ist aus den folgenden Abbildungen von CORNING zu erkennen:

1982
Corning

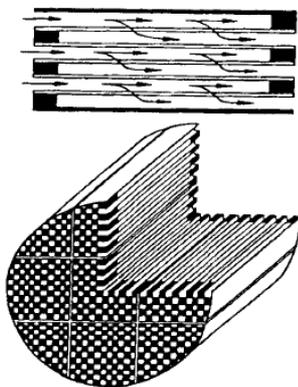
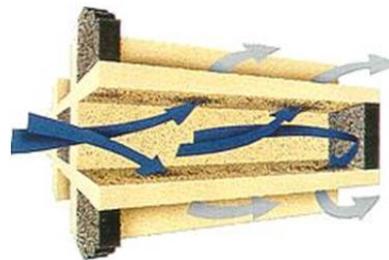


Abbildung 1

Aus der skizzenhaften Zeichnung ist der grundsätzliche Aufbau des Filtersubstrats, das den Kern des Filters bildet, erkennbar: Ein Zylinder aus poröser Keramik mit parallel verlaufenden geradlinigen Kanälen, die abwechselnd am Ende geschlossen sind; dadurch wird das Abgas durch die porösen Wände gepresst.

Klassischer Wandstromfilter (CORNING 1982)



- Filtration Effectiveness > 99.9 % if pore size < 15 µm
- can be used for all Diesel Engines – new and in-use
- VERT certified in Switzerland and many other countries

Abbildung 2

Diese schematische Abbildung illustriert die Funktion des Wandstromfilter-Filters

Die Filtersubstrate sind zylindrische, extrudierte Körper aus poröser Keramik, wie in Abbildungen 1 und 2 dargestellt, mit geraden Kanälen, die wechselseitig verschlossen sind, sodass das Abgas durch

die Wände gepresst wird. In diesen sammelt sich die Schwebstoffe $\sim 99,9\%$ Ruß an, bilden ein Filterkuchen, der von Zeit zu Zeit abgebrannt werden muss, ein Vorgang, der „Regeneration“ genannt wird.



Abbildung 3

Bilder von realen Substrate; es handelt sich um zwei unterschiedliche Fabrikate die Zelldichte liegt bei 300-400 cpsi (=cells per square inch – d.s. etwa 50 -65 Zellen pro cm^2), die Wandstärke beträgt einige Zehntel Millimeter, also äußerst filigrane Bauteile; alle Euro 6/VI-Fahrzeuge sind mit solchen Filtern ausgestattet.

Man beachte die erhebliche mechanische Beanspruchung dieser höchst filigranen Bauteile in Fahrzeugen, speziell in Baumaschinen, dazu kommt aber noch zusätzlich eine nicht minder große thermische Beanspruchung: Ruß ist schwer entzündlich, $\sim 650\text{ }^\circ\text{C}$, wenn er aber einmal brennt, dann erfolgt der Abbrand mit hoher Temperaturentwicklung $\sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$! Der im Filter als Filterkuchen gesammelte Ruß muss nämlich von Zeit zu Zeit abgebrannt werden, dafür muss man ihn zünden.

Die Motorenbauer wollen aber für die Steigerung des Wirkungsgrades die Abgastemperatur so niedrig als möglich halten: $t_{\text{abg}} < 200\text{ }^\circ\text{C}$, sie sprechen in ihrem speziellen Slang zur Verwirrung aller anderen Ingenieure und Physiker von „Niedertemperaturverbrennung“, meinen aber nur niedere Abgastemperatur – die klassischen Überlegungen der elementaren Thermodynamik von Nikolas Leonard Sadi Carnot (1776 -1832) [3] setzen sie nicht außer Kraft. Als Folge der konstruktiv gewollten niederen Abgastemperatur ergibt sich das Problem den im Filtersubstrat aufgefangenen Ruß zu entzünden, sobald das Substrat voll ist und daher ein Gegendruck entstünde, der den Motor abwürgen würde. Verschiedener Kunstgriffe bedient man sich dafür, z.B. vorher gebildetes NO_2 katalytisch zum Zerfall auf NO und Sauerstoff in statu nascendi zu bringen, oder auch temporäre Treibstoffeinspritzung vorzunehmen, um damit eine Verbrennung auszulösen oder Zugaben von katalytisch wirkenden Additiven zum Treibstoff – diese Kunstgriffe, um den beladenen Filter zeitgerecht zum Abbrennen des Rußkuchens zu bringen, rechtfertigen den eingangs erwähnten Begriff „Filtersystem“. Zusätzlich muss noch der gleichmäßige Abbrand im rauen Betrieb sichergestellt werden, weil andernfalls eine graphitische Verkokung auftreten kann, welche das effektive poröse Volumen verkleinert und letztlich zu Schäden verschiedener Art führt. Das Abgas enthält zwar hauptsächlich unverbrannten Ruß als Schwebstoff, doch im Treibstoff ist auch Asche, früher im niedrigen Promille-Bereich, heutzutage in Europa etwa 1 Promille vorhanden. Grob gerechnet lässt sich aus dem Aschegehalt des Treibstoffes abschätzen, wann das Filtersystem für die Reinigung von Asche ausgebaut werden soll (ungefähr nach 500 bis 1000 Regenerationszyklen).

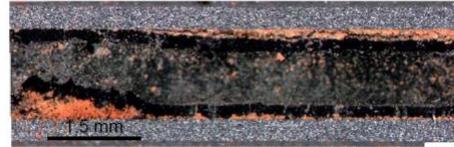
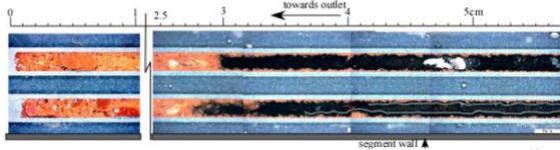


Abbildung 4

Die Filterbelastung, Ruß und Asche, im Längsschnitt: a) zeigt deutlich, wie die schweren Aschepartikel sich am Ende des Kanals am Pfropfen anlagern, während b) die mehr oder weniger gleichmäßige Ablagerung der Rußpartikel an der Wand demonstriert. (Quelle: C. Grünzweig, Neutronen Imaging Group, Paul Scherrer Institut, PSI, CH 5232 Villigen, Schweiz)

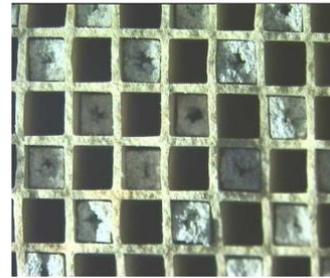


Abbildung 5

Die Filterbelastung im Querschnitt verdeutlicht das Zuwachsen des Filters: die Rußablagerung wird durch Regeneration (=Abbrennen des Rußes) behoben, wobei auch andere Schadstoffe, wie unverbrannte Kohlewasserstoffe mit verbrennen; hingegen für die Entfernung nichtbrennbarer Ablagerungen muss von Zeit zu Zeit der Filter ausgebaut werden, um in speziellen Vorrichtungen gereinigt zu werden.

