

Prädiktives Klima-Stadt-Modell – Untersuchung ereignisbasierter Monitoringstrategien zur Entwicklung urbaner Klimamodelle

Predictive Urban Climate Model – Investigation of Event-based Monitoring Strategies for the Development of Urban Climate Models

Tobias Goblirsch^{1,2}, Bogdan Franczyk¹, Mathias Paschen³, Peter Dietrich^{2,4}, Robert Schima³

¹ Universität Leipzig, Institut für Wirtschaftsinformatik, Professur Informationsmanagement, Leipzig

² UFZ – Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig, Department Monitoring- und Erkundungstechnologien, Leipzig

³ Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik, Rostock

⁴ Universität Tübingen, Zentrum für Angewandte Geowissenschaften, Professor Umwelt- und Ingenieurgeophysik, Tübingen

Schlagworte: Klima-Stadt-Modell, Urbanes Umweltmonitoring, Ereignisbasiertes Monitoring, Datenfusion

Key words: Environmental monitoring, Event-based Monitoring, Prediction, Data Fusion

Zusammenfassung

Stadtentwickler aus Wissenschaft und Praxis stehen im Zuge zunehmender, globaler Urbanisierungsprozesse vor vielfältigen Herausforderungen. Klimawandel, Mobilität in Städten sowie steigende Ressourcenknappheit sind weitere Aspekte, die in diesem Zusammenhang eine wichtige Rolle spielen. Für eine nachhaltige Entwicklung gilt es, den Transformationsprozess hin zur Stadt der Zukunft mit innovativen Technologien und Strategien zu begleiten und zukunftsfähig mitzugestalten. Basierend auf Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung bzw. der IKT-Technologien lassen sich bestehende Monitoringkonzepte um Analyse-Komponenten zur ereignisbasierten Erfassung von Umweltprozessen ergänzen. Dieser Ansatz erfordert neben dem Einsatz klassischer meteorologischer Methoden insbesondere eine stärkere Einbeziehung von Werkzeugen aus den Bereichen Informatik und Informationswissenschaften. Daher wird im vorliegenden Fall ein Framework präsentiert, mit dessen Hilfe ereignisbasierte Analysen von lokalen Messdaten erfolgen können, die das Ziel verfolgen, prädiktive Informationen über urbane Gebiete bedarfsgerecht zur Verfügung zu stellen.

Einleitung

Über die Hälfte der Weltbevölkerung lebt inzwischen in Städten. Die anhaltende Urbanisierung, der Klimawandel sowie Flächen- und Ressourcenkonflikte führen zu Herausforderungen, deren Lösung komplexe Systembeschreibungen erforderlich machen (Schima et al. 2017). Die Transformation gewachsener, städtebaulicher Strukturen hin zu einem nachhaltigen Quartiersmanagement infolge zunehmender Urbansierung sowie ein gestiegenes Interesse an der individualisierten Erfassung und Abfrage von Umwelteinflüssen zur persönlichen

Gesundheitsvorsorge sind Belege, die den Bedarf unterschiedlicher Nutzergruppen an ein intelligentes und serviceorientiertes Umweltmonitoring zum Ausdruck bringen (Su et al. 2015). Urbane Gebiete zeichnen sich insbesondere durch heterogene Strukturen mit einer hohen zeitlichen Dynamik von Umweltkenngößen aus. Dadurch unterscheiden sich urbane Gebiete deutlich vom ländlichen Raum (Matzarakis 2001). Charakteristische Merkmale wie intensive Flächennutzung und die dichte Bebauung in urbanen Gebieten haben Auswirkungen auf den Impuls-, Strahlungs-, Wärme-, Wasser- und Stoffhaushalt (Sievers 2012, Sievers und Früh 2012). Dadurch bildet sich in Städten ein eigenes Mesoklima aus. Innerhalb dieses sogenannten Mesoklimaraums lassen sich wiederum einzelne, zeitlich variierende Mikroklimata ausfindig machen, die vor allem durch Wechselbeziehungen zwischen unterschiedlichen Umweltkompartimenten geprägt sind (Lowry 1977). Dies erschwert die Formulierung genereller Klima- oder Strömungsmodelle. In Abbildung 1 sind diese Wechselbeziehungen durch ein mikroskaliges urbanes Klima-Modell schematisch dargestellt.

