Mustererkennung beim geodätischen Monitoring im Rahmen eines Frühwarnsystems

Pattern Detection in the Context of a Geodetic Monitoring System

Boris Resnik

Das Ergebnis eines typischen Monitorings sind im Allgemeinen experimentelle Kennwerte, die bestimmten Zeitpunkten zugeordnet werden können. Auf Basis dieser Zeitreihe erhält man eine Vorstellung über den aktuellen Zustand des Überwachungsobjekts. Generell handelt es sich dabei um das Ermitteln von außergewöhnlichen Ereignissen bzw. signifikanten Abweichungen vom „Normalverhalten". Dies stellt prinzipiell eine Aufgabe dar, in einer Menge von Daten bestimmte Regelmäßigkeiten oder Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Da neben der Alarmierung nach dem Überschreiten zuvor definierter Schwellenwerte oftmals das Ziel darin besteht, bei einem erfassten Prozess steuernd einzugreifen, handelt es sich grundsätzlich um eine Echtzeitanalyse. In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten einer passenden Klassifizierung der gesuchten Änderungen bzw. Deformationen sowie exemplarisch die Algorithmen für eine weitgehend automatische Bestimmung von ausgewählten Mustern in dieser Art behandelt.

Schlüsselwörter: Monitoring, Zeitreihenanalyse, Mustererkennung, Erkennung von Sprüngen und Ausreißern, statistische Analyse, Signifikanzanalyse

As a result of a typical monitoring task, data is obtained that can be assigned to certain instants of time. On the basis of these time series, the current state of the monitored object can be estimated. Generally this is achieved by identifying significant events or deviations from a pre-defined "normal" behavior. This implies that, due to the continuous measurements, a big amount of data is to be processed in real time, to make it possible to send alerts to the persons in charge or even to trigger an electronic regulation system specific to the identified event or deviation. In this paper, possibilities to classify those deviations (or deformations) and some principal algorithms for a nearly automatic detection of defined patterns are discussed.

Keywords: Monitoring, time series, pattern recognition, detection of jumps and outliers, statistical analysis, significance analysis

1 EINFÜHRUNG

Dank neuer Materialien und Technologien konnte sowohl im Bauwesen als auch im Maschinenbau in den letzten Jahrzehnten ein enormer Fortschritt erzielt werden. Die Strukturen moderner Ingenieurbauwerke werden deswegen immer filigraner und graziler, während ihre statischen und dynamischen Belastungen kontinuierlich zunehmen. Eine ausreichende Sicherheit für diese Objekte kann nur durch eine effektive Qualitätskontrolle gewährleistet werden. In den letzten Jahren wurde mehrfach nachgewiesen, dass ein kontinuierliches Monitoring mithilfe geodätischer und geotechnischer Sensoren sehr gut geeignet ist, um Anhaltspunkte in Bezug auf die Funktionsfähigkeit von Ingenieurbauwerken durch eine weitgehend zeitnahe Analyse von vielfältigen Sensordaten zu erhalten /Resnik 2011/. Bei

unikalen und besonders gefährdeten Bauwerken gehört diese Vorgehensweise inzwischen zu einem anerkannten Standard.

Als Ergebnis eines solchen Monitorings erhält man allgemein Messdaten, wie Koordinaten, Neigungen, Eigenfrequenzen, Dämpfungsparameter usw., die bestimmten Zeitpunkten zugeordnet werden können. Auf der Basis dieser Werte muss eine Vorstellung über den aktuellen Zustand des Überwachungsobjekts im Sinne der Kategorien „gut“ oder „sicherheitskritisch“ gewonnen werden. Während die messtechnische Realisierung von Online-Messungen durch die rasante Entwicklung der Mikroelektronik, Computertechnik und Kommunikation in den letzten Jahrzehnten einfacher wurde, sind viele Fragen der Datenanalyse und insbesondere der Echtzeitbeurteilung des Zustands anhand solcher Messdaten noch nicht gelöst und als Gegenstand der angewandten Forschung zu betrachten. Generell handelt es sich dabei um das Ermitteln von außergewöhnlichen und signifikanten Ereignissen (z. B. Sprüngen, Verschiebungen, Änderungen der Trend- bzw. Streuungsparameter) in den erhaltenen Zeitreihen.

2 BESONDERHEITEN DER ECHTZEITAUSWERTUNG BEIM MONITORING

Die üblichen kommerziellen Softwarepakete für das Monitoring bieten neben dem Ansteuern der Sensoren, der Datensammlung und -aufbereitung auch eine Visualisierungskomponente, mit der die erfassten Zeitreihen in Echtzeit dargestellt werden können. Eine umfassende visuelle Analyse von Messdaten eines typischen Monitorings, das mithilfe von mehreren hundert Sensoren durchgeführt wird, ist jedoch nicht mehr möglich, weil sie schon allein wegen der enormen Längen der gewonnenen Zeitreihen mit dem „gesunden Menschenverstand“ nicht mehr zu bewältigen ist. Eine umfangreiche Recherche hat gezeigt, dass eine weitergehende automatische Analyse der Zeitreihen, bis hin zu einer automatischen Interpretation, bei den kommerziellen Softwareanbietern jedoch nicht stattfindet. Bei den meisten Softwarepaketen können lediglich Grenzwerte für Verschiebungsbeträge festgesetzt werden, deren Überschreitung zu automatisch generierten Alarmmeldungen führen (vgl. /Stempfhuber 2009/).