Aus der bisher dargelegten Übersicht erwächst die Bedeutung des gewählten Themas der nachstehenden Arbeit:

Die Verbesserung der Terminbestimmung der Stillstandzeiten von Nutzmaschinen ist ökonomisch überaus wichtig; Flottenmanager sind sich der Bedeutung der „präventive maintenance“ bewusst. Die im Folgenden dargelegte Arbeit befasst sich mit dem Problem aus dem üblichen Daten-Monitoring der Überwachung, aus bisher übergangenen, nicht-verwendeten Daten Signale unterhalb des Rauschpegels zu extrahieren, um wie in diesem Fall den Verlauf der Veraschung im Abgasfilter zu bestimmen. Die präsentierte Methode ist von wesentlich allgemeinerem Interesse, unsere Beschränkung, die auch durch die vorhandenen Daten bestimmt war, erweist sich als Vorteil einer besseren Übersichtlichkeit.

Grundsätzlich, vom Gesichtspunkt des Mathematikers, geht es darum aus stochastischen Daten, einen relevanten stochastischen Prozess zu extrahieren und dessen „Absorbing Barrier“, als einen zeitlichen Erwartungswert für ein Ereignis zu bestimmen, um in der Folge die Wahrscheinlichkeit des Fehler (=Zuverlässigkeit) abschätzen zu können. *Diese Aufgabe ist identisch mit der Abschätzung der Lebensdauer einer für eine Explorationsbohrung in der Arktis errichteten Eis-Insel.*

2 EINLEITUNG

Ausgehend von den Fortschritten in der Mikroelektronik erreichte die heutige Datenverarbeitung bezüglich Mengen und Geschwindigkeiten ein Niveau, das vor einigen Jahrzehnten als utopisch gegolten hätte. Somit wurden statistische Anwendungen möglich, die ursprünglich wohl als logisch richtig aber doch puncto Praktikabilität als „pipe-dreams“ von rein theoretischen Denkern angesehen waren. Interessanterweise hat in diesem Fall die Ingenieurwissenschaft mit der Anwendung gezögert, während die Finanzindustrie die Möglichkeiten rasch erkannte – im Gegensatz zu historischen Entwicklungen. Die vorliegende Arbeit zeigt an einem speziellen Beispiel eine technische Anwendung von „Big-Data“, wie dieser Zweig der mathematischen Statistik vielfach benannt wird. Monitoring von Drücken, Temperaturen, pH-Werten, Konzentrationen, Pegelständen etc. in kurzen periodischen Abständen ist das Um- und Auf der Prozess- und Regeltechnik. Im *herkömmlichen* Fall erfolgt eine Verarbeitung von Signalen, seien es automatische Regelung oder Steuerung, die deutlich über dem Rauschpegel liegen. *Neu im vorliegenden Fall ist die Verarbeitung von Signalen, deren Intensität weit unter dem Rauschpegel liegt.* Das spezielle Beispiel ist besonders einfach, weil nur drei Parameter, nämlich Druck, Temperatur und ein Zeitstempel zu betrachten sind, wodurch es für die Darstellung des Prinzips besonders geeignet ist. Es handelt sich um Daten, die beim Nachrüsten (=umweltrelevantes Aufrüsten) von Dieselmotoren erhoben wurden; in der ÖIAZ wurde mehrfach berichtet, z.B. Chile [4] oder China [5]. Um derartige Nachrüstungen zum Erfolg zu bringen, müssen erhebliche Unterschiede berücksichtigt werden, seien es Baumaschinen oder Autobusse, also Unterschiede in der Anwendung, oder aber in unterschiedlichen klimatischen Verhältnissen, etwa im Hochland von Iran oder im Küstenland von Israel oder gar in einem feuchten Untertagebetrieb. Folglich werden die nachzurüstenden Geräte mit Data-Loggern versehen, Temperatur und Druck werden 500 Bh lang aufgezeichnet, davon werden ca. zwei Drittel für die Auswahl der geeigneten Abgasfilter-Systeme verwendet, während der Rest für die Verifizierung der Funktion aufgeht; genau diese restliche Zeit der Datenaufzeichnung, die der Verifikation, stand für die vorliegende Arbeit zur Verfügung. Insofern als nur die beiden Parameter Druck und Temperatur für einen beschränkten Zeitabschnitt zur Verfügung standen, ist die Arbeit für die Demonstration der Methodik besonders geeignet. Anhand der zur Verfügung gestellten Daten von Nachrüstkampagnen des VERT-Vereins, der weltbekannten Schweizer Zertifizierungsorganisation, konnte die vorliegende Arbeit erstellt werden, wobei über den speziellen Fall hinaus grundlegende allgemeine Überlegungen einfließen.

3 ZIELSETZUNG

3.1 PRIMÄR

Grundlegende, primäre Zielsetzung ist es aus der Datenflut der Messwerte die weit unterhalb des Rauschpegels versteckten interessanten Signale herauszufiltern.

Konkret:

Schadensprävention durch verbesserte Risikoanalyse

3.2 SEKUNDÄR

- Verbesserung der Expertise über Zustand von Filtersystem und Motor
- Tool für ökonomische Flottenkontrolle
- Tool für Konstruktion und Erprobung
- Reduktion der Filtererprobungszeit

Im vorliegenden Fall wird lediglich ein bedeutender Aspekt des ersten Punktes angesprochen.

3.3 SCHADENSPRÄVENTION

Ein wesentlicher Aspekt der Schadensprävention bildet die Kenntnis des zu erwartenden Aschebelegungsverlaufes, der zur Filterverstopfung und damit zum Totalschaden des Motors führen kann. Eine mathematische Methode wurde erarbeitet, wofür ein entsprechendes Computerprogramm hier vorgestellt wird, um Einsicht über die fortschreitende Aschebelegung zu gewinnen. Der Zweck des Abgasfilters ist Feststoffpartikel zu entfernen, die vorwiegend aus unverbranntem Kohlenstoff, also Ruß, bestehen aber auch einen geringfügigen Ascheanteil enthalten. Dieser Ruß muss von Zeit zu Zeit abgebrannt werden, er bindet an der Oberfläche auch andere gasförmige Kohlenwasserstoffe, was ein erwünschter Effekt ist; der Abbrand des Rußes ist keineswegs unproblematisch, z.B. wurde in Kalifornien zufolge eines fehlerhaften Filterabbrandes ein ganzes Dorf in Flammen gesetzt [6].

Es gibt aber unter den Feststoff-Partikeln einen geringfügigen, nicht brennbaren Ascheanteil, der akkumuliert. Wenn dieser zu groß wird, muss der Filter ausgebaut und mechanisch gereinigt werden. Dieser Beitrag beschränkt sich auf diesen einen Aspekt, den Zeitpunkt für den Ausbau richtig zu wählen; die Methodik hat aber teilweise allgemeinen Charakter und reicht weit über das spezielle Thema der Verbrennungsmotor-Abgasfilter hinaus, in die Prozesstechnik generell, wie z.B. das Erkennen und Aussieben von zweifelhaften Messdaten, seien es Sensor oder Übertragungsfehler mittels der Kombination von Streuung und Informations-Entropie.