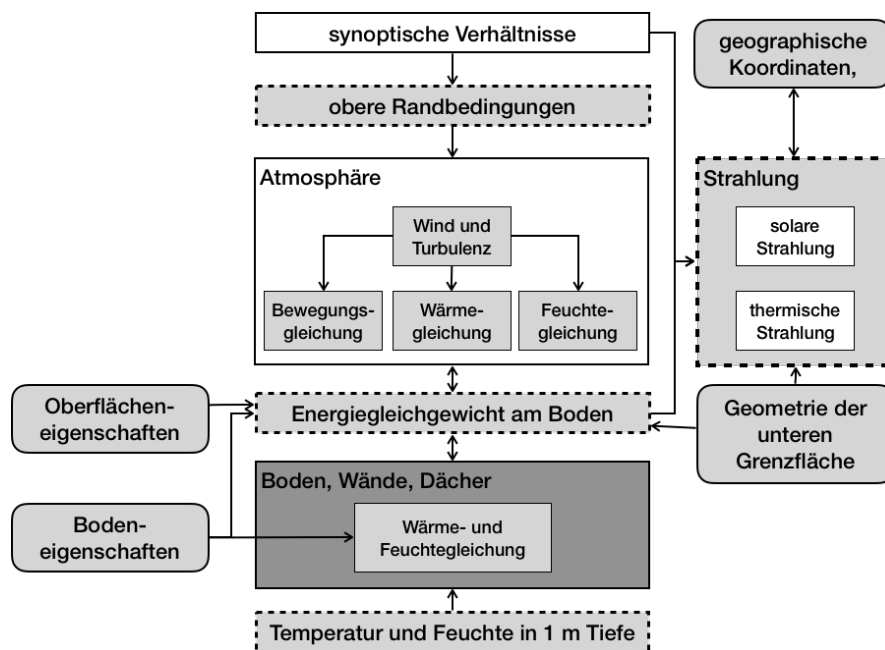


Abbildung 1: Mikroskaliges, urbanes Klima-Modell (nach Sievers 2012, Sievers und Früh 2012)

Ein bekanntes Phänomen von mikroskaligen Erscheinungen sind sog. urbane Wärmeinseln, die insbesondere an Tagen mit windschwachen und wolkenfreien Wetterbedingungen Temperaturunterschiede von bis zu 10K zwischen Stadt und Umland erreichen (DWD 2018). Darüber hinaus kommt es in urbanen Verdichtungsräumen verstärkt zu Emissionen, die das Stadtklima prägen. Daher umfasst der Begriff Stadtklima das durch Wechselwirkung mit der Bebauung und deren Auswirkungen modifizierte (lokale) Klima, was auch die Abwärme und Emission von luftverunreinigenden Stoffen mit einschließt (WMO 1983, Matzarakis 2001).

Um derartige Umweltsysteme besser beschreiben, verstehen und vorhersagen zu können, müssen nicht nur skalenübergreifende, sondern verstärkt prädiktive Mess- und Analysemethoden gefunden werden. Dies beinhaltet, dass nicht nur globale, sondern auch lokale klimatische Erscheinungen erfasst, bewertet und schließlich ganzheitlich charakterisiert werden. Dieser Ansatz erfordert neben dem Einsatz klassischer meteorologischer Methoden eine stärkere Einbeziehung von Werkzeugen, wie sie im Bereich Informatik und Informationswissenschaften Anwendung finden (Reis et al. 2015). Daher wird im vorliegenden Fall ein Ansatz präsentiert, wie ausgehend von einer lokalen Umwelt-Messstation ein konsistenter Datenstrom erzeugt werden kann, um z.B. mithilfe eines ereignisgesteuerten Strömungsmodells prädiktive Aussagen für einen Standort innerhalb des Stadtgebiets von Leipzig (Sachsen) zu ermöglichen.

Materialien und Methoden (Arial 11, F)

Im Kontext des urbanen Monitorings werden unter prädiktiven lokalen Messmethoden vor allem Methoden des maschinellen Lernens verstanden. Ziel ist es, ausgehend von meteorologischen bzw. atmosphärenphysikalischen Bestandsdaten und unter Verwendung von Korrelationsanalysen geeignete Vorhersagemodelle zu entwickeln (z.B. zur Analyse und Vorhersage von Feinstaubbelastungen). Dazu sind zunächst belastbare Entscheidungskriterien notwendig.