Für eine weitgehend vollständig automatische Analyse der Messdaten eines Monitorings fehlen offensichtlich noch zuverlässige Algorithmen. Die interaktiven, computergestützten Auswertestrategien dieser Art sind jedoch inzwischen in vielen Anwendungsgebieten von der Gesichts- bis zur Spracherkennung (*Abb. 1*) zu finden. Für die Lösung dieser Probleme wurden in den letzten Jahrzehnten unterschiedliche mathematische Algorithmen entwickelt, die jedoch für jede spezielle Anwendung eine fachbezogene Anpassung erfordern. Eine fundierte Darstellung von statistischen Hintergründen und Methoden, mit denen abrupte Änderungen bestimmter Charakteristika von Abtastungen eines stochastischen Prozesses detektiert werden können, finden sich z. B. in /Basseville & Nikiforov 1993/.

Im Bereich der Deformationsanalyse wurden in den letzten Jahrzehnten besonders im Bereich der Ausgleichung von Deformationsnetzen große Fortschritte gemacht (vgl. /Niemeier 2008/, /Heunecke et al. 2013/). Unter Netzausgleichung wird dabei meistens die Anwendung der Ausgleichsrechnung auf geodätische Messungen verstanden, um die optimalen Koordinaten in einem Punktnetz zu bestimmen. Obwohl diese Verfahren meist für das Postprocessing entwickelt wurden, können sie inzwischen erfolgreich für eine Echtzeitauswertung, besonders unter Anwendung der Mustererkennung /Fletling 2010/, eingesetzt werden.

Ein benachbartes Forschungsfeld zu den oben genannten stellt die Detektion von Ausreißern in den vorhandenen Zeitreihen dar. Neben wahrscheinlichkeitsbasierten Methoden werden dafür beispielsweise auch neuronale Netze, Fuzzy-Logik und Wavelet-Transformationen eingesetzt /Cateni et al. 2008/. In der Geodäsie existiert ebenfalls eine lange Tradition in der Auswertung von Zeitreihen geodätischer Sensoren (vgl. /Heunecke et al. 2013/). Bei mathematischen Verfahren für die Detektion von Ausreißern gibt es jedoch einige prinzipielle Unterschiede zur Deformationsanalyse. Eine Deformation stellt eine reale signifikante Änderung eines kontrollierten Parameters dar, die durch einen inneren oder äußeren Einfluss auf das untersuchte Objekt verursacht wurde. Diese Änderung weist entweder einen relativ langfristigen (z. B. Setzung oder Kippen des Bauwerks) oder einen periodischen Charakter (z. B. bei den temperaturabhängigen Ausdehnungen des Bauwerks) auf. In der Statistik spricht man von einem Ausreißer, wenn ein Messwert oder Befund nicht in eine erwartete Messreihe passt oder allgemein nicht den durch den Streuungsbereich definierten Erwartungen entspricht. Mathematisch gesehen stellt jede auftretende Deformation kurzfristig einen Ausreißer dar. Eine festgestellte Änderung wird erst nach dem Feststellen eines langfristigen bzw. periodischen Charakters als eine Deformation betrachtet. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Folgenden ein Ausreißer als eine