4 DATEN: ERFASSUNG UND REGISTRIERUNG

4.1 ANWENDUNGSPRAXIS FÜR DIE AUFRÜSTUNG MIT ABGAS-FILTERN

Die Technologie der Nachrüstung von Dieselmotoren mit Abgasfiltersystemen hat ihren Ursprung im VERT-Projekt, von SUVA, AUVA und TBG, somit der Schutzorganisationen der Arbeitnehmer im Vorlauf für den Bau des Gotthard-Tunnels. Es ist nicht übertrieben von Systemen zu reden, weil verschiedenartigste Methoden angewandt wurden, insbesondere auch was den Abbrand des eingesammelten Rußes betrifft. Ruß zündet schwer, brennt aber dann bei hoher Temperatur ab; bei jedem Abbrand, Regeneration genannt, bleibt etwas Asche zurück. Eine unentdeckte Filterverstopfung kann zum Ausfall des Motors der Maschine führen, unabhängig, ob verursacht durch einen Funktionsfehler des Filters oder des Motors (z.B. Schmierölleckage). Folglich war die Überwachung von Druck und Temperatur vor Filter notwendig, insbesondere auch für die Abklärung der Zuständigkeiten bei Fehlern (Motorlieferant oder Filternachrüster). Paul Nöthiger Electronics entwickelte und lieferte diese Vorrichtungen zur Überwachung, später Data Logger genannt. Zunächst begnügte man sich mit Warnlichtern für den Maschinisten der Maschine. Dieser ignorierte oft die Warnung, allerdings waren die Daten im Logger zur Beweissicherung gespeichert; wegen der allfälligen Fahrlässigkeit des Bedienungspersonals wurde zusätzlich auf eine Datenübermittlung (im 10 Sekundenintervall) samt Warnung für die Leitung des Fuhrparks erweitert, bis dann endlich bei den Nachrüstungen z.B. in China (mit schwierig zu erlangender behördlicher Erlaubnis) die Warnsignale per Funk in die Schweiz übermittelt wurden und zwar in Echtzeit, sodass die zuständige Firma für die spezielle Nachrüstung sofort ihrem Monteur vor Ort Anweisungen geben konnte. Mittelwerte und Streuungen bildet der Logger unmittelbar. Da die Daten in der Zentrale gespeichert sind, liegt nun in diesen Datenbanken ein Erfahrungsschatz von Nachrüstungen vor; aus Wettbewerbsgründen sind in Darstellungen dieser Arbeit die Zuordnungen zu den Filterherstellern verschlüsselt.

4.2 ERWEITERTE ANALYSE FÜR MÖGLICHE ZIELSETZUNGEN

Auf dem VERT-Forum, März 2015, an der Eidgenössischen Materialprüfanstalt wurde der Gedanke ventiliert, mehr Information aus den vorhandenen Daten zu destillieren als bloß die relative Häufigkeit der Messwerte, der Warnwerte (Überschreitung und Unterschreitung vorgegebener Grenzen) und die elementaren Parameter von relativer Häufigkeit, Mittelwert und Streuung. Es handelt sich dabei jeweils um zwei große Datenwolken (Druck und Temperatur), wofür die Fragestellung nach versteckten aber *wertvoll-nützlichen Signalen unterhalb des Rauschpegels* gegeben ist. Zunächst besteht die Aufgabe in der Reduktion jener Daten, die vorneherein als unbrauchbar für den vorgesehenen Zweck einzustufen sind.

4.3 ÜBERSICHT DER REGISTRIERTEN MESSDATEN UND DERIVATEN.

Die Messdaten sind – wie bereits erwähnt – im 10 Sekunden Intervall registriert; diese stellen ihrerseits bereits Intervall-Mittelwerte dar. Abgesehen von den primären Messgrößen, nämlich

- Druck, Intervallbereich 50-600 (± 10) mbar
- Temperatur Intervallbereich 50-1000 (± 5) °C

wurden von denselben die folgenden abgeleiteten Größen berechnet

- Mittelwert

- Varianz
- Standardabweichung
- Minimum
- Maximum
- Minimum der ersten Ableitung
- Maximum der ersten Ableitung
- Entropie (Informations- bzw. Kodierungsentropie)
- Effizienz (= ermittelte Entropie/maximal möglichen Entropie)
- Beschränkte Effizienz (standardisierte E. auf die Länge des Messzyklus)

Von diesen 20 abgeleiteten Größen (2 x je 10) wird im Folgenden nur teilweise Gebrauch gemacht, z.B. die Extremwerte der ersten Ableitung, sie werden für erweiterte Zielsetzungen (z.B. Abbrandbeurteilung) vorbehalten.

5 SEGMENTIERUNG UND ELIMINATION VON DATEN GERINGER QUALITÄT

5.1 BETRIEBSZYKLEN

Betriebszyklen wurden definiert jeweils zwischen Einschalt- und Abschaltvorgang. War die Betriebsdauer zu kurz, etwa lediglich beim Umparkieren des Fahrzeuges, so wurde dieser Zyklus verworfen. Im vorliegenden Fall wurde als Kriterium eine Betriebszeit kürzer als zwei Minuten gewählt – ein willkürlich, ingenieurmäßig gewählter Parameter q_1 – eine Parametervariation ist angedacht. Betriebszyklen zu definieren ist universell in der Prozesstechnik eine Notwendigkeit.

5.2 DOPPELTER ZEITSTEMPEL

In den vorliegenden Fällen, der Nachrüstung von Baumaschinen mit Abgasfiltern für Dieselmotoren, kommen sehr starke Stoßbelastungen vor, was gelegentlich zu doppelten Zeitstempeln führt; diese wurden ebenfalls eliminiert. Beim ein- und Ausschalten sind auch doppelte Zeitstempel zu vermuten. Jedenfalls waren Daten mit doppeltem Zeitstempel zu eliminieren; willkürlich wurde entschieden, jeweils das erste Datenpaar von Druck und Temperatur zu halten.

5.3 WARN- UND GRENZWERTÜBERSCHREITUNGEN

Es liegen jeweils zwei parallele Datenreihen, für Druck und Temperatur vor, wofür es Warn- und Grenzwerte gibt. Während Warnwertüberschreitungen lediglich ausgegeben werden, so werden Betriebszyklen mit übermäßigem Anteil an Grenzwertüberschreitungen vollständig verworfen. Bei kurzfristigen Grenzwertüberschreitungen werden hingegen nur die betroffenen Messungen verworfen. Auch in diesem Fall handelt es sich um eine Ingenieur-Entscheidung, wann ein „übermäßiger Anteil“ angenommen wird: $q_2 = 10\%$ ist ebenfalls ein fester wenn auch durch Erfahrung bestimmter willkürlicher Parameter, der variiert werden könnte.