Zur Datengewinnung dienen Langzeituntersuchungen durch Observatorien sowie temporäre- oder mobile Messungen. Aber auch die Nutzung von Fernerkundungsdaten zur räumlichen Beschreibung sowie experimentelle Untersuchungen im Windkanal zur aerodynamischen Charakterisierung städtischer Strukturen finden Berücksichtigung.

Bei der Modellierung von mikro- und mesoskaligen Erscheinungen rücken vor allem prädiktive Methoden zunehmend in den Fokus, da diese es ermöglichen, standortspezifische Informationen in naher Echtzeit zur Verfügung zu stellen. Eine zentrale Forschungsfrage lautet daher, wie ein solches integriertes Monitoringkonzept in Hinblick auf Datenerhebung und Dateninfrastruktur realisiert und die dazu erforderlichen Datenverarbeitungsprozesse implementiert werden können.

Zu diesem Zweck wurde in Kooperation mit dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung Leipzig ein Versuchsstandort aufgebaut. Mithilfe der Messeinrichtung werden so neben anderen meteorologischen Parametern lokale Strömungs- und Feinstaubdaten erfasst und über das Mobilfunknetz an einen Server zur Weiterverarbeitung übertragen. Die Strömungsdaten werden standardmäßig mit Hilfe eines 3D-Ultraschallanemometers ermittelt. Dabei handelt es sich um das Modell uSonic-3 Scientific der Firma METEK (Meteorologische Messtechnik GmbH) (siehe Abbildung 2 links). Das 3D-Ultraschallanemometer ermittelt neben den drei Windkomponenten (Geschwindigkeit in x-, y-, z-Richtung) zusätzlich Turbulenzparameter. Dabei findet Berücksichtigung, dass die selbstinduzierte Turbulenz kleiner 1% der Windgeschwindigkeit ist. Über eine entsprechende Schnittstelle ist es im weiteren Prozessverlauf somit möglich, z.B. die Windgeschwindigkeit und Windrichtung in die Analyse der Feinstaubbelastung mit einfließen zu lassen. Die Feinstaubmessung erfolgt nach DIN EN 481 mit dem Feinstaubsensor FDS15 (Abscheidung über Aerozyklon und anschließende optische Detektion der Partikelfracht) der Firma Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG. Der so ermittelte Messwert PM_{2,5} gibt Auskunft über den lungengängigen (alveolengängigen) Feinstaub als Anteil des Schwebstaubs in der Luft in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und beschreibt eine Staubfraktion, in der etwa 50% der Teilchen einen aerodynamischen Durchmesser von $d < 2,5\mu\text{m}$ aufweisen (siehe Abbildung 2 rechts).



Abbildung 2: links: 3D-Ultraschallanemometer uSonic-3 Scientific der Firma METEK, rechts: Feinstaubsensor FDS15 der Firma Dr. Födisch Umweltmesstechnik AG

Neben den Messsystemen am Versuchsstandort werden zusätzliche a-priori Informationen mit Hilfe von Fernerkundungsdaten herangezogen. Die Datengrundlage für die a-priori Informationen bilden die optischen Hyperspektraldaten der Sentinel-Satelliten des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus der Europäischen Union sowie des Erdbeobachtungssatelliten Landsat 8 der US-amerikanischen Luft- und Raumfahrtbehörde NASA. Die Produkte beider Satelliten werden kostenfrei zur Verfügung gestellt. Die Hyperspektraldaten werden dafür verwendet, um die Kennzahlen NDVI (Normalized Density Vegetation Index) und LST (Land Surface Temperature) zu ermitteln. Abbildung 3 zeigt exemplarisch die Vegetationsbedeckung (NDVI) im Stadtgebiet von Leipzig ausgehend von einer satellitengestützten Hyperspektralaufnahme.