Abb. 1 | Typische Beispiele der Mustererkennung

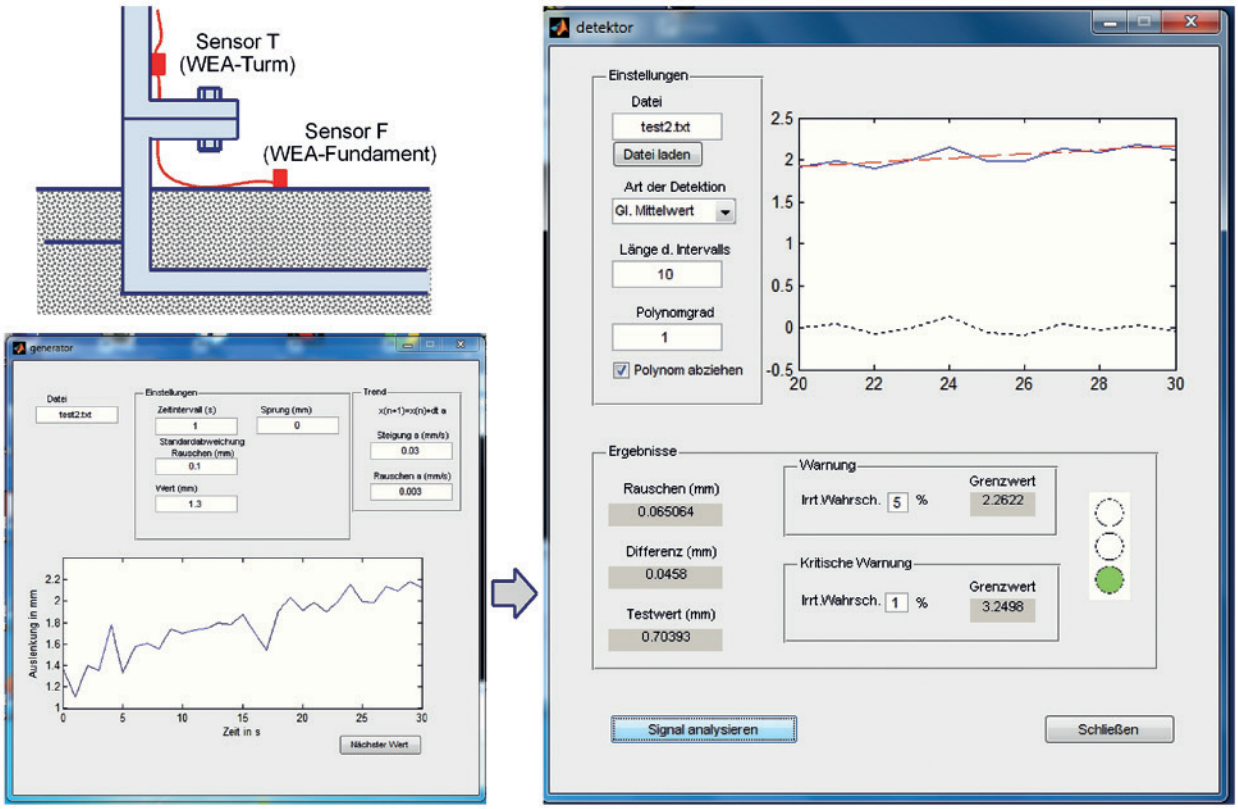
signifikante, aber (im Unterschied zu einer Deformation) imaginäre Änderung eines kontrollierten Parameters ohne einen langfristigen oder periodischen Charakter verstanden wird. Somit wird auch angenommen, dass ein Ausreißer in den erfassten Monitoringdaten nicht mit dem Objekt selbst, sondern ausschließlich mit dem Messprozess verbunden ist.

Um die ganz unterschiedlichen Szenarien der Echtzeitauswertung beim Monitoring testen und analysieren zu können, wurde vom Autor im Rahmen eines Forschungsprojekts ein spezielles Programmsystem aus zwei Blöcken „Generator“ und „Detektor“ (*Abb. 2*) erstellt. Mit dem erstgenannten Modul können unterschiedliche Datenänderungen nach bestimmten Voreinstellungen simuliert werden. Diese Daten werden dann im Echtzeitmodus von dem zweitgenannten Programm analysiert und bis zur Alarmierung ausgewertet. Im zweiten geplanten Schritt des Projekts wird das Modul „Generator“ durch ein übliches kommerzielles Monitoring-Softwarepaket ersetzt und bei Überwachungsaufgaben zur Zustandskontrolle moderner Windkraftanlagen eingesetzt /Resnik et al. 2013/.

3 DEFORMATIONSANALYSE ALS MUSTERERKENNUNG

Bei einer messtechnischen Überwachung eines Bauwerks ist vor allem sicherzustellen, dass frühestmöglich ein Schaden, ein konstruktiver Mangel oder eine Bedrohung der Sicherheit erkannt wird, damit zeit- und sachgerecht gehandelt werden kann. Je frühzeitiger ein solches außerordentliches Ereignis erkannt werden kann, umso geringer wird die vorübergehende Sicherheitseinbuße bzw. die Funktionsbeeinträchtigung mit damit verbundenen Kosten der Schadensbehebung sein. Während Überwachungsmessungen inzwischen einen sehr hohen Automatisierungsgrad aufweisen, bleibt die Interpretation der Ergebnisse weitgehend dem Experten überlassen. Soll diese ebenfalls einen gewissen Automatisierungsgrad erreichen, z. B. aufgrund der Notwendigkeit, die Situation praktisch in Echtzeit zu beurteilen, ist es erforderlich, das Expertenwissen zu systematisieren und in ein Beurteilungssystem zu entwickeln. Dies stellt prinzipiell eine Aufgabe einer Mustererkennung dar, d. h. einer Fähigkeit, in einer Menge von Daten bestimmte Regelmäßigkeiten oder Gesetzmäßigkeiten zu erkennen. Typische Beispiele für die Mustererkennung sind Gesichts-, Text- oder auch Spracherkennung usw. (*Abb. 1*), die inzwischen jedem Computeranwender gut bekannt sind. Folglich existieren inzwischen zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen zur Lösung dieser Aufgaben und der entsprechenden Algorithmen für die computergesteuerte Realisierung /Niemann 2003/.

Übliche Muster besitzen Eigenschaften (Farbwerte, Abmessungen, Strukturen usw.), die für ihre Zugehörigkeit zu einer Klasse charakteristisch sind. Zur Untersuchung eines interessierenden Sachverhalts sind allerdings einige dieser Eigenschaften besonders wichtig und werden deswegen als „Merkmale“ bezeichnet. Die Zielsetzung der Mustererkennung beim Detektieren von signifikanten Bauwerksdeformationen ist es, die einzelnen gewonnen Werte bzw.



