

# Tagungsband

mit Kurzfassungen der Beiträge zum

**E**3.  
**B**EE  
**E**H  
**K**EE  
**2021**

## 3. Bochumer Hydrometrie-Kolloquium

24.02.2021 | Hochschule Bochum

messen · bewerten · planen

## Inhaltsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| ExUS 2020 – Fortführung der Untersuchungen zum Starkregenverhalten in Nordrhein - Westfalen .....  | 1  |
| Wann ist ein Trend ein Trend? Überlegungen zu Trends und Sprungstellen in Zeitreihen .....   | 4  |
| Unsicherheiten in der radarbezogenen Auswertung von Starkregenereignissen.....   | 6  |
| Unsicherheitsbetrachtungen von Durchflussmessungen und deren Auswirkungen auf Hoch- und<br>Niedrigwasserkennwerte .....  | 8  |
| Messdatenprüfung mit Hilfe von selbst lernenden Datenanalysewerkzeugen als Bestandteil eines<br>Messdatenmanagementsystems (MDMS) .....                            | 10 |
| Kontinuierliche Anpassung von Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen.....   | 12 |
| Abflussermittlung an kraftwerksbeeinflussten Fließgewässern .....  | 14 |
| Hydrographische Vermessung von Binnengewässern – Von der relativen Tiefenmessung zum<br>Höhenmodell .....  | 16 |
| Optimierte Ultraschall-Laufzeitmessung und indirekte Abflussermittlung am Pegel Villigst im<br>Vergleich .....   | 18 |
| Kontinuierliche Messdatenerfassung mit Opensource-Hardware am Beispiel eines modularen<br>Arduino-Datenlogger-Konzepts .....                                       | 20 |
| Die mechanische Integration von Tracer-Durchgangskurven als schnelle, kostengünstige und<br>verlässliche Methode zur Auswertung von Salzverdünnungsmessungen ..... | 22 |

**Hydrotec**  
 Ingenieurgesellschaft für  
 Wasser und Umwelt mbH

**Daten für die Wasserwirtschaft**



**TimeView**

- › Analyse von Messdaten
- › Zeitreihenvisualisierung
- › Extremwert-Statistik

**NASIM**

- › N-A-Modellierung
- › Langfristsimulation
- › Bemessungsabflüsse

☎ 0241 - 94689 - 0 | ✉ mail@hydrotec.de | 🌐 www.hydrotec.de

**sommer**  
 MESSTECHNIK  
 www.sommer.at

*Der PROFI in  
 Abflusstechnik*

**Oberflächenwasser RQ-ADMS (autonom)**    **Abwasser SQ-R ATEX Z1**    **Kontrollmessungen Tracer TQ-S**



☑ BERATUNG    ☑ PLANUNG    ☑ VERTRIEB    ☑ INSTALLATION

Sommer AUSSENBÜRO direkt vor Ihrer Haustüre:  
 Christoph.Saupe@sommer.at / +49 178 2457 264

**OTT HydroMet**

Wie wird Ihre Stadt hochwasserfest?

Mit modernsten, ganzheitlichen Monitoring-Netzwerken wappnet Sie OTT HydroMet für die Zukunft. Egal wie stürmisch diese auch sein mag!

Zum OTT HydroMet-Portfolio



**GUNT-Fluid Line – Grundlagen der Strömungsmechanik**

Zu dem Thema Grundlagen der Strömungsmechanik bietet GUNT die innovative Geräteserie GUNT-Fluid Line an. Hiermit können Sie auch zu Corona-Zeiten Laborversuche durchführen: remote und digital.

Mehr Infos unter [www.gunt.de](http://www.gunt.de)

**Digitale Medien, reale Versuche**

- Kontrolle via Touchscreen
- intuitive Bedienung, keine Werkzeuggestaltung
- automatische Erkennung der Überfüllung
- sämtliche Messergebnisse digital
- Daten-Mitnahme an bis zu 12 Endgeräte



**gunt**  
 HANDEL GEB.

**pnt HYDRO**  
 SMART SOLUTIONS FOR HYDROLOGISTS

„smart solutions for hydrologists“

Profitieren Sie von unserem umfangreichen Angebot im Bereich der Hydrometrie und Umweltmesstechnik. Wir bieten innovative Produktlösungen von verschiedenen Herstellern und Partnern – alles aus einer Hand.

PNT-HYDRO unterstützt und berät Sie bei der Auswahl von Komponenten und Lösungen speziell für Ihren Anwendungsfall.

NEU! Weltweit kleinstes ADCP - RiverSurveyor RS51  
 Mehr Informationen unter: [pnt-hydro.com/rs51](http://pnt-hydro.com/rs51)



**quantum Hydromet**

für ein sicheres und einfaches Messdatenmanagement



# ExUS 2020 – Fortführung der Untersuchungen zum Starkregenverhalten in Nordrhein - Westfalen

Markus Quirnbach<sup>1</sup>, Thomas Einfalt<sup>2</sup>, Elke Freistühler<sup>3</sup>, Gerd Langstädtler<sup>4</sup>, Bernd Mehlig<sup>5</sup>, Vera Schimetzek<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Ruhr West (Mülheim a.d.R.), Lehrgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Hydrologie und Wasserbau, markus.quirnbach@hs-ruhrwest.de

<sup>2</sup>hydro & meteo GmbH, einfalt@hydrometeo.de

<sup>3</sup>dr. papadakis GmbH, efreistuehler@drpapadakis.de

<sup>4</sup>aquaplan GmbH, gl@aquaplan.de

<sup>5</sup>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV NRW), bernd.mehlig@lanuv.nrw.de  
vera.schimetzek@lanuv.nrw.de

## Einführung

Im Jahr 2010 wurde das F & E – Vorhaben „Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW“ (ExUS 2010) für den Zeitraum 1951 – 2008 durchgeführt. Seit dessen Abschluss stehen nun Messdaten aus zehn weiteren Jahren zur Verfügung. Auch die Fragen, die sich aus den Folgen des Klimawandels ergeben, sind vielschichtiger geworden. Insbesondere die Entwicklung von Starkregen kürzerer Dauerstufen (dieser Beitrag), die Veränderungen der Lufttemperatur sowie der Trockenzeiten als auch Erkenntnisse aus räumlich hoch aufgelösten Radarniederschlagsdaten (alle im separaten Beitrag) haben neben der Neuauflage, auch eine Erweiterung des Untersuchungsumfangs in der neuen ExUS 2020 – Studie erforderlich gemacht. Deren besonderes Merkmal ist unter anderem, dass gegenüber anderen Studien nicht nur einzelne Aspekte des Niederschlages, sondern umfassende und flächendeckende extremwertstatistische Auswertungen für NRW durchgeführt werden.

## Aufbau der Datenbank ExUS 2020

Die in ExUS – 2020 durchgeführten Untersuchungen basieren auf einem einheitlichen und für statistische Aussagen hinreichend geprüften Datenpool stationsbasierter Niederschlagsdaten. Ergänzt wird dieser Datenpool durch Radarniederschlagsdaten sowie durch Lufttemperaturdaten aus dem HYRAS – Datensatz. Der erste Teil dieses Beitrags beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Prüfung dieses komplexen Datenpools sowie mit den diversen Kriterien der Stationsauswahl für spezifische Fragestellungen. Abbildung 1 zeigt die Stationen mit nutzbaren Zeitreihen für den Gesamtzeitraum 1961 – 2018.

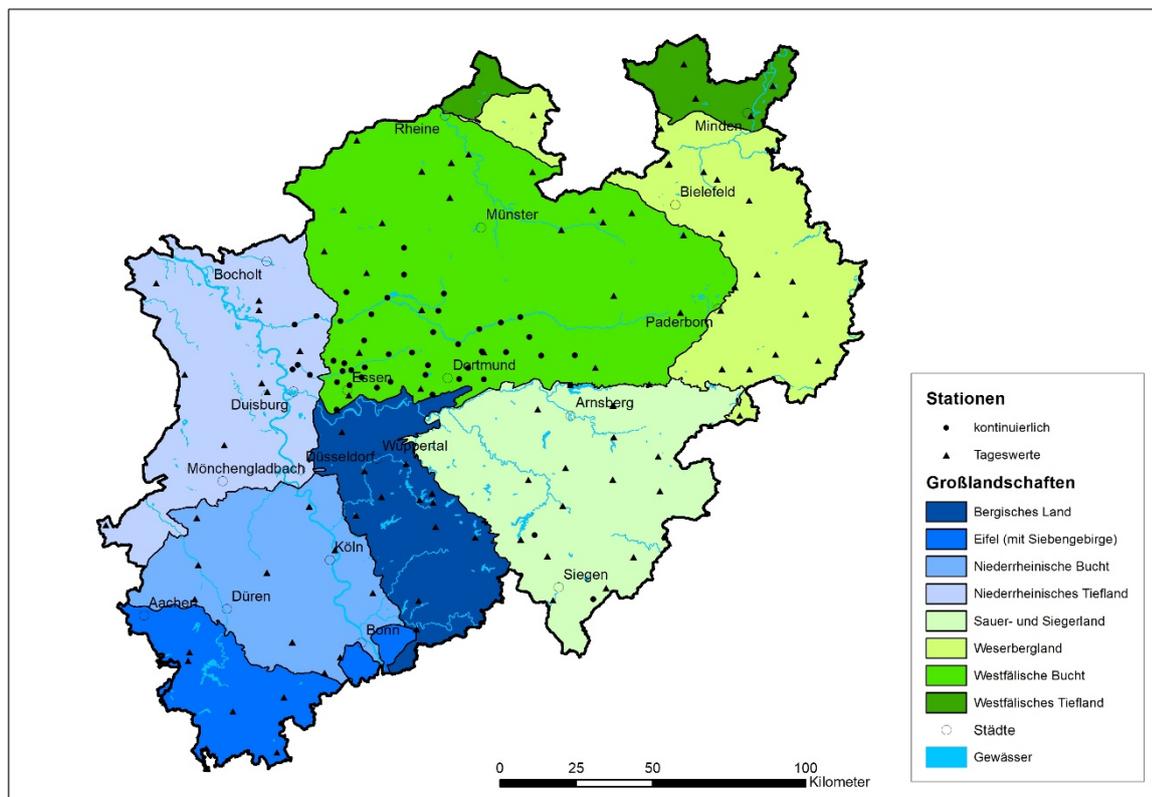


Abbildung 1: Stationen mit langen Zeitreihen (1961 – 2018), Dreiecke: Stationen mit kontinuierlichen Zeitreihen, Kreise: Stationen mit Tageswerten

## Entwicklung von Niederschlägen in NRW im Zeitraum 1961 – 2018

Die Entwicklung von Niederschlägen wird je nach Fragestellung über Trenduntersuchungen über den Gesamtzeitraum 1961 – 2018 oder durch den Vergleich der beiden Zeitscheiben 1991 – 2018 vs. 1961 – 1990 beschrieben. Da gerade für den Zeitraum ab 2001 eine überproportionale Zunahme an Starkregen vermutet wird, wird auch der Zeitraum 2001 – 2018 dem Zeitraum 1961 – 1990 gegenübergestellt. Sämtliche Untersuchungen wurden für Gesamt-NRW als auch für die Großlandschaften in NRW durchgeführt (Abbildung 1).