5.4 DATENBEURTEILUNG MITTELS INFORMATIONSENTROPIE

5.4.1 ALLGEMEINE GRUNDLAGE

Varianz bzw. deren Wurzel, die Streuung sind ingenieurmäßiger Standard, um Messungen zu beurteilen. Jeder Ingenieur würde sofort aufmerksam, wenn eine Vielzahl von Messwerten die Streuung Null ergäbe und diese Messwerte ausscheiden. Doch ist dieses Kriterium nicht ausreichend: *Ein einziger abweichender Messwert würde hinreichen, dass die Verfälschung nicht erkannt wird.*

Mittels eines Begriffes aus der Informationstheorie, nämlich der „Informations-Entropie“, lässt sich diesem Mangel begegnen. Dieser Begriff wurde von Claude E. Shannon 1948 eingeführt [7], der damals die gesamte Theorie der Kommunikation bzw. der Information konzipierte¹; die Deduktion läuft ähnlich wie in der kinetischen Gastheorie, worauf hier nicht eingegangen wird. Ingenieure kennen den Begriff ‚Entropie‘ aus der Thermodynamik als Zustandsgröße, wobei die Änderung der Entropie im Vordergrund steht.

5.4.2 ENTROPIE

¹ Für eine kurze Einführung empfehlen wir das Vorlesungs-Manuskript von Marc Uro [10]

Im Gegensatz zur Varianz wird die Entropie auf einer (diskreten) Wahrscheinlichkeitsverteilung definiert. Gegeben einer Menge I und dazugehörigen Punktwahrscheinlichkeiten p_i wird die Entropie H definiert als

$$H = - \sum_{i \in I} p_i \cdot \ln(p_i).$$

Aus den vorhergehenden Überlegungen erlangen wir abgegrenzte Zeitreihen (Betriebszyklen). Vernachlässigt man die Zeit und interpretiert man alle Messwerte als Realisationen einer Zufallsgröße, so kann aus den Messungen eine empirische Verteilung (relative Häufigkeiten) ermittelt werden, die die tatsächliche – unbekannte – Verteilung approximiert. Somit kann für jeden Betriebszyklus eine dazugehörige Entropie berechnet werden.

Betrachten wir die Menge der aufgetretenen Messwerte, so ist es unmittelbar einsichtig, dass die Entropie ihr Maximum in jenem Fall erreicht, wenn die relative Häufigkeit jedes Messwertes gleich ist.

Beispielhaft: Es sei eine Messreihe Q mit dem Wertevorrat der Messwerte $Q_{min} < Q < Q_{max}$; wegen der Unschärfe, also der Messgenauigkeit, sowie wegen der einfacheren Darstellung diskretisieren wir Q , indem das Intervall $[Q_{min}, Q_{max}]$ durch die Zahl m in $m + 1$ Teile zerlegt wird, die mit Q_i bezeichnet werden, wobei für den Index i : $0 < i < m$ gilt. Den derartig diskretisierten Messwerten Q_i werden auf der Basis der relativen Häufigkeiten die Wahrscheinlichkeiten p_i zugeordnet. *Man beachte, dass es sich lediglich um eine Näherung der Wahrscheinlichkeiten handelt, die allerdings im Ingenieurwesen üblich ist.*

Kommt also innerhalb der Messreihe mit insgesamt n Messwerten der Wert Q_i k -mal vor, so setzen wir

$$p_i \sim k/n$$

Im Fall der Gleichverteilung kommt jeder Wert von Q_i mit gleicher Häufigkeit vor, somit sind alle p_i gleich, nämlich

$$p_i \sim 1/m$$

Bei Gleichverteilung erreicht die Entropie, wie bereits erwähnt, ihren maximalen Wert, der sich somit zu

$$H_{max} = \ln(m)$$

ergibt.

5.4.3 EFFIZIENZ

Das Verhältnis der Entropie einer Messreihe zur maximalen Entropie, also zur Gleichverteilung (= weißes Rauschen) wird als Effizienz bezeichnet:

$$\eta := \frac{H}{H_{max}} = \frac{H}{\ln(m)}$$

wodurch eine Normierung stattfindet, somit der Informationsgehalt der verschiedenen Messreihen vergleichbar wird.

5.4.4 BESCHRÄNKTE EFFIZIENZ

Aufgrund der technischen Gegebenheiten der Sensoren, sind die möglichen Messwerte auf einen endlichen Wertevorrat beschränkt. Wir bezeichnen die Anzahl dieser möglichen Werte mit h .

Bei einer Zeitreihe, die $m > h$ Datenpunkte besitzt, würde bei der üblichen Effizienz die maximale Entropie m mögliche Werte unterstellen – was klarerweise unerreichbar ist.

Deshalb führen wir den Begriff der „beschränkten Effizienz“ ein, der dieser Eigenschaft Rechnung trägt:

$$\bar{\eta} := \frac{H}{\ln(\min(m, h))}$$

Diese Größe wollen wir nun – vergleichbar der Standardabweichung – als Ausschlusskriterium für mangelhafte Daten nutzen, ohne jedoch von einzelnen Ausreißern beeinflusst zu werden.

5.4.5 QUALITÄTSTEST

Ein Sensor- oder Übertragungsfehler manifestiert sich in den Messdaten durch besonders niedrige Entropie, da in diesem Fall über längere Zeitintervalle konstante, oder beinahe konstante Werte aufgezeichnet werden. Deshalb sollen Betriebszyklen mit solchen Phänomenen ausgeschlossen werden. Da die Entropie der einzelnen Messzyklen nicht direkt vergleichbar ist, greifen wir auf die beschränkte Effizienz zurück und setzen einen unteren Schwellwert von 0,3 an – jeder Zyklus mit einer beschränkten Effizienz unterhalb dieses Wertes wird somit verworfen. Dieser Wert ist willkürlich aufgrund des vorliegenden Datenmaterials angesetzt und sollte projektspezifisch in Zusammenarbeit zwischen anwendenden Ingenieuren und der Mathematik bestimmt werden.

6 DIE ASCHEBELEGUNG ALS LATENTE INFORMATION IM DATENMONITORING

6.1 ALLGEMEIN

Der VERT-Standard sieht vor, dass bei Retrofit-Kampagnen im Betrieb in regelmäßigen Zeitintervallen – derzeit je 10 Sekunden – der Gegendruck vor dem Partikelfilter sowie die Abgastemperatur gemessen und aufgenommen werden. Während diese Daten schon ausreichen, um Warnungen vor überschrittenen Grenzwerten zu übermitteln, gibt es darüber hinaus in der gesamten Lebensdauer eines Partikelfilters Informationen, die umso wertvoller sind, je zeitnaher oder gar im Voraus sie dem Flottenmanager gemeldet werden. Eine solche Information ist die Aschebelegung des Filters.

Die grundlegende Aufgabe eines Partikelfilters ist das Auffangen des Rußes der unvollständigen Verbrennung; mit Hilfe des Rußkuchens können übrige Schadstoffe (z.B. unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Kohlenmonoxid etc.) gebunden werden. Da jedoch eine übermäßige Verrußung zu einem gefährlichen Gegendruck im Filter und in weiterer Folge zum Schaden am Motor führt, wird der Filter entweder laufend oder zyklisch abgebrannt. Durch die hohe Verbrennungstemperatur des Rußes werden die akkumulierten Schadstoffe chemisch zerlegt – der geringfügige nicht-brennbare Anteil des Rußkuchens lagert sich als Asche ab. Zufolge des wiederholten Abbrennens nehmen die Ablagerungen im Laufe der Zeit zu und führen zu einem erhöhten Strömungswiderstand (somit Gegendruck).