Generator der Messwerte

Detektor der Deformationen

Abb. 2 | Simulation und Analyse von Messwerten

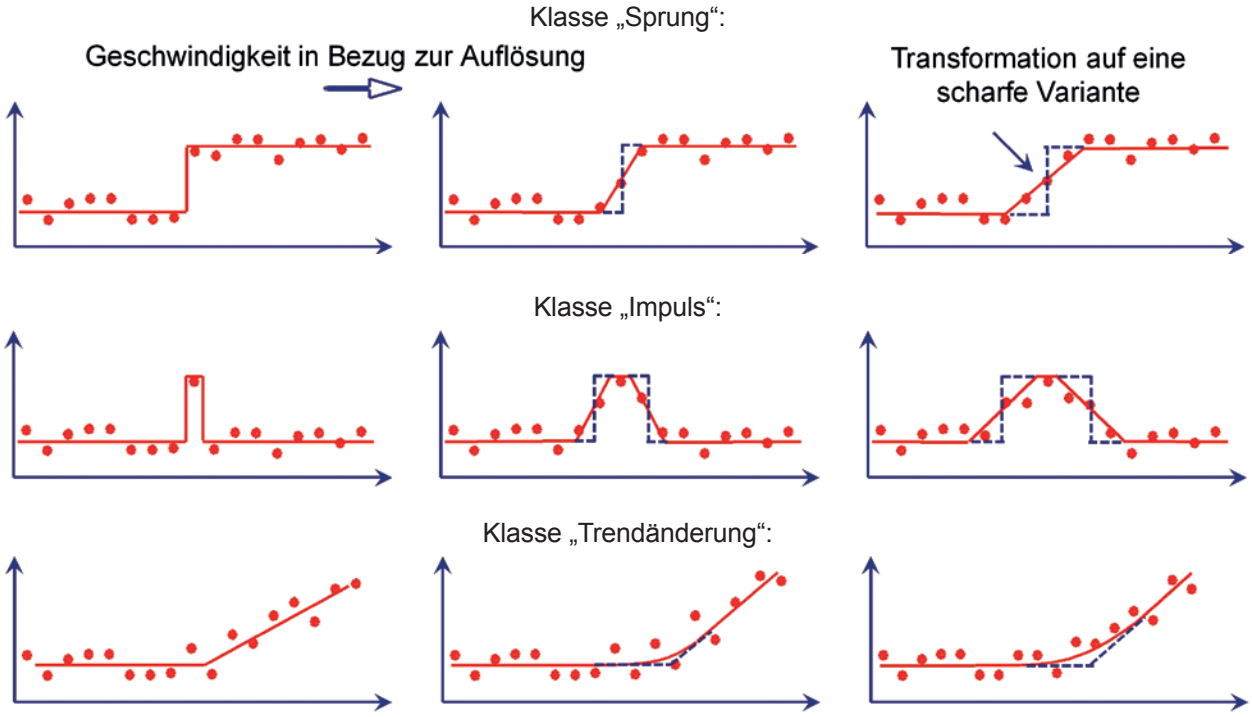


Abb. 3 | Mustererkennung beim Online-Monitoring (exemplarisch)

Gruppen von diesen einer bestimmten Klasse („Sprung“, „Impuls“, „Trendänderung“ in *Abb. 3*) mit bestimmten charakteristischen Merkmalen zuzuordnen. Bei den realen Projekten können selbstverständlich auch beliebige Kombinationen aus den genannten Klassen erscheinen, was ein sicheres Erkennen des Musters zusätzlich erschweren könnte. Zu den charakteristischen Merkmalen unterschiedlicher Klassen gehören z. B. Mittelwert bzw. Streuung in einem vorgegebenen Abschnitt der Zeitreihe, Neigung der angepassten Regressionsgerade usw.

Die Form eines Musters hängt grundsätzlich von der Geschwindigkeit der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse ab, wie die Setzung in Bezug auf die Abtastrate des entsprechenden Sensors (Auflösung der Zeitreihe). So wird ein Setzungsvorgang von der Dauer einer Minute bei der Abtastrate von einer Stunde etwa wie eine Stufe aussehen, während sich der gleiche Prozess bei einer Abtastrate von einer Sekunde eher als eine geneigte Gerade in den Messdaten widerspiegelt. Zur Vereinfachung ist es jedoch sinnvoll, unterschiedliche Ausprägungen dieser Art auf eine scharfe (stufenartige) Variante zu reduzieren (*Abb. 3*). Die Fuzzy-Theorie bildet einen Rahmen zum mathematisch fundierten Umgang mit Mengen, deren Elemente keine eindeutige Zugehörigkeit im klassischen Booleschen Sinne aufweisen. Bei dem Suchen von signifikanten Deformationen könnte diese Vorgehensweise von großem Vorteil sein (vgl. /Heunecke et al. 2013/).