### Entwicklung von Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen

Gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 haben die Jahresniederschlagssummen seit 1990 um etwa 2 % zugenommen. Dabei haben die Niederschläge im Winterhalbjahr mit 0,5 % durchschnittlich weniger zugenommen als im Sommerhalbjahr (3,7 %). Die Trenduntersuchungen zu den Jahres-, Halbjahres- und Monatsniederschlagssummen zeigen jeweils nicht signifikante Veränderungen sowohl für Gesamt-NRW als auch für die Großlandschaften. Sie werden allerdings stark durch die trockene Dekade am Ende des Untersuchungszeitraums geprägt.

### Grenzwertüberschreitungen von Tagesniederschlagssummen

Grundsätzlich haben Starkregentage in NRW für mehrere Grenzwerte seit 1991 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961 – 1990 zugenommen. Die prozentualen Zunahmen liegen je nach Grenzwert zwischen 14 % und 22 %. Sämtliche Zunahmen der Starkregentage sind allerdings nicht signifikant (Signifikanzniveau nach Mann-Kendall 71,7 % – 89,5 %).

### **Entwicklung von Starkregen kurzer Dauerstufen ( $D < 24$ h)**

Bei kleinen, für die Stadtentwässerung relevanten Dauerstufen  $D < 24$  h können hingegen Zunahmen der Starkregen auf einem überwiegend sehr hohen Signifikanzniveau festgestellt werden. Für die Trenduntersuchungen der kurzen Dauerstufen wurde die Entwicklung partieller Serien für die Wiederkehrhäufigkeiten  $n = 2,71/a$  und die selteneren Starkregen  $n = 0,5/a$  sowie die Unterschiede zwischen statistisch ermittelten Niederschlagshöhen zwischen den zuvor angegebenen Zeitscheiben untersucht.

# Wann ist ein Trend ein Trend?

## Überlegungen zu Trends und Sprungstellen in Zeitreihen

Thomas Einfalt<sup>1</sup>, Benedikt Rothe<sup>2</sup>, Tobias Gehrmann<sup>2</sup>, Fabian Netzel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>hydro & meteo GmbH, einfalt@hydrometeo.de

<sup>2</sup>Hydrotec GmbH, benedikt.rothe@hydrotec.de, tobias.gehrmann@hydrotec.de

<sup>3</sup>Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik, fabian.netzel@hs-bochum.de

### Einführung

Im Jahr 2010 wurde das F & E – Vorhaben „Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW“ (ExUS 2010) für den Zeitraum 1951 – 2008 durchgeführt. Dabei traten erste Hinweise zu Tage, dass Änderungen in den Eigenschaften von Niederschlagsdatenreihen neben dem Klimawandel auch einer Änderung der Messsysteme zugeschrieben werden können. Zu dieser Thematik wurden im F+E-Vorhaben „Untersuchungen zur Anwendung von instationären Bemessungsansätzen in Wasserwirtschaft“ (UniWa) und in der Aktualisierung des Projektes ExUS in 2020 weitere Untersuchungen durchgeführt.

### Instationäre Eigenschaften von Messdatenreihen

Bei der Untersuchung langer Messdatenreihen kommen fast immer über die Jahrzehnte unterschiedliche Messtechniken zum Einsatz. Bei der kontinuierlichen Niederschlagsmessung sind dies Geräte mit Papieraufschrieb, Kippwaagen („Wippen“, seit ca. 1990) und im Anschluss Wägegeräte (ab ca. 2000). Der Zeitpunkt eines Messgerätewechsels ist dabei vom jeweiligen Betreiber abhängig.

Es ist schon länger bekannt, dass Niederschlagsmengen kurzer Dauerstufen (fünf Minuten bis zu einer Stunde) in unterschiedlicher Qualität vorliegen, je nach Messverfahren und Verarbeitung. Ein Mittel, um diese Unterschiede sichtbar zu machen, ist die Untersuchung von extremen Niederschlägen, zum Beispiel in Form von jährlichen oder partiellen Serien.

Ein sichtbarer und durch Verfahren wie Mann-Kendall detektierbarer Trend in langen Datenreihen ist also eine Kombination aus Änderungen in Klima, Messtechnik und Datenverarbeitung. Ein automatisches Detektieren von Effekten ist aufgrund der Vielzahl von Stationen mit Datenreihen erwünscht.

### Prüfverfahren

Als Prüfverfahren zur Detektierung von Änderungen in der Messtechnik, d.h. einer Sprungstelle, wurden in UniWa diverse Verfahren erprobt. Die genauesten Ergebnisse lieferte der Wilcoxon-Rangsummentests in Kombination mit einem Test zur Unterscheidung zwischen Trend und Sprungstelle. Der Wilcoxon-Rangsummentest diente zur Detektion des Zeitpunkts des maximalen Rangunterschieds zwischen den Rängen der Messwerte vor und nach dem jeweiligen Zeitpunkt. Dieses Verfahren nach Wilcoxon unterscheidet jedoch nicht zwischen Trend und Sprungstelle. Zu dieser Unterscheidung wurde ein Verfahren entwickelt, welches auf Sen's Slopes basiert. Dieses Verfahren vergleicht für die Messwerte vor und nach dem im Wilcoxon-Test erkannten Zeitpunkt des maximalen Rangunterschieds die jeweiligen Sen's Slopes mit den Sen's Slopes von zufällig über ein Monte-Carlo-Verfahren erzeugten Zeitreihen die auf der gleichen Verteilung (nach Maximum-Likelihood Schätzung) basieren.

## Ergebnisse

Das beschriebene Verfahren detektierte nur bedingt Sprungstellen in den untersuchten Zeitreihen. So wurden in 11-22% der Zeitreihen in den 5-15 Minuten Dauerstufen und in 2-7% der Zeitreihen in den 20-60 Minuten Dauerstufen Sprungstellen erkannt.

Während in UniWa mit jährlichen Serien gearbeitet wurde, untersuchte ExUS 2020 partielle Serien von 21 ausgewählten Stationen in NRW, jeweils für  $D = 5$  Minuten und  $D = 60$  Minuten. Es gab insgesamt nur zwei Übereinstimmungen zwischen Gerätewechsel und gefundener Sprungstelle. Die Ergebnisse zwischen partieller und jährlicher Serie stimmten meist überein.

## Diskussion

In der Regel ist es also nicht so, dass Gerätewechsel an einer Station automatisch in den extremen Datenreihen (jährliche oder partielle Serie) erkannt werden.

Andererseits zeigt ein Blick auf die Datenreihe der Station A, die als stationär eingeordnet wurde, dass hier ein Unterschied zwischen der Datenreihe vor und nach Wechsel des Messgerätes sowohl visuell (Abbildung 1) als auch bei Betrachtung von Mittelwert (vorher: 2.3; nachher: 3.2) und Standardabweichung (vorher: 1.9; nachher: 1.6) sichtbar ist. Dargestellte Werte sind Auftretensanzahlen von Elementen der partiellen Serie pro Jahr. Dieser Unterschied ist statistisch signifikant auf Basis eines Kolmogorov-Smirnov-Tests: es kann nicht angenommen werden, dass die Grundgesamtheiten identisch sind.