Um die angesammelten Ascheablagerungen wieder zu entfernen, muss der Filter ausgebaut und physisch gereinigt werden – das sollte zweckmäßigerweise im Zuge einer planmäßigen Wartung geschehen. Während eine verfrühte Aschereinigung unwirtschaftlich ist, führt das Gegenteil zu einem Notstop mit ungewissem Schadenspotential, weshalb es vorteilhaft ist den optimalen Zeitpunkt dieses Eingriffes bestimmen zu können.

6.2 METHODIK

6.2.1 *PHYSIKALISCHER GRUNDGEDANKE*

Die Aschebelegung ist nicht direkt messbar, sie korreliert jedoch mit dem Gegendruck im Leerlauf – folglich muss aus den zwei Messreihen (Gegendruck und Temperatur) der Leerlauf erkannt werden. Da die Motorleistung ebenfalls nicht direkt gemessen wird, nehmen wir an, dass mit dem Einsetzen des Leerlaufs eine exponentielle Abkühlung der gemessenen Temperaturen stattfindet. Weiters unterstellen wir, dass die Aschebelegung exponentiell ansteigt – wodurch der Gegendruck im Leerlauf mit der Zeit einhergeht.

6.2.2 *MATHEMATISCHE UMSETZUNG*

In erster Folge gilt es innerhalb der gemessenen Temperaturen jene Zeitintervalle zu identifizieren, in denen die Werte stetig fallen. Anschließend wird in jedem dieser Intervalle versucht eine Exponentialkurve an die Messpunkte anzupassen. Gelingt dies innerhalb einer vorgegebenen Toleranzgrenze, nehmen wir an, dass in diesem Zeitintervall der Motor im Leerlauf betrieben wurde.

Sind die Zeitabschnitte des Leerlaufes bestimmt, wird der dazugehörige Gegendruck als Mittelwert der jeweiligen Druck-Messwerte berechnet. Um eine Verfälschung der Messungen durch Rest-Last zu

Beginn des Leerlaufes zu vermeiden, werden für den Mittelwert jeweils die ersten zwei Messwerte ausgeschlossen.²

Mittels einer exponentiellen Regression der so gewonnenen Zeitreihe des Leerlauf-Gegendruckes können nun Prognosen über den Verlauf der Aschebelegung erstellt werden. Stellt der Motorhersteller einen Grenzwert für den Gegendruck zur Verfügung, kann im Laufe des Filter-Betriebes mit steigender Genauigkeit der Zeitpunkt einer kritischen Aschebelegung vorausgesagt werden.

Betrachtet man in der obigen Regression die Abweichungen zu den Messwerten, können unter Umständen Defekte frühzeitig erkannt werden: so führt zum Beispiel eine Schmierölleckage zu einer unerwartet schnelleren Aschebelegung, was sich als erhöhter MSE (mean square error) der Regression manifestiert.

² Anm. von Prof. David Kittelson (Minnesota), 22nd Conference on Combustion Generated Nanoparticles, ETH, 2018

7 RECHENBEISPIEL

Die in den Abschnitten 5 und 6 erläuterten Verfahren wurden in R [8] umgesetzt und sollen hier exemplarisch auf tatsächliche Messreihen, die uns überlassen wurden, angewandt werden.

Die Messreihen stammen von einer Retrofit-Kampagne, bei der Nutzfahrzeuge mit einem zyklisch regenerierenden Filter aufgerüstet wurden.

Die erste Datenreihe – „A“ – stellt plakativ dar, wie die Berechnung von Entropie die Datenqualität heben kann. Leider hatte der eingebaute Filter einen Defekt, sodass die Berechnung des Leerlaufdruckes und Prognose der Veraschung nicht durchgeführt werden können.

Die zweite Datenreihe – „B“ – illustriert einen funktionstüchtigen Filter: nur eine geringe Anzahl an Messungen werden aufgrund der Entropie verworfen und die Bestimmung des Leerlaufdruckes und Prognose der Aschebelegung stabilisieren sich ziemlich rasch und ergeben sinnvolle Werte.

7.1 DATENBEREINIGUNG

Zur Illustration der Datenbereinigung wurde der Datensatz „A“ verwendet.

Anfänglich wurden 1.228.974 Messungen aufgezeichnet, wovon 288 doppelte Zeitstempel aufwiesen und 872.027 vor dem Einbau des Filters aufgenommen wurden, sodass für die Analyse 356.659 Messungen verbleiben. Unter Berücksichtigung der Kriterien von 5.1 ergeben sich 3.196 Betriebszyklen, wovon wiederum 367 als zu kurz – also unter zwei Minuten Dauer – verworfen werden. Schließlich wurden 71.864 einzelne Messungen und 854 Betriebszyklen verworfen, da sie die vorgegebenen Grenzwerte überschritten haben. (vgl. Abs. 5.3)

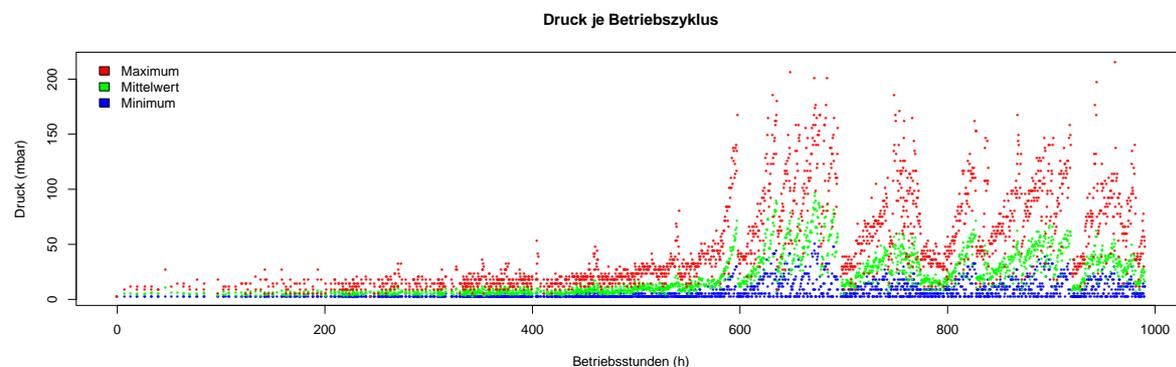


Abbildung 6a – Darstellung des Drucks mittels Minimum, Mittelwert und Maximum von jedem Betriebszyklus