Die erforderlichen Genauigkeiten beim Monitoring sind meistens sehr hoch und gehen fast immer an die Grenze der instrumentellen und verfahrenstechnischen Möglichkeiten. Trotzdem bleibt die unvermeidbare Streuung von Messwerten (Rauschen) oftmals im Größenbereich der gesuchten außerordentlichen Ereignisse (Muster). Die Auswahl des jeweils betrachteten Intervalls ist dabei von einer übergeordneten Bedeutung. Je stärker das Rauschen ist, desto größer sollte das Intervall sein, um eine Deformation bzw. das entsprechende Muster signifikant ermitteln zu können. Die gesuchten Muster können außerdem mit den systematischen bzw. periodischen Vorgängen überlagert werden. Dabei besteht immer die Gefahr, dass die gesuchten Muster falsch interpretiert werden (*Abb. 4*).

Neben der Alarmierung nach dem Überschreiten bestimmter Schwellenwerte besteht das Ziel des Monitorings darin, bei einem erfassten Prozess steuernd einzugreifen, sofern dieser nicht den gewünschten Verlauf nimmt. Der stetige technische Fortschritt hat dazu geführt, dass die Überwachungsaufgaben heute zum Teil als ein Regelkreis angesehen werden, wenn in Abhängigkeit einer festgestellten Reaktion eines Messobjekts unmittelbar eine Aktion eingeleitet wird. Für die Mustererkennung bedeutet dies, dass sie jedes Mal nach dem Eingang eines weiteren Messwerts bzw. einer kleinen Gruppe von Messwerten wiederholt werden muss. Eine Lösung sollte deswegen unbedingt sehr effizient und allgemeingültig sein.

4 KONTROLLE DER TRENDÄNDERUNG BEIM ONLINE-MONITORING

Da die Beschreibung mehrerer Mess- und Auswertungsergebnisse den Umfang des Beitrags übersteigen würde, soll hier exemplarisch nur eine Klasse der möglichen Deformationen, die „Trendänderung“, näher behandelt werden. Die Schätzung der Trendkomponenten stellt eine Regressionsaufgabe dar und erfolgt immer in einem Fenster (einem Intervall). Deswegen könnten grundsätzlich keine Einzelwerte, sondern ausschließlich die Einzelfenster der vorgegebenen Größe miteinander verglichen werden.

Die Vorgehensweise bei der Mustererkennung wird im Beitrag anhand eines typischen Beispiels veranschaulicht. Die Höhe y_t eines