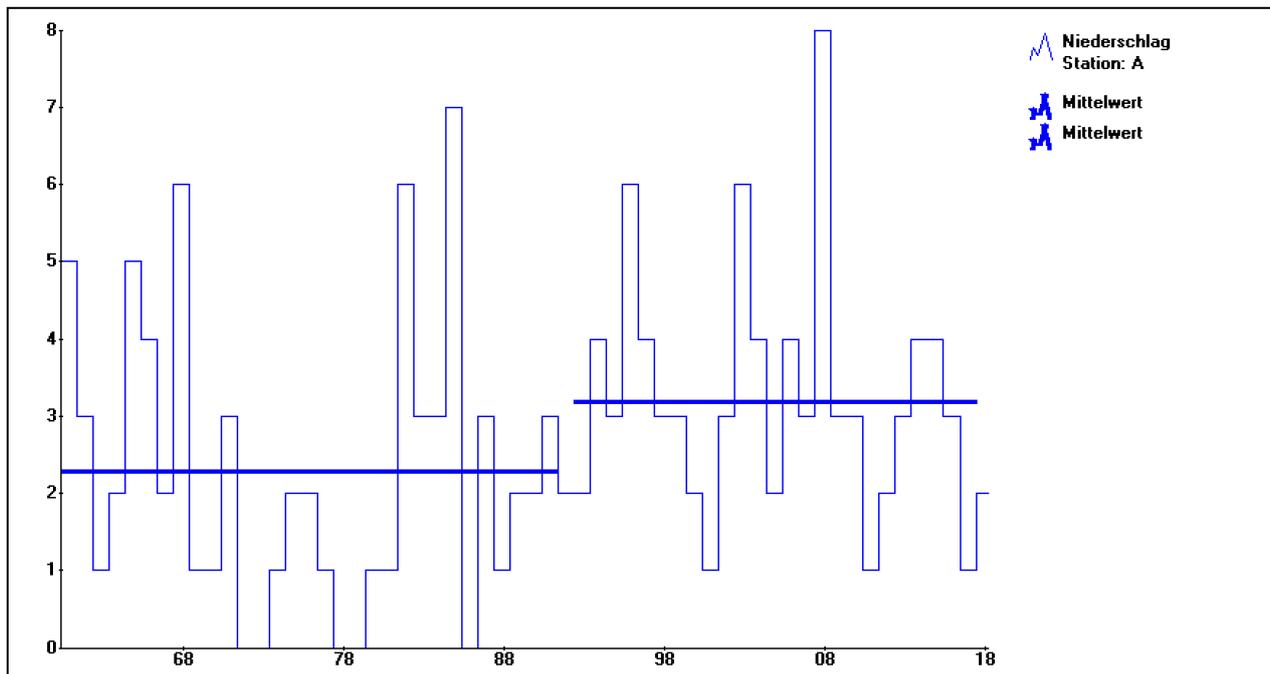


Abbildung 1: partielle Serie einer Station mit getrennten Mittelwerten vor und nach dem Gerätewechsel

## Ausblick

Weitere Arbeiten sollen eine allgemeine Vorgehensweise zur Detektierung sowie Unterscheidung von Trends und Sprungstellen entwickeln. Zudem sollen verschiedene Möglichkeiten der Berücksichtigung und Eliminierung von Instationaritäten in Zeitreihen betrachtet werden. Es ist sinnvoll, diese Verfahren mit Dateneigenschaften an Stationen vor und nach bekanntem Gerätewechsel zu verifizieren.

# Unsicherheiten in der radarbezogenen Auswertung von Starkregenereignissen

Adrian Treis<sup>1</sup>, Rike Becker<sup>1</sup>, Burkhard Teichgräber<sup>2</sup> und Angela Pfister<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Emschergenossenschaft und Lippeverband, Hochwasserinformationssystem und Hydrometeorologie, treis.adrian@eglv.de, rike.becker@eglv.de

<sup>2</sup>Emschergenossenschaft und Lippeverband, Geschäftsbereich Technische Services, teichgraeber.burkhard@eglv.de

<sup>3</sup>Emschergenossenschaft und Lippeverband, Abteilung Wasserwirtschaft, pfister.angela@eglv.de

## Einleitung

Im Zeitraum vom 9. bis 17. August 2020 etablierte sich über dem Westen Deutschlands eine Tiefdruckrinne, in deren Verlauf sich in der Emscher – Lippe Region (ELR) zahlreiche Gewitter, teils mit Unwetterpotenzial, bildeten. Charakteristisch war ein extrem lokales Auftreten sowie die langsame Verlagerung der Gewitterzellen. Dies führte zu sehr hohen Niederschlagsmengen, die insbesondere in kurzen Dauerstufen zu seltenen Wiederkehrzeiten führten. Der vorliegende Beitrag stellt anhand dieser Unwettersituation, in deren Verlauf es lokal zu zahlreichen Überflutungen kam, die praktischen Herausforderungen eines Wasserwirtschaftsverbands in der Auswertung und Einschätzung von Starkregenereignissen unmittelbar nach Eintreten des Ereignisses vor.

## Methodisches Vorgehen

Nach Schadensfällen sind zeitnah qualifizierte Aussagen zu Niederschlagssummen und Jährlichkeiten erforderlich. Diese Anfragen werden häufig aus dem Betrieb, aus der Planungs- und Bauabteilung, aber auch über die kommunalen Mitglieder gestellt. Zur Kommunikation mit der Öffentlichkeit steht darüber hinaus die Angabe des Starkregenindex (SRI) nach Schmitt et al. 2018 in den lokalen Schwerpunkten im Fokus.

Die zunächst erfolgende Auswertung auf Basis terrestrischer Messdaten stößt dann an ihre Grenzen, sobald die Stationen außerhalb der Ereignisschwerpunkte liegen. In diesem Fall kommen Radarniederschlagsdaten als flächenhaftes Abbild des Niederschlagsgeschehens zur Anwendung (Pfister et al. 2015). Die Anwendung der Produkte hängt von der Ereignisdauer, vom Ereignistyp, aber auch von möglichen Einflussgrößen wie Dämpfung oder Brightband ab. Eine Verwendung von unkorrigierten Radarniederschlagsdaten ist dabei unbedingt zu vermeiden, vielmehr stellt eine optimierte Aufbereitung eine wesentliche Voraussetzung für fundierte Aussagen im Schadensfall dar.

In der Starkregenauswertung verwenden EG und LV die Radarniederschlagsprodukte RY und RW des deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie das aus den DX-Daten abgeleitete dämpfungskorrigierte DX-Produkt (DX-D) (DWA, 2017)). Bei mehrstündigen oder stratiformen Ereignissen wird standardmäßig das RW-Produkt ausgewertet, da häufig Aussagen zu Dauerstufen größer einer Stunde erforderlich sind. Hier profitiert die ELR durch die große Anzahl an Aneichstationen, die im Rahmen der Radarkooperation der Wasserverbände NRW mit dem DWD in der RADOLAN-Routine zum Einsatz kommen (Treis und Pfister 2019). Die Aufbereitung erfolgt automatisiert über eine GIS-Applikation und beinhaltet die Berechnung der Ereignissumme, der maximalen Niederschlagssummen für die relevanten Dauerstufen und die Anwendung der

extremwertstatistischen Auswertung terrestrischer Stationen auf die Radardaten. Eine Einordnung gemäß Starkregenindex ist für extreme Niederschläge ebenfalls möglich.

Aufgrund der stündlichen Auflösung ist das RW-Produkt für kurze Dauerstufen nicht geeignet, zudem zeigen Radar- Regenschreibervergleiche für das Lippegebiet eine deutliche Unterschätzung der Regenhöhen sowie eine geringere räumliche Variabilität bei heftigen Starkregen (Krämer et al. 2019). In kürzeren Dauerstufen findet eine Auswertung der 5-minütigen RY- und DX-D Produkte statt.

Für das RY-Produkt erfolgt die GIS-gestützte Auswertung analog zum RW-Produkt, sodass auch Aussagen über kurze Dauerstufen möglich sind. Analysen haben jedoch gezeigt, dass sich Dämpfungseffekte und auch die verwendete Z-R Beziehung negativ auf die Güte der Daten auswirken, sodass spezifische Betrachtungen notwendig werden.

Insbesondere bei sehr heftigen und lokalen Starkregen, hat sich hier das DX-D Produkt bewährt. Die Aufbereitung findet in Echtzeit auf Basis der Software NVIS statt. Im neuesten Implementierungstand findet neben der Korrektur radarspezifischer Einflussgrößen eine räumlich-zeitliche Interpolation der Radarmatrizen auf 1-Minuten-Basis unter Verwendung von Optical Flow Verfahren statt. Die Umrechnung in Intensitäten erfolgt über ereignischarakteristische Z-R Beziehungen. Zur Minimierung systematischer Fehlerresiduen erfolgt eine nachgeschaltete, automatisierte Anpassung der korrigierten Radardaten an Bodenmessungen (Mean Field Bias Anpassung). Zudem bietet das Verfahren zudem eine lokale Optimierung, d.h. eine stärkere Berücksichtigung der Stationen im Ereignisumfeld bei der Anpassung an Stationsdaten. Anhand ausgewählter Ereignisse werden die Auswertungen der unterschiedlichen Produkte gezeigt und ihre Unsicherheiten bzw. Güte anhand von Radar- / Regenschreibervergleichen erläutert.

## Literatur

- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) (2017): Niederschlagserfassung durch Radar und Anwendung in der Wasserwirtschaft. Hennef (DWA-Themen, T2/2017).
- Krämer, S.; Treis, A. und Pfister, A. (2019): Radarregendaten für die Stadtentwässerung – Welche Güte ist erreichbar? In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 12 (2), S. 100–108. DOI: 10.3243/kwe2019.02.004.
- Pfister, A.; Treis, A. und Teichgräber, B. (2015): Der Einsatz von Radardaten für wasserwirtschaftliche Zwecke bei Emschergenossenschaft und Lippeverband. Korrespondenz Wasserwirtschaft (8), Nr. 2, Februar 2015, 115-124.
- Schmitt, T. G.; Krüger, M.; Pfister, A.; Becker, M.; Mudersbach, C.; Fuchs, L.; Hoppe, H. und Lakes, I.: Einheitliches Konzept zur Bewertung von Starkregenereignissen mittels Starkregenindex. In: KW Korrespondenz Wasserwirtschaft 11 (2), S. 82-88, DOI: 10.3243/kwe2018.02.001, zeitgleich erschienen in: KA Korrespondenz Abwasser, Abfall 65 (2), S. 113–120. DOI: 10.3242/kae2018.02.002.
- Treis, A. und Pfister, A. (2019): Flächenhafte Niederschlagserfassung mittels Radar – Erfahrungen aus 25 Jahren Radardatennutzung bei Emschergenossenschaft und Lippeverband. In: WasserWirtschaft (WaWi) 109 (7-8), S. 56–59

# Unsicherheitsbetrachtungen von Durchflussmessungen und deren Auswirkungen auf Hoch- und Niedrigwasserkennwerte

Felix Simon<sup>1</sup>, Florian Oestermann<sup>1</sup>, Fabian Netzel<sup>1</sup> und Christoph Mudersbach<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Bochum, Lehrgebiet Wasserbau und Hydromechanik, felix.simon@hs-bochum.de, florian.oestermann@hs-bochum.de, fabian.netzel@hs-bochum.de, christoph.mudersbach@hs-bochum.de

## Abstract

Bei wasserwirtschaftlichen und ingenieurhydrologischen Fragestellungen sind die Größen Wasserstand ( $W$ ) und Durchfluss ( $Q$ ) grundlegend für die Ermittlung von Bemessungswerten, die Planung wasserwirtschaftlicher Anlagen sowie diverser Unterhaltungsmaßnahmen. Darüber hinaus bilden die Größen  $w$  und  $Q$  die Grundlage für die Erstellung und Validierung von Wasserstands-Abfluss-Beziehungen und somit auch für die Ermittlung von Durchflussganglinien. Diese wiederum sind die Basis für extremwertstatistische Analysen, wie beispielsweise die Bestimmung von Hoch- und Niedrigwasserkennwerten, welche wiederum in der Bauwerksdimensionierung von großem Interesse sind.