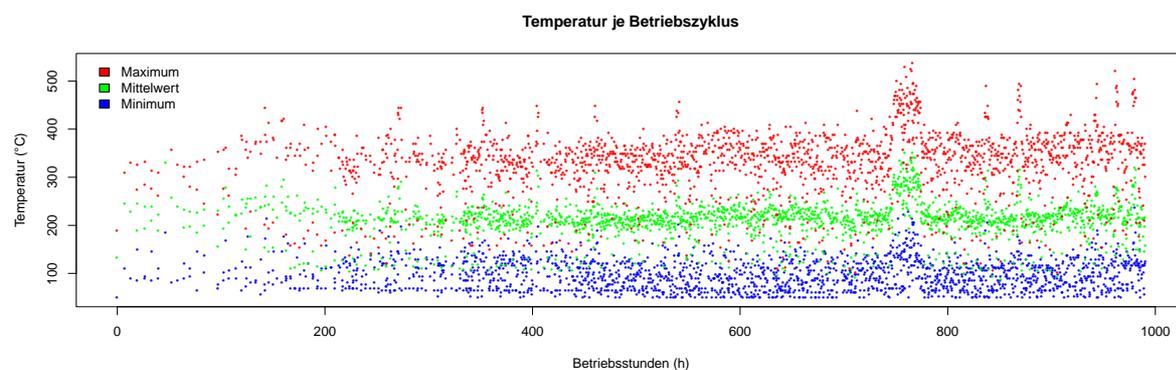


Abbildung 6b – Darstellung der Temperatur mittels Minimum, Mittelwert und Maximum von jedem Betriebszyklus

Einen einfachen Einblick in das bereinigte Datenmaterial liefert das obige Diagramm, in welchem für jeden der 1.975 Betriebszyklen das Minimum, der Mittelwert sowie das Maximum eingezeichnet ist. Dabei können schon die charakteristischen Gegendruck-Muster der Aschebelegung und Regenerierung erkannt werden.

Gleichzeitig erkennen wir, dass zu Beginn der Messungen der notierte Gegendruck ungewöhnlich gering ausfällt. Ein Blick auf die Standardabweichung lässt hier schon erahnen, dass die Daten nicht die erwartete Variabilität aufweisen, wobei die Statistik trotzdem hin und wieder auch Spitzen verzeichnet:

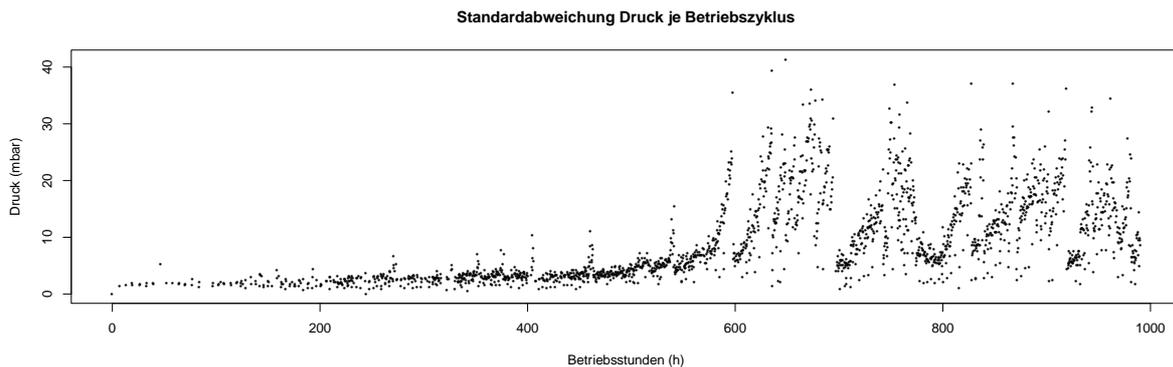


Abbildung 7 – Standardabweichung des Drucks je Betriebszyklus

Abhilfe und letztlich Klarheit schafft die in 5.4.2ff vorgestellte Entropie und darauf aufbauend die beschränkte Effizienz:

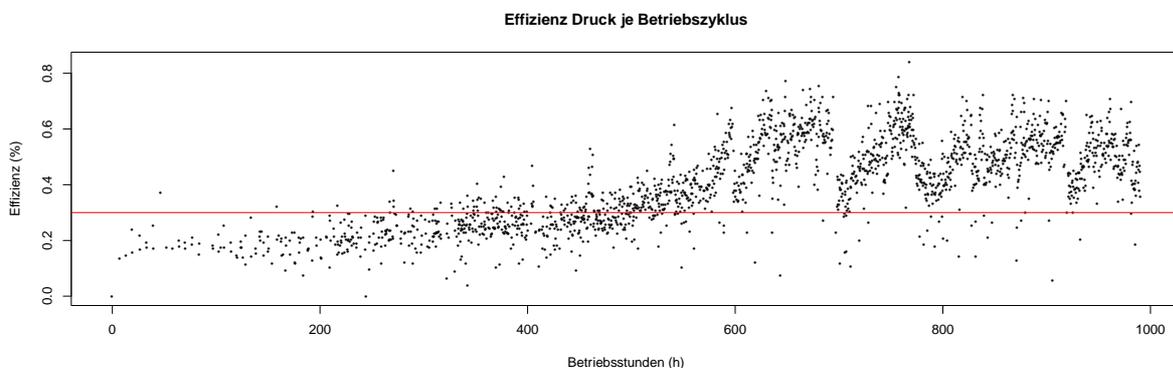


Abbildung 8 – Effizienz des Drucks je Betriebszyklus mit eingezeichnetem Grenzwert

Letztere ist im fraglichen Zeitraum konsequent unter dem von uns vorgeschlagenem Schwellwert von 0,3, was einerseits die verdächtig geringe Variabilität der Messungen bestätigt und andererseits nahelegt, dass die gemessene Standardabweichung durch einzelne extreme Ausreißer beeinflusst wurde.

Da die Quelle der Anomalie nicht nachvollziehbar ist (die Ursache kann angefangen von einer fehlerhaften Datenübertragung, über einen verstopften Sensor bis hin zu einer Filterleckage in einer Vielzahl an Unregelmäßigkeiten liegen), werden die betroffenen Betriebszyklen ebenfalls

ausgeschlossen. (Im Regelbetrieb würde schon kurz nach dem Beginn eine entsprechende Warnmeldung ausgegeben werden.)

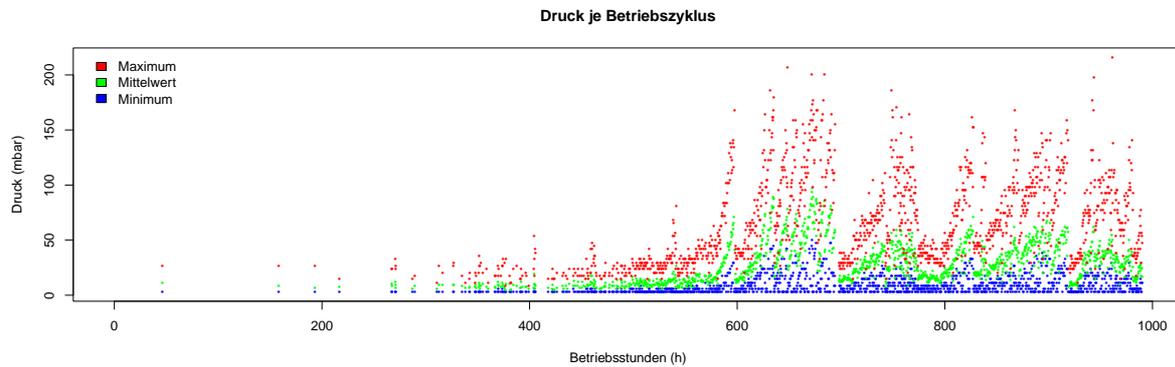


Abbildung 9 – Darstellung des Druckes jener Betriebszyklen, die eine ausreichende Effizienz aufweisen

7.2 DATENANALYSE

Zur Illustration der Datenanalyse wurde der Datensatz „B“ verwendet.