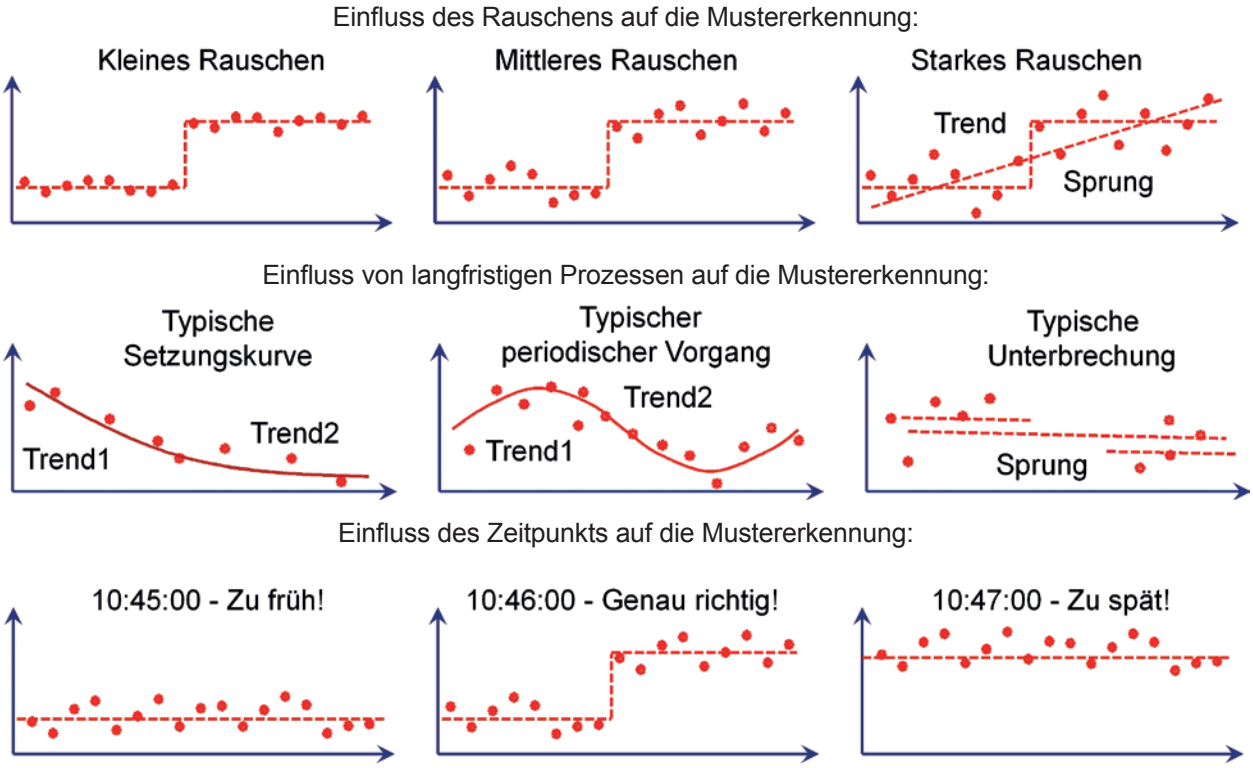


Abb. 4 | Besonderheiten der Mustererkennung beim Online-Monitoring

Messbolzens am Fundament einer Anlage wird im Rahmen eines komplexen Überwachungssystems stündlich (t) mit einem Digitalnivellier vollautomatisch ermittelt. Die entstandene Zeitreihe weist in etwa eine normalverteilte Streuung der Messwerte mit der Standardabweichung σ_y von ca. 1 mm auf. Ab der 43. Messung fand eine konstante Hebung des Fundaments mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,7 mm/h statt (*Abb. 5* oben). Es wird eine Lösung gesucht, um die eventuelle Trendänderung zu detektieren und statistisch nachzuweisen. Es ist davon auszugehen, dass die Messwerte sequenziell beim Online-Monitoring gewonnen werden und beim Feststellen einer Trendänderung sofort eine entsprechende Alarmierung erfolgen muss.

Ein Mustererkennungsprozess lässt sich in mehrere Teilschritte zerlegen, bei denen am Anfang die Erfassung und am Ende eine ermittelte Klasseneinteilung steht. Die Gewinnung von relevanten Merkmalen des Signals für ein Muster geschieht in der Regel empirisch nach Intuition und Erfahrung. Welche Merkmale wesentlich sind, hängt grundsätzlich von der jeweiligen Anwendung ab. Die in diesem Abschnitt betrachtete Lösung der Echtzeitauswertung beinhaltet eine übliche Anpassung einer Regressionsgeraden $y_t = m \cdot t + y_0$ in einem vorangestellten Intervall aus den letzten N Werten, mit m als die gesuchte Steigung, die nach dem Eingang jedes neuen Messwerts nach der Methode der kleinsten Quadrate wiederholt werden muss. Somit stellt die Größe der jeweils ermittelten Steigung m ein typisches Merkmal dar.

Beim Verwenden von mehr als zwei Messwerten und einer entsprechenden Überbestimmung erlaubt diese Vorgehensweise zusätzlich eine Abschätzung der empirischen Standardabweichung s_m der Steigung, die hier als zweites Merkmal des Prozesses zu verstehen ist. Nach dem Erfassen eines neuen Werts für die Höhe bzw. jeder neuen Anpassung der Regressionsgeraden werden die Differenzen von ermittelten Steigungen $d_m = m_i - m_{i-N}$ aus dem aktuellen und vorletzten Intervall aus N Werten und die entsprechende Standardabweichung der Differenz s_{dm} ermittelt. Folglich wird eine Signifikanzanalyse (Student-Verteilung) mit dem Testwert $t = d_m/s_{dm}$ durchgeführt, die beim Erreichen von bestimmten Werten eine Alarmierung ermöglichen kann.

Da die Anzahl der Messungen, die bei der Echtzeitauswertung berücksichtigt werden, so klein wie möglich sein soll und gleichzeitig groß genug, um signifikante Ereignisse zu erhalten, wurden bei dem beschriebenen Test jeweils die letzten 14, 10 und 6 Messungen der Zeitreihe in Betracht gezogen. Die Ergebnisse der Regressionsanalyse (Steigungen m und ihre Standardabweichungen s_m) werden für das oben genannte Beispiel in *Abb. 5* präsentiert. Ein Verschiebungsbetrag ist signifikant (95 %) nachweisbar, wenn er mindestens die zweifache Standardabweichung der Differenz von Kontrollparametern überschreitet bzw. den in etwa dreifachen Betrag der Standardabweichung einer Messung erreicht. Es ist deutlich zu erkennen, dass in allen drei Lösungen eine kritische Abweichung (Muster „Steigungsänderung“) erkannt wird. Aus den präsentierten Ergebnissen der Signifikanzanalyse sind außerdem die folgenden Schlussfolgerungen zu ziehen: Obwohl die gesuchte Änderung der Steigung bei der etwa 43. Messung stattfand, wird ihr Einfluss erst mit einer Verspätung um etwa die Länge N des betrachteten Intervalls bemerkbar. Nicht zuletzt ist diese Tatsache mit den wachsenden Standardabweichungen der Steigung bis zum Auftreten des Knickpunkts der Zeitreihe verbunden. Diese Verspätung beim Alarmieren ist als großer Nachteil bei der Echtzeitanalyse zu betrachten. Gleichzeitig lässt die Schärfe des statistischen Tests deutlich beim Verkleinern des Arbeitsintervalls nach. Während bei den betrachteten Berechnungen aus jeweils