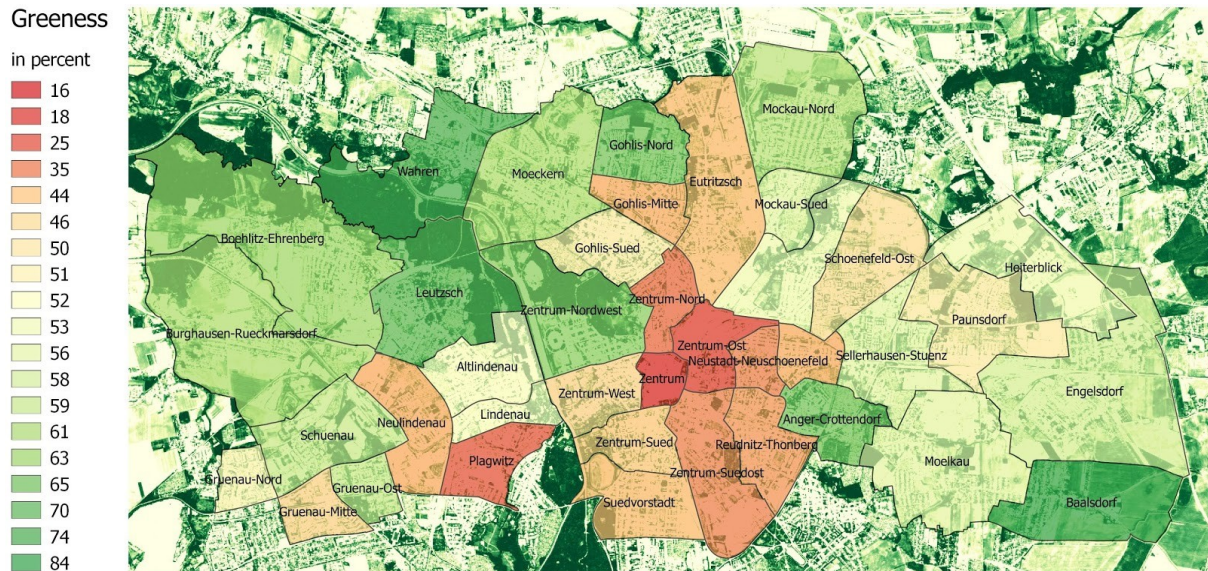


Abbildung 3: Ergebnis der satellitengestützten Analyse der Vegetationsbedeckung im Stadtgebiet von Leipzig. Dargestellt ist hier die prozentuale Vegetationsbedeckung auf Grundlage von Landsat 8 Fernerkundungsdaten (Hyperspektralaufnahme).

Ausgehend von diesen Kennzahlen lassen sich Aussagen generieren, die im späteren Verlauf wichtige Entscheidungshilfen z.B. für die Wahl der Messstrategie, Positionierung der Messsysteme oder aber auch für die Identifikation von Ereignissen liefern.

Am Versuchsstandort selbst sollen insbesondere Methoden der ereignisbasierten Umweltdatenerhebung für ein urbanes Monitoring untersucht werden. Das ereignisbasierte Monitoring ist verbunden mit einem innovativen Informationssystem, welches mithilfe von eigens entwickelten Schnittstellen und Diensten (Web-Services) die Datenverarbeitung, Datenspeicherung und Datenbereitstellung übernimmt. Das Informationssystem stellt so die Möglichkeit bereit z.B. Algorithmen aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz, des Maschinellen Lernens oder der Mustererkennung anzuwenden. Angelehnt ist die IT-Infrastruktur des Informationssystems an die sog. Lambda Architektur. Lambda Architekturen ermöglichen es, große Datenmengen und Datenabfragen in naher Echtzeit zu identifizieren und zu verarbeiten (Marz und Warren 2015). Angepasst auf den vorliegenden Anwendungsfall ist in Abbildung 4 die zugrundeliegende Architektur für das ereignisorientierte Umweltmonitoring dargestellt.