Nachdem die Daten bereinigt wurden, kann mit der Analyse der Aschebelegung fortgefahren werden – dabei folgen wir den Ausführungen in 6.2.2.

Durch Betrachtung der Differenzen in den Messwerten erkennen wir 2486 Zeitintervalle, in denen die gemessene Temperatur stetig abfällt; davon kann in 1343 Fällen eine Exponentialkurve an die Datenpunkte angepasst werden – somit nehmen wir an, dass in diesen Zeitspannen der Motor mit geringer oder gar ohne Last betrieben wurde. Wie in 6.2.2 beschrieben, schließen wir in Folge jeweils die ersten zwei Messungen aus – aus den übrigen wird jeweils der Mittelwert gebildet.

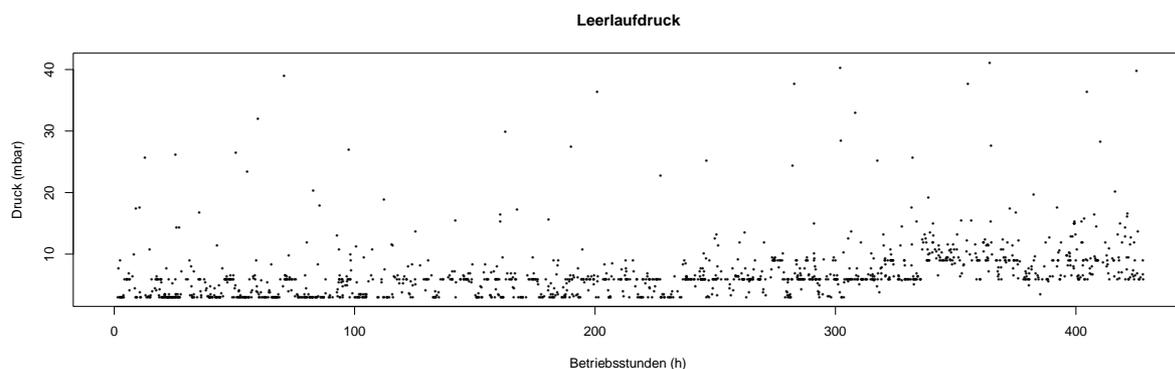


Abbildung 10 – Der ermittelte Leerlaufdruck in Relation zu den Betriebsstunden

Während diese Daten schon selbst Information über den Zustand des Partikelfilters liefern – insbesondere, wenn der Leerlauf-Druck einen vom Hersteller vorgegebenen Grenzwert erreicht – können sie insbesondere für Prognosen über das weitere Verhalten des Filters genutzt werden. Der Gegendruck, der durch Ascheablagerungen bedingt wird, folgt einem exponentiellen Anstieg – somit ist eine exponentielle Regression der ermittelten Druck-Werte zielführend.

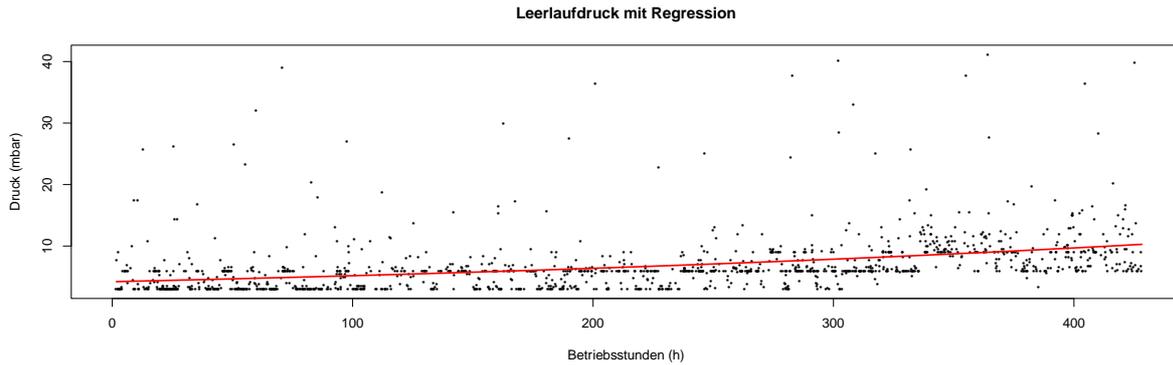


Abbildung 11 – Der ermittelte Leerlaufdruck mit eingezeichneter exponentiellen Regression

Der exponentielle Anstieg ist auf der obigen Graphik eindeutig erkennbar.

Selbstverständlich stellt sich die Frage nach der Stabilität der Prognose – wie stark variiert sie, sobald neue Daten hinzukommen?

Die Regression wurde unter Annahme eines exponentiellen Modells

$$\text{Druck} \sim \exp(a + b \cdot \text{Zeit})$$

berechnet.

Das nachfolgende Diagramm zeigt, dass mit steigender Zahl an Messpunkten sich die Prognose stabilisiert und folglich an Genauigkeit zunimmt.

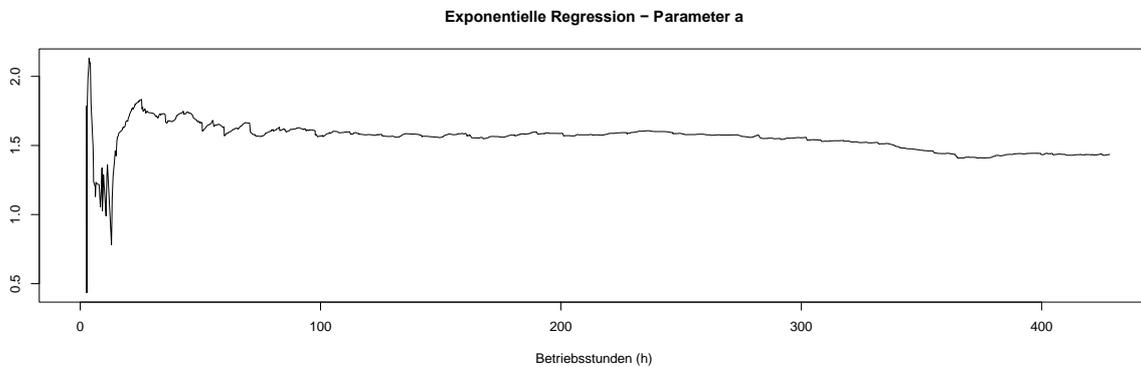


Abbildung 12a – Entwicklung des Parameters a in Relation zu den beobachteten Betriebsstunden