Unter der Berücksichtigung immer größer werdender Datenmengen (Big Data), welche auch in der Hydrometrie Einzug gehalten haben, bedarf es einem gewissen Genauigkeitsanspruch an die Daten selbst, wobei diese möglichst hochaufgelöst, kontinuierlich und insbesondere fehlerfrei sein sollen. Der Einsatz verschiedener Verfahren zur Durchflussbestimmung und ebenso die Messsysteme selbst beinhalten von Natur aus einen gewissen Grad an Unsicherheiten, welcher aus systembedingten Messunsicherheiten, Ablesefehlern oder sonstigen Unsicherheiten resultiert. Durch die genannten Unsicherheiten wird eine fehlerfreie Bestimmung des Durchflusses beeinflusst. Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit und Aussagekraft einer Messung ist es zwingend notwendig die Qualität dieser zu bewerten (LAWA, 2018). Diese Angabe erfolgt nach DIN (2008) über die Beschreibung der Unsicherheit des Messergebnisses.

Im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsprojektes des Lehrgebiets für Wasserwesen (LWH) mit dem Wupperverband, der Emschergenossenschaft/Lippeverband sowie der Linksniederrheinischen Entwässerungs-Genossenschaft wurden detaillierte Untersuchungen und Bewertungen von Unsicherheiten bei Durchflussmessungen durchgeführt. Hierbei erfolgten die Berechnungen der Messunsicherheiten nach der DIN EN ISO 748 (DIN, 2008).

Es werden Teilergebnisse des Forschungsprojektes sowie weitergehende Untersuchungen am Beispiel eines Pegels dargestellt. Dies erfolgt in Form der Auswirkungen der Unsicherheiten aus den Durchflussmessungen, bezogen auf Hoch- und Niedrigwasserkennwerte. Hierfür wurden mittels der berechneten Messunsicherheiten neue Wasserstands-Abfluss-Beziehungen sowie daraus resultierende Durchflussganglinien für den oberen und unteren Unsicherheitsbereich ermittelt. Durch diese Betrachtung ergeben sich sowohl drei  $W$ - $Q$ -Beziehungen als auch drei Durchflussganglinien anhand derer die Hochwasserkennwerte  $HQ_5$ ,  $HQ_{10}$ ,  $HQ_{20}$ ,  $HQ_{50}$  und  $HQ_{100}$  sowie die Niedrigwasserkennwerte  $NM_7Q_5$ ,  $NM_7Q_{10}$ ,  $NM_7Q_{20}$ ,  $NM_7Q_{50}$  und  $NM_7Q_{100}$  neu ermittelt wurden.

## Literaturverzeichnis

DIN (2008): DIN EN ISO 748:2008-02 (02.2008), Hydrometrie - Durchflussmessung in offenen Gerinnen mittels Fließgeschwindigkeitsmessgeräten oder Schwimmern (ISO 748:2007). Berlin: Beuth Verlag.

LAWA (2018): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder. Pegelhandbuch. 5. Auflage. Berlin. Kulturbuch-Verlag GmbH

# Messdatenprüfung mit Hilfe von selbst lernenden Datenanalysetools als Bestandteil eines Messdatenmanagementsystems (MDMS)

Ioannis Papadakis<sup>1</sup>, Benjamin Mewes<sup>2</sup>, Frank Großklags<sup>3</sup>, Marko Siekmann<sup>3</sup>, Celeste Saldin<sup>1</sup> und Frank Pohl<sup>3</sup>

<sup>1</sup>dr. papadakis GmbH, ipapadakis@drpapadakis.de, c.saldin@drpapadakis.de

<sup>2</sup>OKEANOS Consulting GbR, benjamin.mewes@oceanos-consulting.de

<sup>3</sup>Stadt Bochum, Tiefbauamt, fgrossklags@bochum.de, fpohl@bochum.de, msiekmann@bochum.de

## Abstract

Die Zunahme der Urbanisierung in Verbindung mit den veränderten klimatischen und sozioökonomischen Aktivitäten hat die Eigenschaften des urbanen Wasserkreislaufes signifikant verändert. Die in der Vergangenheit und teilweise immer noch heute praktizierte sektorale Betrachtung von Systemkomponenten des Wasserkreislaufes ist nicht mehr ausreichend, um nachhaltige zielorientierte Lösungen für die urbane Wasserwirtschaft zu ermöglichen. Stattdessen sind ganzheitliche wasserwirtschaftliche Betrachtungen notwendig, welche die Wechselwirkungen unterschiedlicher Systemkomponenten des urbanen Wasserkreislaufes Rechnung tragen.

Um die Wechselwirkungen der Systemkomponenten jedoch quantifizieren zu können, müssen die beteiligten physikalischen Prozesse aus der Sicht der „Ursache-Wirkung“ bekannt sein. Dies kann nur erfolgen, wenn ausreichende relevante und adäquate Daten und Informationen für die unterschiedlichen Systemkomponenten vorliegen.

Daten und Informationen für die unterschiedlichen Systemkomponenten des urbanen Wasserkreislaufs werden in der heutigen Praxis zunehmend aus modelltechnischen Abbildungen abgeleitet. So wichtig die Extraktion von Informationen aus modelltechnischen Abbildungen ist, so defizitär kann unter Umständen ihre Aussagekraft sein. Modelle können nur bedingt physikalische Prozesse abbilden. Sie erzeugen Indikatoren, aus denen anschließend Informationen abgeleitet werden. Wie geeignet die modelltechnisch erzeugten Indikatoren sind, hängt u.a. von der Qualität und der Repräsentativität der verwendeten Daten für die modelltechnische Abbildung ab.

Messdaten in Kombination mit den Indikatoren aus modelltechnischen Abbildungen können stattdessen hoch qualitative und adäquate Informationen über das systemische Verhalten von Komponenten des urbanen Kreislaufes liefern, welche für die Entscheidungsfindung von nachhaltigen Lösungen in der urbanen Wasserwirtschaft notwendig sind.

Die Quantifizierung der Wechselwirkungen von unterschiedlichen Systemkomponenten und die notwendige Nachvollziehbarkeit des Verhaltens der beteiligten physikalischen Prozesse in einer ganzheitlichen wasserwirtschaftlichen Betrachtung erfordert somit eine umfangreiche Erfassung und Auswertung von Messdaten und Informationen. Dies kann nur mit Hilfe eines quantifizierten EDV-gestützten Messdatenmanagementsystems (MDMS) gewährleistet werden. Die Stadt Bochum hat ein solches System aufgebaut und im Betrieb genommen.

Allerdings setzt die Bereitstellung von Messdaten aus dem MDMS für die Verwendung als Grundlage für Planungsaufgaben, Nachweise von Qualitätszielen und Steuer- und Regelalgorithmen voraus, dass diese Daten zuverlässig sind.

Messdaten sind oft mit Messfehlern behaftet. Ungeprüftes Datenmaterial birgt sowohl Gefahren für die Planung als auch für den Betrieb, die erheblichen wirtschaftlichen Auswirkungen haben können. Sehr kritisch ist der Fall, wenn ungeprüfte Messdaten für Echtzeit-Vorhersage oder Steuerung von Entwässerungsanlagen verwendet werden. Die Reaktionszeit in solchen Fällen ist sehr kurz und die Auswirkungen von Fehlinformationen (Messfehler) unabsehbar.

Mit Hilfe von selbst lernenden Datenanalysewerkzeugen können Fehler in Sensordaten von wasserwirtschaftlich Anlagen mittels Musteranalysen identifiziert werden. Dabei werden die Zeitreihen der Sensordaten auf wiederkehrende Muster hin untersucht, um Gruppen an Zuständen und Fehlern aufzudecken. Da die Anzahl der Gruppen im Vorhinein nicht bekannt ist, muss diese Analyse lernfähig sein und in einem Feedback-Prozess ablaufen. Im Rahmen der Systemanalyse werden dabei a) die Sensordaten für sich analysiert und b) im Kontext ihres umgebenden Systems.

Diese Art der Fehleranalyse über die Musteranalyse ist *dynamisch* und nicht an fixe Schwellwerte aus historischen Betrachtungen gekoppelt. Damit ist sie im Gegensatz zu anderen Ansätzen in der Lage auch abrupte und schleichende Veränderungen im beobachtenden System zu erfassen. Die erzeugten Muster müssen unter Berücksichtigung vorhandener Metadaten analysiert und schlussendlich in Qualitätsgruppen A, B und C kategorisiert werden.

Diese Qualitätsgruppen geben auf den ersten Blick tiefer gehende Information über den beobachteten Messwert. In der Qualitätsgruppe A befinden sich alle Situationen, die den Normalzustand des Sensors umfassen, in der Qualitätsgruppe C auf der anderen Seite sind alle Situationen mit eindeutigen Fehlern und Abweichungen im unplausiblen Messbereich. Die in Qualitätsgruppe Gruppe B einsortierten Messwerte müssen genauer untersucht werden. Liegt ein Sensorausfall vor? Wie viele Messungen mit einem gleichen Muster existieren in Qualitätsgruppe B? Gibt es zeitliche Muster wann Messwerte in Gruppe B auftauchen und damit Hinweise auf Veränderungen der Umweltbedingungen des Sensors? Anhand von zwei Bauwerken der Stadt Bochum wird die Vorgehensweise und das Ergebnis erläutert.