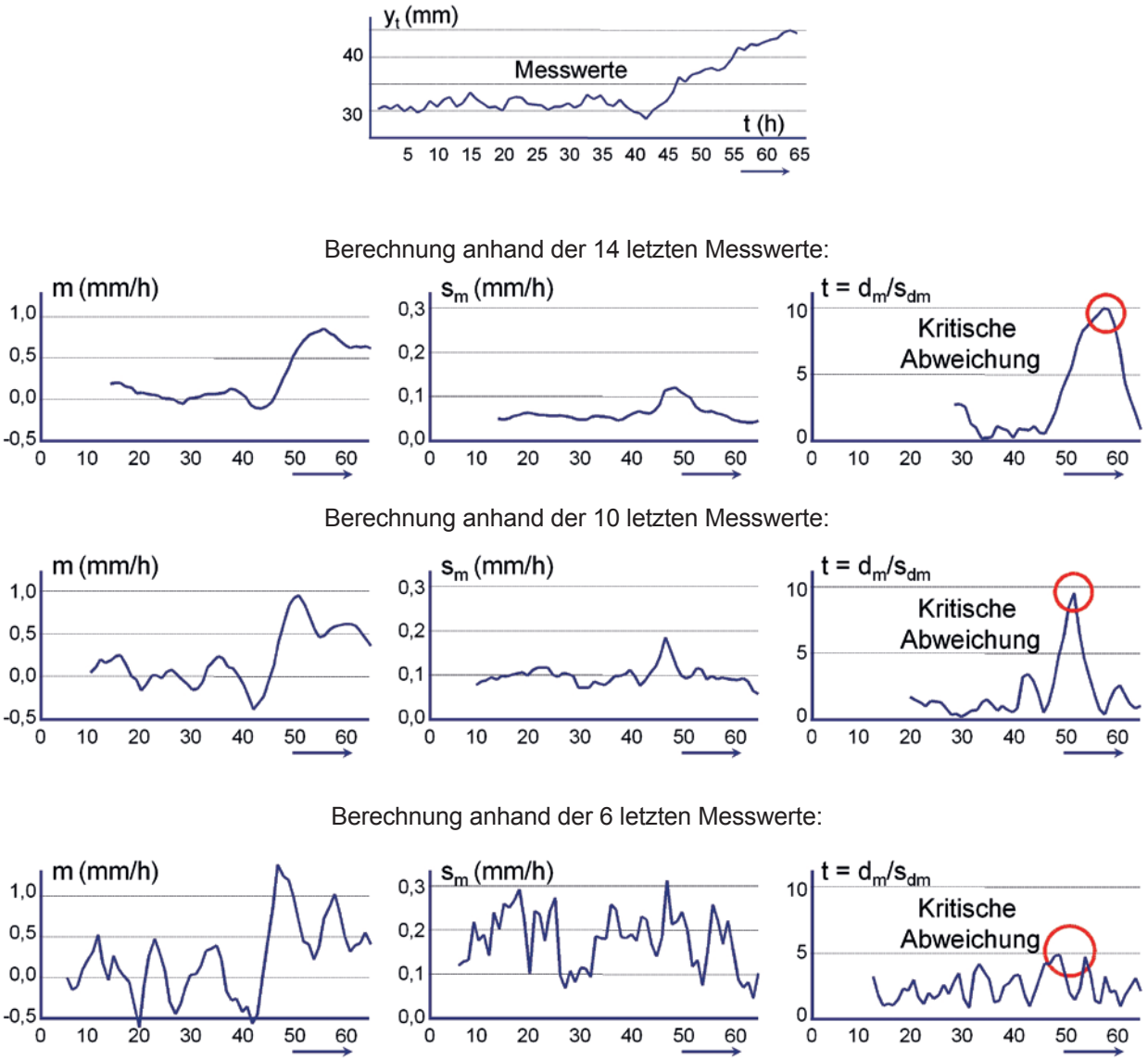


Abb. 5 | Kontrolle der Trendänderungen beim Online-Monitoring (exemplarisch)

sechs Werten die gesuchte Änderung der Steigung noch signifikant erkennbar war, versagt dieses Verfahren bei vier Werten komplett. Diese Schlussfolgerungen entsprechen jedoch der Erwartung, dass je genauer Informationen über Steigung in einem Intervall gewonnen werden müssen, desto länger dieses Intervall sein soll. Ein schmaleres Analysefenster erlaubt eine schlechtere Erfassung der gesuchten Parameter, die jedoch wesentlich genauer lokalisiert werden können.

Für die Realisierung eines Signifikanztests für die ermittelten Differenzen müssen entweder die Streuungen aus den empirischen Schätzungen oder aus den Erfahrungswerten (theoretische Varianz des Parameters) verwendet werden. Besonders bei den sehr kleinen Arbeitsfenstern wäre eine Näherungsformel von Vorteil, die eine zu erwartende Streuung der Messwerte s_y und die Standardabweichung der Steigung s_m aus diesen Werten miteinander verbindet. Außerdem kann bei der Realisierung eines Monitorings nach diesem Verfahren ggf. ein Vergleich der ermittelten Steigung des letzten Intervalls mit dem gewichteten Mittelwert aus mehreren früheren Intervallen in Betracht gezogen werden. Diese beiden Verfahren werden in diesem Beitrag jedoch nicht näher behandelt.