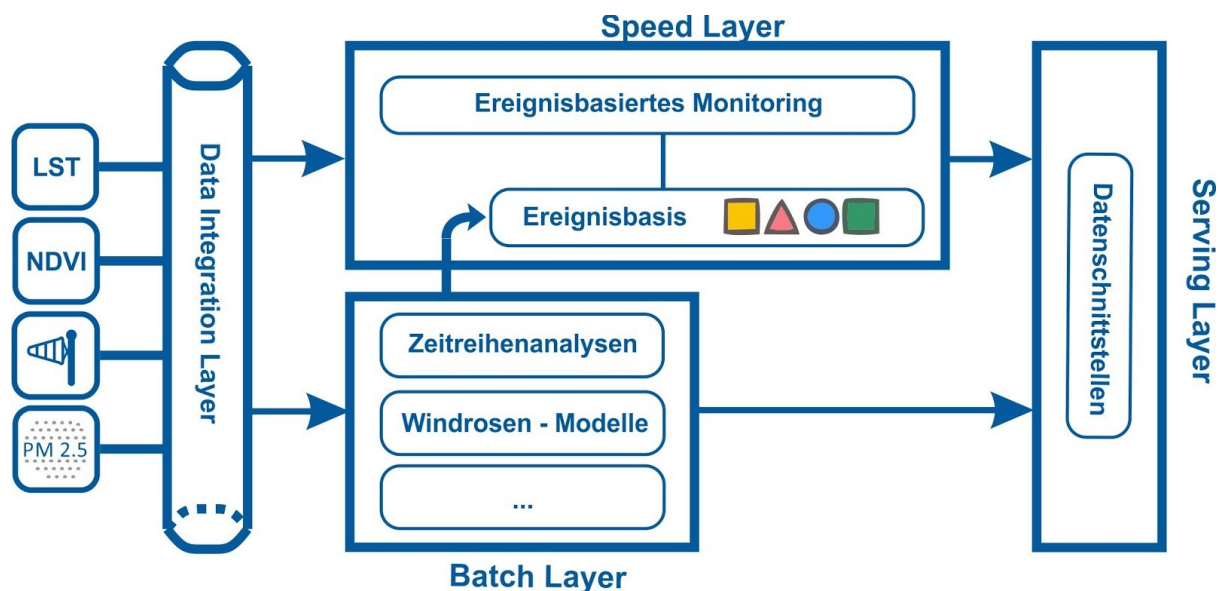


Abbildung 4: Skalenübergreifende Datenerhebung in naher Echtzeit anhand einer Lambda-Architektur.

Die IT-Architektur besteht aus den vier Elementen *Data Integration Layer*, *Batch Layer*, *Speed Layer* und *Serving Layer*. Der *Data Integration Layer* stellt die Schnittstelle für die Datenquellen (PM 2,5, Strömungsdaten, NDVI, LST) zur Verfügung und leitet den Datenstrom in den *Batch*- und *Speed*-Layer weiter. Im *Batch*-Layer werden Daten auf Grundlage verschiedener Algorithmen z.B. Zeitreihenanalysen oder Windrosen-Modelle prozessiert. Ziel des *Batch Layers* ist es, eine Ereignisbasis für den *Speed Layer* zu schaffen, mit deren Hilfe dann das ereignisbasierte Monitoring erfolgt. Im *Speed Layer* kommen spezielle, hochperformante Streaming-Tools zum Einsatz, um eine echtzeitnahe Datenverarbeitung zu gewährleisten. In Abbildung 5 ist der Prozess des ereignisbasierten Monitorings schematisch dargestellt.

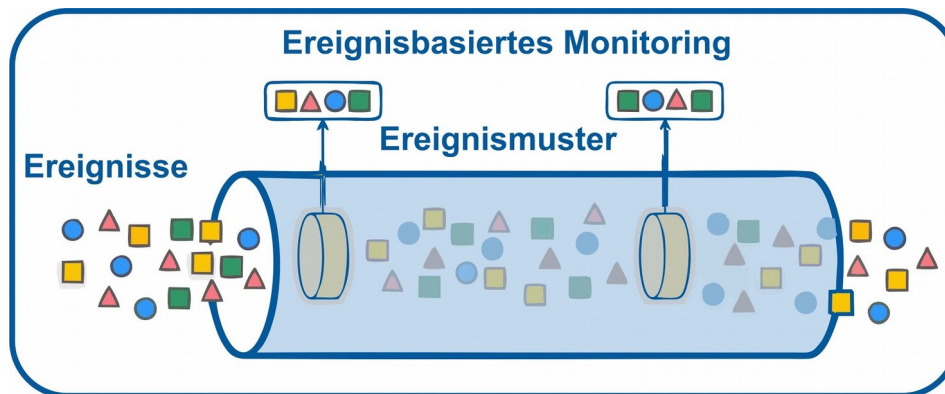


Abbildung 5: Ereignisbasiertes Monitoring im Speed-Layer zur schnellen Daten- und Ereignisanalyse.