# Kontinuierliche Anpassung von Wasserstands-Durchfluss-Beziehungen

Henning Ooppel<sup>1</sup>, Alexander Hartung<sup>2</sup> und Benjamin Mewes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Okeanos Consulting GbR, henning.oppel@okeanos-consulting.de, benjamin.mewes@okeanos-consulting.de

<sup>2</sup>Emschergenossenschaft und Lippeverband, Pegelwesen und Abfluss, Hartung.Alexander@eglv.de

Die Wasserstände der Emscher werden durch Gewässerpegel erfasst, mit Hilfe der zugehörigen Wasserstands-Durchfluss (W-Q) Beziehung werden die Beobachtungen in Durchflusswerte transformiert. Aufgrund vielfältiger Veränderungen im Gewässer, wie Erosion und Vegetation, unterliegen auch die W-Q-Beziehungen über die Jahre hinweg einem steten Wandel. Durch ständige Kontrollmessungen wird versucht, diesem Umstand Rechnung zu tragen, dennoch sind zwei Mittelwasser-, eine Niedrigwasser- und eine Hochwassermessung pro Jahr nicht immer ausreichend, um den komplexen Veränderungen am Standort gerecht zu werden. Im Einzugsgebiet der Emscher wurde daher exemplarisch ein Weg gesucht, wie W-Q-Beziehungen im operationellen Betrieb zusätzlich zu den nach wie vor notwendigen Kontrollmessungen durch intelligente Datenanalyse kontinuierlich überprüft und angepasst werden können. Darüber hinaus bietet diese Methode auch die Möglichkeit, an neuen Standorten ebenfalls W-Q-Beziehungen zu ermitteln, die dann im Anschluss durch Kontrollmessungen verifiziert werden. Für den Pegel Dortmund-Dorstfeld wurde die W-Q-Beziehung eines lernenden Pegels beispielhaft automatisiert nachgeführt.

Die grundlegende Idee des lernenden Pegels ist eine Längsschnittvalidierung. Sind im Ober- wie im Unterlauf eines Gewässerpegels weitere Pegelstationen angeordnet, kann mit Hilfe eines hydraulischen Modells das Durchflussgeschehen entlang des Gewässerabschnittes simuliert werden (vgl. Abbildung 1). Somit wird eine Schätzung des Durchflusses an der Pegelstation geliefert. Die Wasserstände des Pegels liefern mit Hilfe der zugeordneten W-Q-Beziehung eine weitere Schätzung. Stimmen die Schätzungen nicht überein, muss einer der beiden Modellansätze nachgeführt werden.

Beide Schätzungen sind allerdings mit strukturellen sowie mit Parameterunsicherheiten behaftet. Daher wurden beide Modelle als Ensemble mit je 100 Parametrisierungen betrieben und ihre Schätzungen des Durchflusses mit Hilfe eines Ensemble-Kalman-Filters (EKF) kombiniert. Der EKF kombiniert die Schätzungen der Ensembles unter der Berücksichtigung ihrer jeweiligen Unsicherheiten und führt gleichzeitig die Unsicherheit der kombinierten Schätzung nach.

In der Fallstudie am Pegel Dortmund-Dorstfeld wurde ein 20 km langer Gewässerabschnitt betrachtet und die W-Q-Beziehung des Pegels Dorstfeld als unbekannt angenommen. Das Ensemble des hydraulischen Modells wurde über einen Zeitraum von 12 Monaten an die beobachteten Abflüsse von Ober- und Unterlieger angepasst. Die Nachführung der W-Q-Beziehung erfolgte dann schrittweise. Zunächst wurden die Durchflusswerte der beiden Modellensembles für 500 Zeitschritte simuliert. Die Varianz der Modellensembles diente der Initialisierung des EKF und quantifiziert die Unsicherheit beider Schätzungen. Mit Hilfe des EKF wurde dann eine kombinierte Schätzung der Durchflussganglinie für die zurückliegenden 500 Zeitschritte erstellt. Im Anschluss wurde das Modellensemble mit der größeren Unsicherheit, d.h. der größeren Varianz im zurückliegenden Zeitabschnitt, auf Grundlage der neu geschaffenen Datenunsicherheit neu kalibriert.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass das Anlernen einer W-Q-Beziehung möglich ist. Die Unsicherheit der erlernten Beziehung hängt dabei maßgeblich von der Unsicherheit der gewählten Modellstruktur sowie der Geschwindigkeit des Lernprozesses ab. Letztere lässt sich über die Anzahl der nachkalibrierten

Ensemblemitglieder steuern. Bei moderater Lernrate wurde eine adäquate Abbildung der wahren W-Q-Beziehung nach etwa 9 Monaten Beobachtungsdauer erreicht. Ein weiterer entscheidender Parameter ist der Vertrauenswert gegenüber dem verwendeten hydraulischen Modell. Der EKF verwendet diesen Parameter, um eine Überbewertung einzelner Beobachtungen/Simulationen zu verhindern. Dieser Vertrauenswert ist besonders sensitiv, da er die Auswahl der W-Q-Beziehungen für Wertebereiche mit geringen Häufigkeiten steuert.

Neben den Erfahrungen aus der Fallstudie wird ein Ausblick auf die Verwendung von Machine Learning Algorithmen zur Beschreibung von W-Q-Beziehungen gegeben, da sie helfen können, strukturelle Unsicherheiten zu eliminieren und komplexe Beziehungen abzubilden. Des Weiteren wird die Anwendung in der operationellen Hochwasservorhersage sowie Möglichkeiten zur Ergänzung von Messnetzen in Kopfgebieten, d. h. ohne Durchflussmessung am Oberlauf, diskutiert.

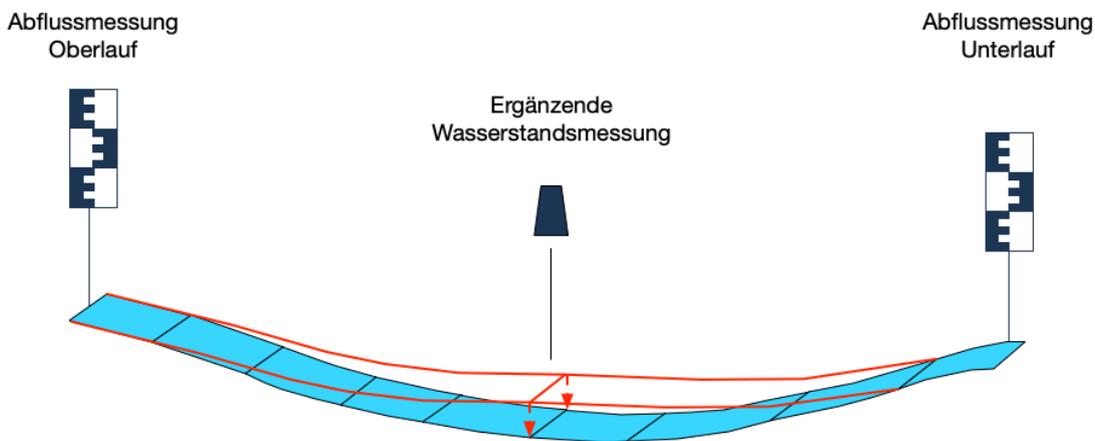


Abbildung 1: Systemskizze zur Umsetzung eines lernenden Pegels. Eine Wasserstandsmessung wird zwischen zwei Durchflussmessungen positioniert und das Durchflussgeschehen mit Hilfe eines hydraulischen Modells beschrieben (blau). Die W-Q-Beziehung am Ort der Wasserstandsmessung wird anschließend im laufenden Betrieb nachgeführt (rot).

# Abflussermittlung an kraftwerksbeeinflussten Fließgewässern

Johannes Hubmann<sup>1</sup> und Gabriel Stecher<sup>1</sup>

<sup>1</sup>viadonau, Österreichische Wasserstrassen - Gesellschaft mbH, johannes.hubmann@viadonau.org

## Einleitung

Die Agenden des hydrographischen Dienstes werden am österreichischen Donauabschnitt von viadonau bearbeitet (Wasserrechtsgesetz 1959, §59i, Abs. 4). Diese beinhalten u.a. die Ermittlung von kontinuierlichen Zeitreihen des Abflusses an ausgewählten Messstellen, wofür auf Basis von Durchflussmessungen laufend Schlüsselkurven (SK) erstellt werden. Anthropogene Einflüsse, z.B. der Rückstau von Wasserkraftwerken (KW), verändern die Möglichkeiten der Abflussermittlung und erschweren die Erstellung von SK (Staudinger 2017). Bei traditionellen SK dient der Wasserstand einer Messstelle als einziger Input. Da der Wasserstand an etwa 80% der österreichischen Donauabschnitte insbesondere im Niedrig- und Mittelwasserbereich kraftwerksbeeinflusst ist, liefert dieser einfache Ansatz nicht die gewünschte Genauigkeit. Beispielsweise ergeben traditionelle SK gelegentlich einen Abfluss gleich Null, wenn ein KW den Stau im Rahmen der zulässigen Toleranz senkt. Vorgestellt wird ein Ansatz zur Verbesserung der Abflussermittlung an kraftwerksbeeinflussten Gewässern, der an einem ausgewählten Donauabschnitt getestet wurde.