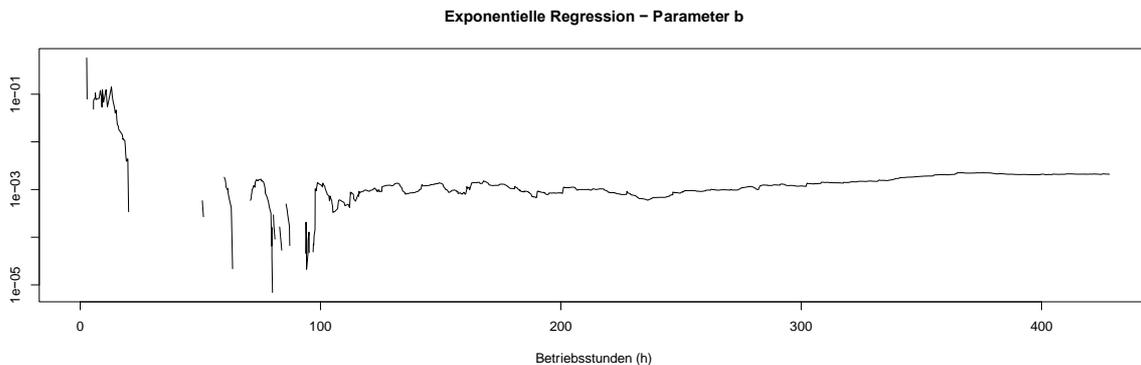


Abbildung 12b – Entwicklung des Parameters b in Relation zu den beobachteten Betriebsstunden

Man erkennt unschwer – vor allem anhand des Parameters b – dass eine Aussage erst jenseits von 100 Betriebsstunden möglich ist und eine stabilere Aussage überhaupt erst ab etwa 200 Betriebsstunden. Diese Werte sind hier natürlich an den einzelnen Datensatz geknüpft – für eine allgemeinere Aussage ist eine statistische Auswertung einer Vielzahl von Messreihen notwendig.

8 SCHLUSSBEMERKUNG

Für eine spezifische technische Anwendung wurde die Nützlichkeit und mögliche Bedeutung von „Big Data“ dargestellt. Man versteht unter dem Begriff „Big Data“ die mathematische Methodik aus sehr großen Datenmengen relevante Informationen zu extrahieren. Im vorliegenden Fall standen Messdaten der Nachrüstung von Verbrennungsmotoren mit Abgasfiltern zur Verfügung. Diese Abgasfilter sammeln in erster Linie Rußpartikel, allerkleinster Größe, nämlich im Nanometerbereich, welche von der WHO als krebserregend (wie Asbest) eingestuft wurden [9]. Der im Filter gesammelte Ruß wird bei entsprechender Belegung abgebrannt, der Filter wird regeneriert. Allerdings sind nicht nur brennbare Substanzen im Abgas; die Asche, etwas weniger als ein Promille der Schwebstoffe, verbleibt im Filter, sie trägt zur Erhöhung eines für den Motor schädlichen Gegendruckes bei und muss daher in entsprechenden Zeitabständen entfernt werden. Zu diesem Zweck muss der Filter ausgebaut werden, um in Spezialeinrichtungen gereinigt zu werden. Für den Betreiber eines Nutzfahrzeuges oder einer Arbeitsmaschine ist die präzise Voraussage eines notwendigen Stillstandes von erheblichem Interesse.

Die vorliegende Arbeit ermöglicht eine deutliche Verbesserung dieser Voraussage, indem aus dem Datenmonitoring nicht nur die Warnwerte, wie bisher, herangezogen werden. Aus den „Datenwolken“ wurden die Druckwerte bei Leerlauf eruiert und daraus mittels exponentieller Regression der Anstieg des vom Ascheanteils bedingten Gegendruckes ermittelt, was dem Motoreningenieur die Möglichkeit gibt, die Zeit bis zur notwendigen Reinigung abzuschätzen und allenfalls auch ein Kriterium für eingetretene Fehler liefert, z.B. ungleichmäßiger Abbrand bei der Regeneration oder eine aufgetretene Schmierölleckage, etc.

Wegen der für Big Data verhältnismäßig kleinen Datenmengen in der vorliegenden Arbeit gewinnt die Darstellung an Übersichtlichkeit, wodurch die Methodik besser zutage tritt, aus den Datenwolken des Monitorings relevante Informationen zu gewinnen:

Zuerst müssen unbrauchbare Messdaten eliminiert werden, hierauf sind gemäß Zielsetzung die Messdaten auszusondern, die für den vorgesehenen Zweck nicht relevant sind und erst dann wird eine Regression gemäß der plausiblen physikalischen Natur des Problems sinnvoll.

Immerhin lassen sich auf diese Weise Messdaten nützen, die ein bis zwei Größenordnungen unterhalb des Rauschpegels liegen.

DANKSAGUNGEN

Die Autoren sind Dr. h.c. Andreas Mayer dankbar für seine Unterstützung, hilfreiche Diskussionen im Zuge der Analysen sowie für die Bereitstellung der Messdaten gemeinsam mit Herrn Paul Nöthiger – dem Erfinder des Data Loggers.

Diese Arbeit wurde vom VERT-Verein im Rahmen des „Datalogger Statistics“-Programms finanziell unterstützt.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. T. Elsasser und A. Grass, *Drei Weltrekorde am Gotthard*, Baden, Schweiz: Verlag Hier und Jetzt GmbH, 2016.
- [2] F. J. Legerer und A. C. R. Mayer, „Vom Tunnelbau zur Verbesserung der Luft-Güte in Weltstädten,“ *ÖIAZ*, Bd. 161, Nr. 1-12, pp. 143-148, 2016.
- [3] S. Carnot, *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines proper à developper cette puissance*, Paris: Bachelier, 1824.
- [4] A. Reinoso und Transantiago, „Clean-up of Diesel-Bus Exhaust in Santiago de Chile,“ *ÖIAZ*, Bd. 152, Nr. 3, pp. 72-73, 2007.
- [5] L. Xian, „Einführende Darstellung der Regulierungsmaßnahmen zu den Rußemissionen von Baumaschinen in Beijing – das Zusammenarbeitsprojekt zwischen der VR China und der Schweiz,“ *ÖIAZ*, Bd. 157, Nr. 6, pp. 25-30, 2012.
- [6] „Cleaire LongMile Particulate Matter Filter Recall,“ September 2012. [Online]. Available: <http://www.arb.ca.gov/msprog/mailouts/msc1220/msc1220.pdf>. [Zugriff am July 2019].
- [7] C. E. Shannon, „A mathematical theory of communication,“ *The Bell System Technical Journal*, Bd. 27, Nr. 3, pp. 379-423, 1948.
- [8] „R-Project,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.r-project.org>.
- [9] WHO / International Agency for Research on Cancer, *IARC: Diesel engine exhaust carcinogenic*, 2012.
- [10] M. Uro, „Basic Concepts in Information Theory,“ 2017. [Online]. Available: https://web.archive.org/web/20180826213951fw_/http://www-public.imtbs-tsp.eu/~uro/cours-pdf/poly.pdf. [Zugriff am Juli 2019].

AUTOREN

Dipl.-Ing. Lukas Fabrykowski
Triangular IT Solutions e.U.
lukas@fabrykowski.com
Carlbergergasse 71/9
1230 Wien

Dipl.-Ing., Dr. techn. Friedrich Legerer
VERT-Verein, Ehrenmitglied
ztdr.legerer@aon.at
Rotenturmstraße 21/15
1010 Wien