Der eingehende Datenstrom aus dem *Data Integration Layer* wird hier hinsichtlich der Ereignisbasis analysiert und entsprechend der auftretenden Ereignisse weitergeleitet. Anschließend wird der eingehende Ereignisstrom auf eintreffende Ereignismuster untersucht, die z.B. für prädiktive Entscheidungen von Bedeutung sein können. Die letzte Komponente in der Lambda Architektur, der *Serving Layer*, stellt schließlich Datenschnittstellen zur Verfügung, um nutzerseitig auf identifizierte Ereignisse, Modellparameter oder Ergebnismuster zuzugreifen oder sie anzupassen.

Versuchsergebnisse

Die am Standort ermittelten lokalen Strömungs- und Feinstaubdaten sowie die Hyperspektraldaten aus der Fernerkundung bilden die Datengrundlage für die Regelbasis. Bei der Entwicklung der Regelbasis werden die Strömungs- und Feinstaubdaten (PM 2,5) hinsichtlich ihres zeitlichen

Verlaufs (Zeitreihenanalyse), ihrer räumlichen Ausbreitungsrichtung (Windrosen-Modellen) sowie in Bezug auf ihre relative Häufigkeit untersucht. In Abbildung 6 sind vorläufige Ergebnisse der Zeitreihenanalysen für die Feinstaubdaten sowie als normierte Windrosen-Modellendarstellung und Histogramme zur Analyse der relativen Häufigkeit bzw. räumlichen Verteilung der Feinstaubbelastungen dargestellt (2018, Kalenderwochen 22 - 24).