## Untersuchungsgebiet, Daten und Methode

Als Untersuchungsgebiet ausgewählt wurde der Stauraum des Kraftwerks Ybbs-Persenbeug (KW-YP) mit der Messstelle Grein (Strom-km 2079,1; MQ = 1805 m<sup>3</sup>/s), an der Abflussmessungen seit dem Jahr 2000 in homogener Qualität vorhanden sind. Zudem sind für die im Rückstaubereich des KW-YP gelegenen Messstellen Grein, Wallsee (Strom-km 2092,9) sowie am Oberwasserpegel des KW-YP (Strom-km 2060,7) Zeitreihen mit kontinuierlichen, ebenfalls kraftwerksbeeinflussten, Wasserstandsdaten und einer Datenübertragung in Echtzeit verfügbar.

Mit der weit verbreiteten Statistik-Software R wurde ein multiples lineares Regressionsmodell (MLR) erstellt, bei dem der Abfluss Grein aus den Wasserstandsdaten in Grein, Wallsee und KW-YP geschätzt wird. Dafür wurden Abflussmessungen mit  $Q < 2700 \text{ m}^3/\text{s}$  herangezogen, da bei höheren Abflüssen der Stau des KW gelegt wird und sich ein freies Fließgefälle einstellt, bei dem die traditionelle SK ausreichend genaue Abflüsse liefert. So gingen 89 Abflussmessungen mit den zum jeweiligen Zeitpunkt gemessenen Wasserständen in Grein, Wallsee und KW-YP in das Modell ein. 59 Messungen (ca. 2/3) wurden zur Schätzung der Koeffizienten verwendet. Mit den restlichen 30 Messungen (ca. 1/3) wurde das Modell validiert.

## Ergebnisse, Diskussion

Für das Regressionsmodell wurden im Zuge mehrerer Tests die Wasserstände in Grein ( $W_{Grein}$ ), Wallsee ( $W_{up}$ ) und KW-YP ( $W_{down}$ ) als signifikant ( $p < 0.001$ ) bestimmt und folgendes MLR zur Schätzung des Abflusses ( $Q_{Grein}$ ) verwendet:

$$Q_{Grein} = \beta_0 + \beta_1 * W_{Grein} + \beta_2 * W_{up} + \beta_3 * W_{down} + \epsilon$$

Bei Auswertung des Validierungsdatensatzes von 30 Messungen konnte ein MAE (mittlerer absoluter Fehler) von  $39 \text{ m}^3/\text{s}$  sowie ein RMSE (root mean square error, Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung) von  $55 \text{ m}^3/\text{s}$  erzielt werden. Die maximale absolute Abweichung lag bei  $125 \text{ m}^3/\text{s}$  (entspricht 11% von  $1102 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Im Vergleich dazu lag der MAE bei der traditionellen SK für denselben Datensatz bei  $330 \text{ m}^3/\text{s}$  und der RMSE bei  $460 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Abbildung 1 zeigt geschätzte Abflüsse auf Basis des MLR (rot). Ausreißer nach unten treten im Gegensatz zur traditionellen SK (schwarz) nicht mehr auf. Die Darstellung von Abflusszeitreihen der nächstgelegenen KW (türkis) erlaubt eine zusätzliche visuelle Validierung.

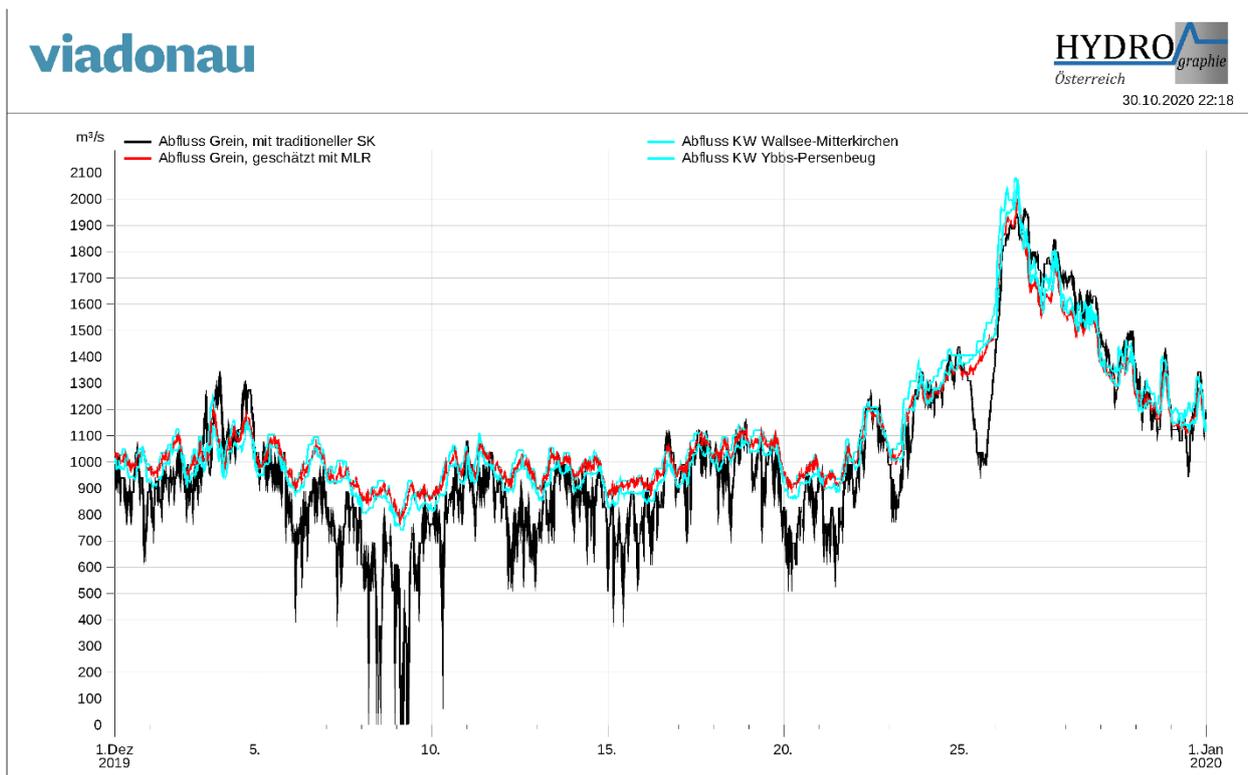


Abbildung 1: Abflussermittlung mittels multiplen Regressionsmodells am Pegel Grein für den Dezember 2019

## Schlussfolgerung und Ausblick

Die mit dem MLR geschätzten Abflüsse können während Niedrasserperioden als realistisch eingestuft werden und stellen eine Verbesserung im Vergleich zu den mit der traditionellen SK ermittelten Abflüssen dar. Das Regressionsmodell ist aufgrund seiner Einfachheit für die Abflussermittlung in Echtzeit geeignet und hat sich in ersten Tests bewährt.

Künftig wollen wir die mögliche Anwendung dieses Ansatzes bei jahreszeitlich unterschiedlichem Einfluss der Vegetation auf das Abflussgeschehen untersuchen sowie die Eignung anderer statistischer Verfahren zur Abflussermittlung prüfen. Jedenfalls wird die vorgestellte Methode bei viadonau weiterentwickelt und laufend im Echtzeitbetrieb validiert.

## Literatur

Staudinger, B. (2017): Hydrologie im Wandel - anthropogen oder natürlich? – Poster beim Tag der Hydrologie 2017 in Trier

# Hydrographische Vermessung von Binnengewässern – Von der relativen Tiefenmessung zum Höhenmodell

Rouven Borchert<sup>1</sup>, Brigitte Gundlich<sup>1</sup> und Benno Schmidt<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Hochschule Bochum, Fachbereich Geodäsie, rouven.borchert@hs-bochum.de, brigitte.gundlich@hs-bochum.de, benno.schmidt@hs-bochum.de

## Einleitung

Hydrographische Vermessungen im Binnenbereich werden beispielsweise auf Stauseen und in Sand- und Kiesgruben angewendet. Für die effiziente Erfassung der Unterwassertopographie werden dazu häufig Multibeam-Echolotsysteme zur mobilen Datenerfassung eingesetzt. Die Prozesskette (siehe Abbildung 1) von der Datenerfassung mit dem Fächerecholot bis zur Erstellung von Höhenmodellen wird am Beispiel des Messboots des Fachbereichs Geodäsie der Hochschule Bochum behandelt. Dabei wird auf Aspekte der Qualität der hydrographischen Vermessung eingegangen.

## Multisensorsystem Messboot

Bei der hydrographischen Vermessung dient das Messboot als Plattform für die mobile Datenerfassung. Das Fächerecholot ist zur Datenerfassung als Sensor in das Multisensorsystem integriert. Zu dem Multisensorsystem gehören als Navigationssensoren auch eine inertielle Messeinheit (IMU) und GNSS (Global Navigation Satellite System). Für die hydrographische Vermessung muss das Gesamtsystem kalibriert und die einzelnen Sensoren müssen synchronisiert sein. Dazu müssen die Lage und Orientierung der Bezugssysteme der Sensoren zueinander und bezogen auf die Plattform bekannt sein.

## Fächerecholotmessungen

Bei der Vermessung werden mit dem Fächerecholot mobil Daten erfasst. Dabei wird basierend auf der Laufzeitmessung von ausgesandten Ultraschallimpulsen der Gewässeruntergrund flächenhaft aufgenommen. Für die Tiefenmessung muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls in den verschiedenen Wasserschichten bekannt sein. Dazu wird die Schallgeschwindigkeit im Gewässer tiefenabhängig mit einer Schallgeschwindigkeitssonde bestimmt. Das so gewonnene Schallgeschwindigkeitsprofil wird im Postprocessing an den Beobachtungen des Fächerecholots angebracht. Neben der Erfassung des Gewässeruntergrunds kann der Messvorgang durch Feldkalibrierungen ergänzt werden, um die relative Orientierung des Fächerecholots zur Plattform zu überprüfen oder anzupassen.