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Eine allgemeingültige, jederzeit anwendbare Systematisierung der Vorgehensweise bei der Mustererkennung bei einem realen Monitoring ist sehr komplex und herausfordernd. Deswegen sollten hier ausgewählte Klassen als eine exemplarische Auswahl betrachtet werden. Da die Beschreibung mehrerer Mess- und Auswertungsergebnisse den Umfang des Beitrags sprengen würde, wurde im Beitrag exemplarisch nur eine Klasse der möglichen Deformationen, die „Trendänderung“, näher behandelt. Bei der Kontrolle von „Sprüngen“ in den Zeitreihen des geodätischen Monitorings kann auf den Beitrag /Resnik & Luchko 2013/ verwiesen werden, wo diese Aufgabe exemplarisch mithilfe von Wavelet-Transformation gelöst wird. Die im Beitrag vorgeschlagene Klasse „Impuls“

sollte allgemein als ein Ausreißer ohne einen langfristigen oder periodischen Charakter angesehen werden und kann ebenfalls auf Basis der mathematischen Statistik lokalisiert werden. Die weiteren möglichen Muster der Deformationsanalyse wären z. B. eine „Streuungsänderung“ oder auch eine „Welle“, um hier nur zwei Beispiele dieser Art zu nennen. Die Erstellung von geeigneten Lösungskonzepten dieser Art ist als Thema für eine angewandte Forschung zu betrachten und sollte nach der Meinung des Verfassers weiter intensiv untersucht werden.

LITERATUR

Basseville, M.; Nikiforov, I. (1993): Detection of abrupt changes: Theory and application. Prentice Hall, New Jersey.

Cateni, S., Colla, V., Vannucci, M. (2008): Outlier detection methods for industrial applications. In: Aramburo J.; Trevino, A. (Hrsg.): Advances in robotics, automation and control. InTech, Shanghai.

Fletling, R. (2010): Methodische Ansätze zur unscharfen Mustererkennung bei Deformationsmessergebnissen. Geodätische Schriftenreihe, 27. TU Braunschweig.

Heunecke, O; Kuhlmann, H.; Welsch, W.; Eichhorn, A.; Neuner, H. (2013): Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Wichmann, Berlin/Offenbach.

Niemann, H (2003): Klassifikation von Mustern. 2. Auflage. http://www5.cs.fau.de/fileadmin/Persons/NiemannHeinrich/klassifikation-von-mustern/m00links.html (20. 12. 2017).

Niemeier, W. (2008): Ausgleichungsrechnung: Statistische Auswertemethoden. W. de Gruyter, Berlin.

Resnik, B. (2011): Structural Health Monitoring und Paradigmenwechsel bei den geodätischen Überwachungsmessungen. In: Forum – Zeitschrift des Bundes der Öffentlich bestellten Vermessungsingenieure (2011)4, 197 – 206.

Resnik, B.; Luchko, Y. (2013): Verwendung schneller Wavelet-Transformation zum Detektieren von signifikanten Abweichungen im Rahmen eines Frühwarnsystems. In: Domnick, I.; Heimann, S. (Hrsg.): Planen, Messen und Konstruieren. Forum Geo-Bau, 3. Shaker, Aachen.

Resnik, B.; Schiefelbein, N.; Werner, D. (2013): Visuelle und messtechnische Erkennung sicherheitsrelevanter Defekte an Fundamenten von Windenergieanlagen. In: Domnick, I.; Heimann, S. (Hrsg.): Planen, Messen und Konstruieren. Forum Geo-Bau, 3. Shaker, Aachen.

Stempfhuber, W. (2009): Geodätische Monitoringsysteme – Stand der Technik und Abgrenzung der gegenwärtigen Systeme. DVW Schriftenreihe 59 (Zeitabhängige Messgrößen – Verborgene Schätze in unseren Daten). Wißner, Augsburg.

Prof. Dr.-Ing. Boris Resnik

BEUTH-HOCHSCHULE FÜR TECHNIK BERLIN
FACHBEREICH BAUINGENIEUR- UND GEOINFORMATIONSWESEN

Luxemburger Straße 10 I 13353 Berlin
resnik@beuth-hochschule.de

Technikwissen punktgenau:

Beschreibung der grundlegenden Konzepte von webgestützten Geoinformationssystemen!

Anhand zahlreicher Beispiele und Abbildungen bietet das Werk einen gezielten Einstieg in die verschiedenen Umgebungen, vom Desktoprechner bis hin zum Smartphone. Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Technologien werden anschaulich dargestellt.

2017. 552 Seiten
52,– € (Buch/E-Book)
72,80 € (Kombi)

Preisänderungen und Irrtümer vorbehalten. Sowohl das E-Book als auch das Kombiangebot (Buch + E-Book) sind ausschließlich auf **www.vde-verlag.de** erhältlich.

Bestellen Sie jetzt: (030) 34 80 01-222 oder www.vde-verlag.de/170895