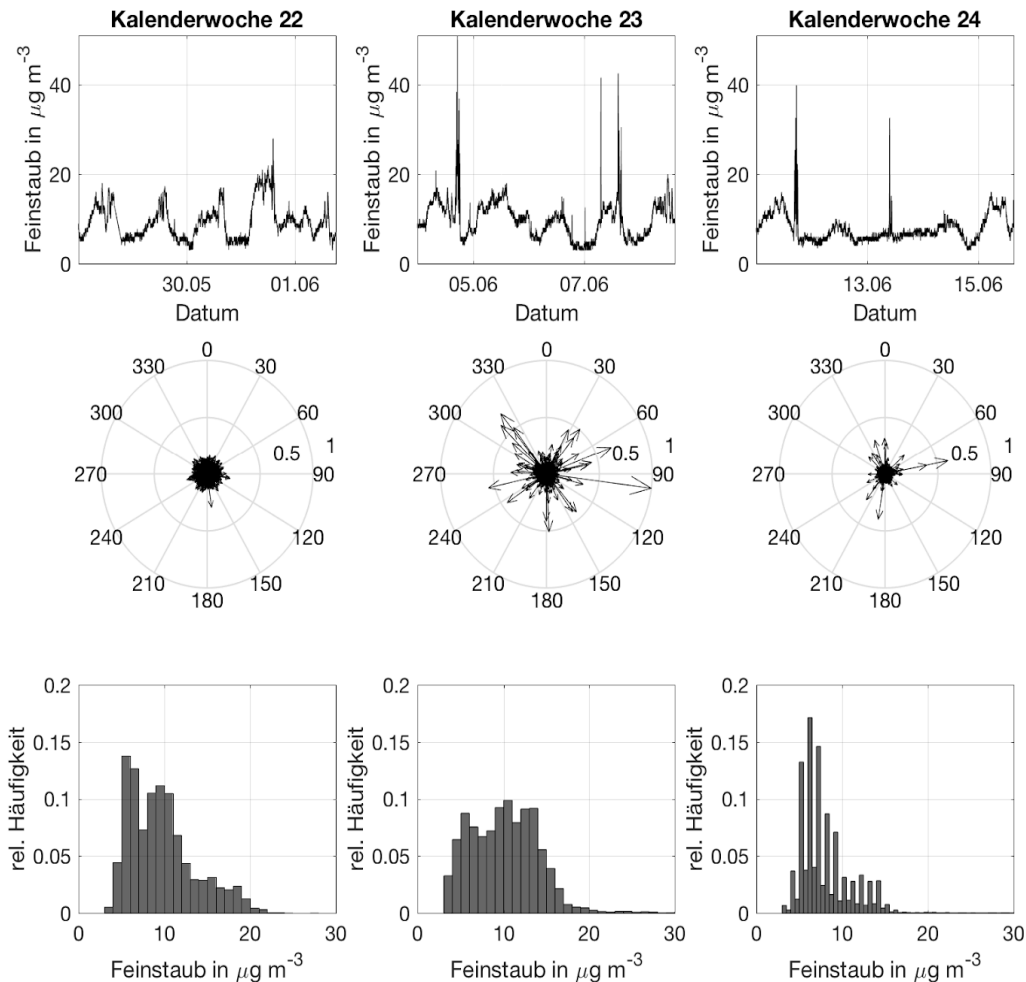


Abbildung 6: Vorläufige Versuchsergebnisse zur Erzeugung einer Regelbasis für ein prädiktives Stadtklima-Monitoring auf Grundlage von Echtzeit-Daten. Bezogen auf die Windrosendarstellung entsprechen 0°Kompasskurs Nord, 45°Nord-Ost, 90°Ost usw.

Bereits diese einfachen Prozessierungsschritte zeigen, dass die Analyse des eingehenden Datenstroms zur Identifikation markanter Ereignisse und Ereignisstrukturen genutzt werden kann. Da sich zunächst nur auf die grundlegende Machbarkeit der Echtzeit-Analyse beschränkt werden soll, wird die umweltwissenschaftliche Analyse der oben gezeigten Ergebnisse an dieser Stelle vernachlässigt. Insbesondere die Windrosen-Darstellungen zeigen jedoch, dass die Analyse der Feinstaubwerte PM 2,5 in Abhängigkeit von der Windrichtung als Grundlage für die Schaffung einer Regelbasis geeignet erscheint. Zu erwähnen ist, dass in der oben gezeigten Darstellung die Windgeschwindigkeit nicht berücksichtigt wurde.

Aufbauend auf einem lokalen Messstandort, an dem sowohl Strömungs- als auch Feinstaubdaten erhoben werden, wurde eine Dateninfrastruktur entwickelt, mit deren Hilfe perspektivisch, ereignisbasierte Monitoringkonzepte entwickelt und evaluiert werden können.

Diskussion

Das vorgestellte Forschungskonzept zeigt einen methodischen Ansatz, um die Entwicklung von prädiktiven Klima-Stadt-Modellen um den aktuellen Stand der Technik durch ereignisbasierte und echtzeitnahe Monitoringkonzepte zu erweitern. Basierend auf Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung bzw. der IKT-Technologien lassen sich so bestehende Monitoringkonzepte um Analyse-Komponenten zur ereignisorientierten Erfassung von Umweltprozessen ergänzen. Sie ermöglichen es, Daten in naher Echtzeit zu erheben, zu verarbeiten und anschließend die gewonnenen Informationen in die Modellbildung mit einfließen zu lassen. Der Versuchsstandort in Leipzig und die gewonnenen Daten zeigen, dass eine moderne IT-Infrastruktur hinter dem eigentlichen Umweltmonitoringprozess neuartige Analyseverfahren ermöglichen kann. In einem ersten Schritt wurde der Versuchsstandort instrumentiert und die funktionale Machbarkeit gezeigt. Messdaten werden seit der Inbetriebnahme kontinuierlich aufgezeichnet, serverseitig verarbeitet und zur Entwicklung einer Regelbasis genutzt. Aufbauend auf diesen ständig wachsenden Datenbestand sind erste Analysen im *Batch Layer* erfolgreich durchgeführt worden (Implementierung von Zeitreihenanalysen und Windrosen-Modellen). Diese ersten Analysen zeigen auch, dass für die Entwicklung der Ereignisbasis eine größere Grundgesamtheit an Daten notwendig ist, um an bestehende Klima-Stadt-Modelle anzuknüpfen bzw. diese um neue Komponenten erweitern zu können. Die Grundlage für aussagekräftige und belastbare Festlegungen bzw. Definition von Ereignissen ist deshalb noch nicht hinreichend gegeben. Sobald eine erste erfolgreiche Validierung einer Ereignisbasis vorliegt, können auch Analysen für ein ereignisbasiertes Monitoring in naher Echtzeit erprobt werden.