## Trajektorienbestimmung

Die Bestimmung der Position und Orientierung des Messboots erfolgt mit Hilfe von Navigationssensoren (IMU und GNSS). Auf Binnengewässern wird für die GNSS-Positionierung RTK (Real Time Kinematic) genutzt. Dazu wird SAPOS-HEPS (Hochpräziser Echtzeit-Positionierungs-Service des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung) verwendet. Die so bestimmten ellipsoidischen Höhen haben eine Genauigkeit von 2-3 cm und sind im ETRS89 gegeben.

## Georeferenzierung

Im Zuge der Georeferenzierung werden die relativen Beobachtungen des Fächerecholots mit der Trajektorie verknüpft und dreidimensionale Koordinaten des Gewässeruntergrunds berechnet. Voraussetzung hierfür ist ein gemeinsames Zeitsystem der Navigations- und Fächerecholotrüstung.

## Postprocessing

Dreidimensionale georeferenzierte Punktwolken und Modelle stehen bereits in Echtzeit bzw. Nahe-Echtzeit zur Verfügung. Im Postprocessing wird das aufgenommene Schallgeschwindigkeitsprofil des Gewässerkörpers genutzt, um die mit dem Fächerecholot gemessenen Tiefen zu korrigieren. Weiter werden an den Fächerecholotmessungen verschiedene Filtertechniken angewendet. Die Qualität der Ergebnisse kann verbessert werden, indem zum Beispiel die Georeferenzierung überarbeitet wird. Dazu können die Ergebnisse der Feldkalibrierung genutzt werden.

## Modellerstellung

Zur Datenreduktion wird die unregelmäßige 3D-Punktwolke auf ein regelmäßiges zweidimensionales Raster abgebildet. Zum Beispiel 1m x 1m. Diese Darstellung ist von Vorteil, wenn Veränderungen des Gewässeruntergrunds von Interesse sind. Abschließend werden die ellipsoidischen Höhen in das gewünschte Bezugssystem, z.B. DHHN2016 transformiert.

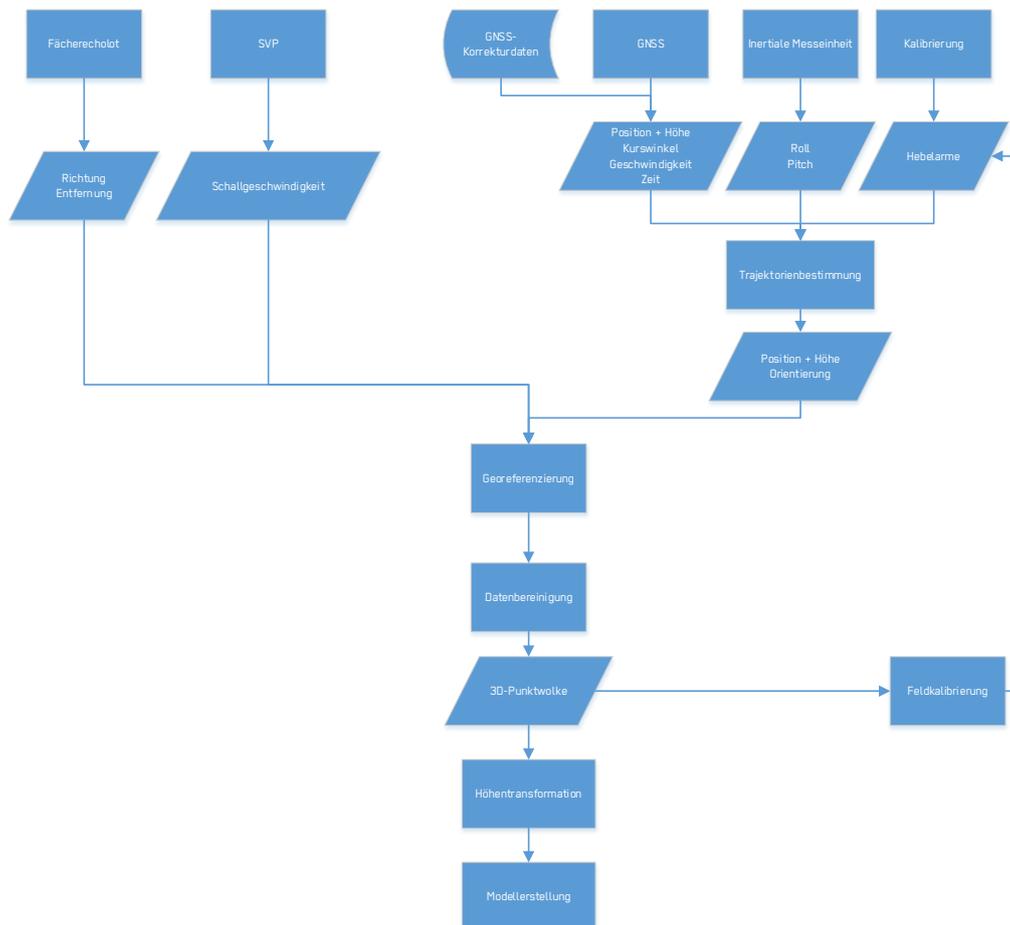


Abbildung 2 – Prozesskette

## Literatur

International Hydrographic Organization. (2005). *Manual on hydrography*. Monaco: International Hydrographic Bureau.

# Optimierte Ultraschall-Laufzeitmessung und indirekte Abflussermittlung am Pegel Villigst im Vergleich

Torsten Lambeck<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW, Fachbereich Hydrologie, torsten.lambeck@lanuv.nrw.de

## Hintergrund und Historie der Ultraschall-Laufzeitmessung am Pegel Villigst

Der Pegel Villigst erfasst mit seiner Einzugsgebietsfläche von 2012,76 km<sup>2</sup> knapp die Hälfte des Einzugsgebiets der Ruhr und erfüllt eine zentrale Funktion für die Überwachung des mengenmäßigen Zustands des Gewässersystems. Neben den allgemeinen Aufgaben eines gewässerkundlichen und Hochwasserinformationspegels liefert die Anlage nach dem Ruhrverbandsgesetz gemeinsam mit dem Pegel Hattingen die Bezugsgröße für die Abflussregelung durch den Ruhrverband. Im Fall Villigst sind dies - soweit nicht durch die Aufsichtsbehörde im Ausnahmefall anders bestimmt - 8,4 m<sup>3</sup>/s für das gleitende Fünf-Tages-Mittel und 7,5 m<sup>3</sup>/s für den einzelnen Tageswert, was einer Abflusspende von 4,2 bzw. 3,7 l/(s·km<sup>2</sup>) entspricht. Die Einhaltung dieser gesetzlich festgelegten Mindestabflüsse hat der Ruhrverband bei Niedrigwasser im Bedarfsfall durch Einspeisung mitunter sehr erheblicher Wassermengen aus seinen Talsperrenspeichern sicher zu stellen. Der an die am Pegel ermittelten Abflusswerte gerichtete Anspruch hinsichtlich ihrer Belastbarkeit, Genauigkeit, Ausfallsicherheit und zeitnahen Verfügbarkeit ist daher regelmäßig hoch und geht über die Anforderungen hinaus, die im Regelfall an die Datenerhebung bei Niedrigwasserverhältnissen zu stellen sind.

Die Messstelle Villigst wurde im Jahr 1930 eingerichtet und besteht in der derzeitigen Ausbausituation mit Pegelhaus, Messprofil und Seilkrananlage seit 1963. Die Abflussermittlung erfolgte zunächst wie für die Mehrzahl der Landespegel nach wie vor üblich indirekt aus kontinuierlich aufgezeichneten Wasserständen über eine aus Momentaufnahmen ermittelte Durchflusskurve. Zum Ausgleich kurzzeitiger Verschiebungen der Wasserstands-Abfluss-Beziehung kam das Stau- bzw.  $\Delta W$ -Verfahren zum Einsatz. Die damit einhergehende Anforderung, für die Abflussermittlung Veränderungswerte  $\Delta W$  im Nachgang aus Abflussmessungen zu bestimmen, erschwerte die zeitnahe Bereitstellung exakter Abflusswerte. Durch den Fortschritt des hydrologischen Messwesens eröffnete sich die Möglichkeit, Abflüsse mittels Ultraschall-Laufzeitmessung kontinuierlich direkt zu messen und digital zu übertragen. Als erste Messstelle des Landes wurde Villigst 1997 mit einer entsprechenden stationären Messeinrichtung nach dem seinerzeitigen Stand der Technik ausgestattet. Diese war zunächst als Einstreckenanlage mit 2 Messebenen für wechselnde Wasserstandsverhältnisse konzipiert. Die untere Messgrenze orientierte sich an den gesetzlich festgelegten Mindestabflüssen.

## Problemstellungen im Praxisbetrieb und Anpassungen der Laufzeitanlage

Die Umstellung auf die kontinuierliche Laufzeitmessung als maßgebliches Verfahren der Abflussermittlung erforderte im Praxisbetrieb eine Reihe von Anpassungen. Zur Gewährleistung belastbarer Messergebnisse auch bei veränderlichen Anströmwinkeln wurde die Anlage 2003 zunächst auf zwei Kreuzstrecken erweitert. Beeinträchtigungen der Signalübermittlung durch flutende Wasserpflanzen und Ansammlungen von Treibzeug an den Ultraschallwandlern bildeten ein wiederkehrendes Problem und ließen sich auch durch bauliche Anpassungen wie den Einbau von Abweisern nicht vollständig ausschließen. Darüber hinaus erwies sich die Kontrolle des maßgeblichen Messquerschnitts als verhältnismäßig aufwändig. Unter den extremen Niedrigwasserbedingungen des Jahres 2018 konnte die kontinuierliche Abflussmessung schließlich nicht mehr

fortgesetzt werden, da die Reduzierung der Mindestwasserführung den Wasserspiegel unter die Abschaltgrenze der Wandler fallen ließ. Mit Beginn des Hydrologischen Sommerhalbjahrs 2018 wurde zunächst wieder auf das Verfahren der indirekten Abflussermittlung mit Hilfe einer aus der Gesamtheit aller Abflussmessungen am Standort ermittelten WQ-Beziehung zurückgegriffen.