Ausblick

Die vorgestellte Untersuchung einer ereignisbasierten Monitoringstrategie bzw. die Schaffung einer Regelbasis hat im Rahmen der Pilotstudie gezeigt, dass das gewählte Vorgehensmodell einen zielführenden Lösungsansatz darstellt. Das Konzept stellt somit eine Erweiterung bestehender Monitoringstrategien für die Erfassung urbaner Klimata dar. Durch einen flächendeckenden, konsequenten Einsatz dieses Vorgehensmodells, z.B. auf Grundlage mehrerer Versuchsstandorte in der Stadt, könnten perspektivisch auch prädiktive und komplexe Ausbreitungsmodelle entwickelt und in naher Echtzeit evaluiert werden. Damit verbunden ist, dass zusätzlich zur lokalen Ereignisbasis globale und somit auch komplexere Ereignismuster von unterschiedlichen Standorten untersucht und berücksichtigt werden müssen. In der Informatik hat sich dafür der Begriff des Complex Event Processing (Hedtstück 2017, Margara 2012) etabliert. Ein vielversprechender Ansatz wäre es daher, den Einsatz des Complex Event Processing im Bereich der Entwicklung von Klima-Stadt Modellen bereits auf der Ebene der Messwerterhebung bzw. -verarbeitung zu integrieren. So könnten in naher Zukunft umfassende Systemzusammenhänge nicht nur messtechnisch besser erfasst, sondern auch neuartige, prädiktive Stadt-Klimamodelle abgeleitet werden.

Literatur

DWD, 2018: "Stadtklimamessungen - die städtische Wärmeinsel", Aufgerufen am 10.06.2018 https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaforschung/klimawirk/stadtpl/projekt_waermeinseln/projekt_waermeinseln_node.html

Hedtstück, U., 2017: "Complex Event Processing Engines." Complex Event Processing EXamen.press, 75 – 91

Lowry, W. P., 1977: "Empirical Estimation of Urban Effects on Climate: A Problem Analysis". Journal of Applied Meteorology, 16(2), 129 – 135

- Margara, A., Gianpaolo C., 2011:** "Processing flows of information: From data stream to complex event processing", ACM Computing Surveys (CSUR) 44 (3), 15 – 62
- Matzarakis, A., 2001:** "Die thermische Komponente des Stadtklimas", Bd. 6. Berichte des Meteorologischen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Freiburg: Meteorologisches Inst. der Univ. Freiburg.
- Marz, N., & Warren, J., 2015:** Big data: Principles and best practices of scalable real-time data systems, Manning
- Reis, S., Seto, E., Northcross, A., Quinn, N. W., Convertino, M., Jones, R. L., ... Wimberly, M. C., 2015:** "Integrating modelling and smart sensors for environmental and human health", Environmental Modelling & Software, 74, 238 – 246
- Schima, R., Goblirsch, T., Salbach, C., Franczyk, B., Aleithe, M., Bumberger, J., Dietrich, P. , 2017:** "Research in Progress: Implementation of an Integrated Data Model for an Improved Monitoring of Environmental Processes", Business Information Systems Workshops Lecture Notes in Business Information Processing, 332 – 339
- Sievers U., 2012:** "Das kleinskalige Strömungsmodell MUKLIMO_3 Teil 1: Theoretische Grundlagen, PC-Basisversion und Validierung", Berichte des Deutschen Wetterdienstes Band 240
- Sievers U., B. Früh, 2012:** "A practical approach to compute short-wave irradiance interacting with subgrid-scale buildings", Meteorologische Zeitschrift 21, 349 – 364
- Su, J. G., Jerrett, M., Meng, Y., Pickett, M., & Ritz, B., 2015:** "Integrating smart-phone based momentary location tracking with fixed site air quality monitoring for personal exposure assessment" Science of The Total Environment, 506 – 507, 518 – 526
- WMO, 1983:** "Commission for Climatology and applications of Meteorology", Abridged final report 8th session. WMO-No. 600.