Nach grundlegender Neukonzeption wurde die Anlage im November 2019 nach dem heutigen technischen Stand ertüchtigt und im Hinblick auf die Datenqualität, Handhabung und Ausfallsicherheit in mehrfacher Hinsicht optimiert. Im Anschluss an eine Übergangszeit, in der zunächst Vergleichsmessungen mit Moving-Boat-ADCP vorgenommen wurden, bildet die Ultraschall-Laufzeitmessung inzwischen wieder die Grundlage der Abflussermittlung am Pegel Villigst. Parallel stehen die indirekt ermittelten Abflüsse noch in Art einer redundanten Ganglinie zum Vergleich zur Verfügung. Die Abweichungen der mit den beiden unterschiedlichen Verfahren ermittelten Werte voneinander bewegen sich dabei in einer Größenordnung, die im Niedrigwasserfall auch zwischen einzelnen Momentaufnahmen zu erwarten wäre.

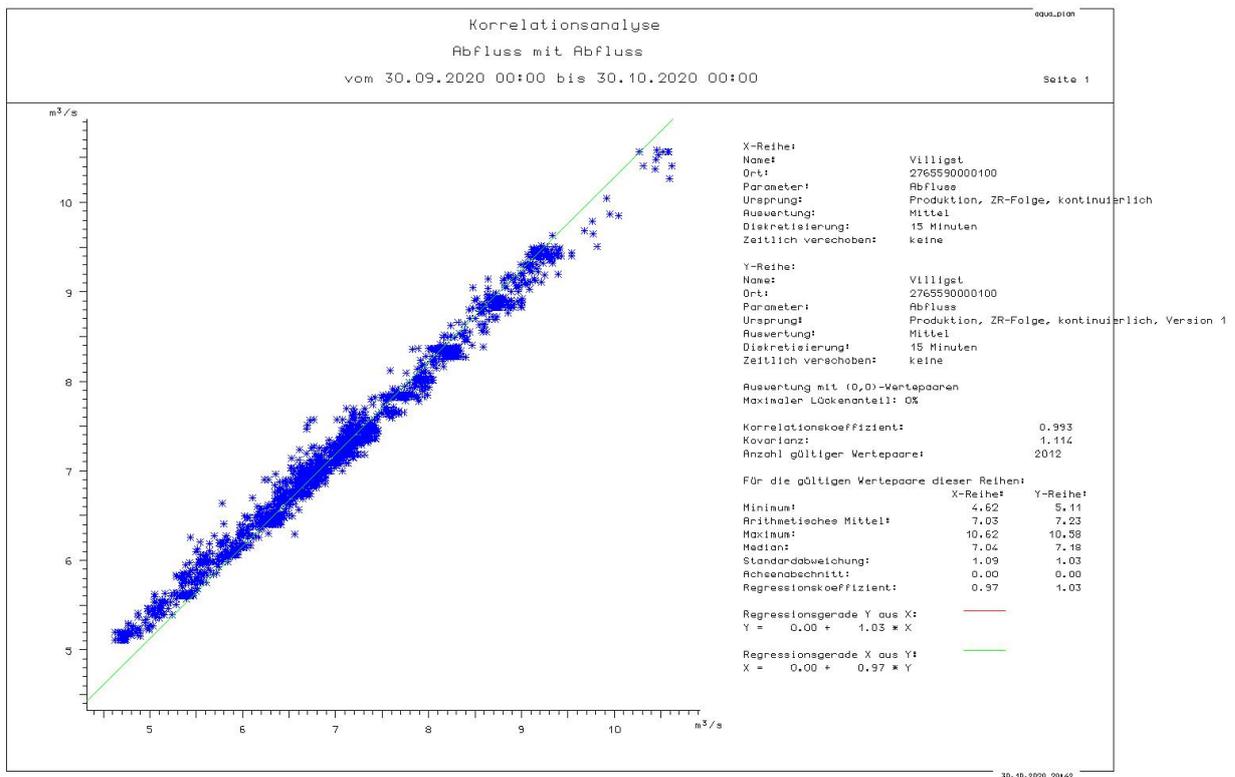


Abbildung 1: Korrelation der 15-Minuten-Mittel direkt und indirekt ermittelter Abflüsse am Pegel Villigst im Oktober 2020, Rohdaten

## Literatur

- Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2018): Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch, Teil B Wasserstand und Abfluss - Binnen. Berlin, Kulturbuch-Verlag, S. 57-60.
- Dyck, S., Peschke, G. (1995): Grundlagen der Hydrologie. Berlin, Verlag für Bauwesen, S. 102-105.
- Morgenschweis, G. (2010): Hydrometrie. Berlin Heidelberg, Springer, S. 410-431

# Kontinuierliche Messdatenerfassung mit Open-source-Hardware am Beispiel eines modularen Arduino-Datenlogger-Konzepts

Jannis Valldorf<sup>1</sup>, Peter Eichendorff<sup>1</sup>, und Andreas Schlenkhoff<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bergische Universität Wuppertal, Lehr- und Forschungsgebiet Wasserwirtschaft und Wasserbau, jannis.valldorf@uni-wuppertal.de, eichendorff@uni-wuppertal.de, schlenkhoff@uni-wuppertal.de

## Abstract

Der Beitrag diskutiert den Einsatz von Open-source-Hardware in der Hydrometrie am Beispiel eines Datenlogger-Konzepts, das auf der Physical-Computing-Plattform Arduino (vgl. arduino.cc 2020) basiert. Das Datenlogger-Konzept soll in der Hauptsache dem Betrieb digitaler Umwelt-Messsensorik dienen. Im Wesentlichen ist hierbei die Ansteuerung und Auslese der angeschlossenen Sensorik sowie die Verarbeitung, die lokale Speicherung und Fernübertragung der gewonnenen Messdaten zu gewährleisten. Das Konzept sieht ein Basismodul vor, das durch diverse Arduino-kompatible Erweiterungsmodule individuell an den Messzweck, die anzuschließende Sensorik und die gewünschte Art der Datenfernübertragung angepasst werden kann.

Das Basismodul besteht aus einem Prototyping-Board (Arduino-Mega 2560 Rev3), das um eine Entwicklungsplatine erweitert wird. Auf der Entwicklungsplatine sind ein Micro-SD-Kartenmodul, eine Echtzeituhr und ein Schaltkreis angebracht, die im Zusammenspiel den Betrieb des Datenloggers in festgelegten Zeitintervallen bei geringem Stromverbrauch ermöglichen. Der so aufgebaute Datenlogger ist frei programmierbar, mit Batterien einsetzbar und unterstützt durch vielfältige Erweiterungsmöglichkeiten zahlreiche digitale Datenübertragungstypen, Kommunikationsprotokolle und auch diverse Arten der Datenfernübertragung (z. B. Mobilfunk, LoRa, WLAN).

Die Erstellung des Programmcodes erfolgt am PC mittels der integrierten Entwicklungsumgebung (Arduino-IDE), welche auch die Kompilierung des Programmcodes und die Installation des kompilierten Programmcodes auf dem Board mittels USB-Verbindung ausführt. Umfangreiche Dokumentationen, die große Entwicklercommunity sowie zahlreiche Softwarebibliotheken erleichtern den Einstieg in die Thematik und den Gebrauch der Arduino-Plattform.

Anhand praktischer Anwendungsbeispiele werden mögliche Messanwendungen adressiert und die Tauglichkeit des Loggerkonzepts nachgewiesen. Dabei handelt es sich um eine Variante mit Ultraschall-Füllstandsensoren zur Erfassung des Wasserstands in offenen Gerinnen und um eine weitere Variante für den Betrieb eines wägenden Niederschlagssensors (siehe Abbildung 1). Beide Datenlogger werden durch einen Akku mit Photovoltaikmodul gespeist, speichern die Messdaten lokal in festgelegten Zeitintervallen und übertragen die Messdaten per Mobilfunk an einen Daten-Server.

Die wesentlichen Herausforderungen hinsichtlich der praktischen Nutzung des modularen Open-source-Konzeptes werden derzeit im hohen handwerklichen Arbeitsaufwand (z. B. für die Bestückung und Verkabelung der Bauteile) und der nötigen grundlegenden Einarbeitung des zur Verfügung stehenden Personals gesehen. Als Hauptvorteile sind die hohe Variabilität und Kompatibilität bzgl. der betreibbaren

Sensorik, die geringe Abhängigkeit von einzelnen Messtechnik-Dienstleistern, die hohe Individualisierbarkeit durch freie Programmierung und zahlreiche Modulbausteine sowie nicht zuletzt die sehr geringen Materialkosten zu nennen. Für einige Messanwendungen besteht außerdem eine hohe Verfügbarkeit an sehr kostengünstiger Sensorik.



Abbildung 1: Anwendungsvarianten des Datenlogger-Konzeptes im Feldeinsatz zur Wasserstandsmessung (links) mittels Ultraschall-Füllstandsensor sowie für die Niederschlagsmessung mit angeschlossener Kamera zur Messstellenüberwachung (Mitte); rechts: Blick in den Schaltschrank der Niederschlagsvariante

## Literatur

arduino.cc (2020): What is Arduino?, Online-Quelle, Link: <http://arduino.cc/en/Guide/Introduction>, [abgerufen am 27.10.2020]

# Die mechanische Integration von Tracer-Durchgangskurven als schnelle, kostengünstige und verlässliche Methode zur Auswertung von Salzverdünnungsmessungen

Dr. Alexander Gerner<sup>1</sup>

<sup>1</sup>TU München, Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, alexander.gerner@tum.de

## Abstract

Salzverdünnungsmessungen mit Kochsalz (NaCl) als Tracerstoff sind eine in Forschung und Praxis verbreitete Methode zur Durchflussbestimmung. Sie kommt insbesondere bei turbulentem Fließen in Wildbächen oder Gebirgsflüssen zur Anwendung. Die Auswertung der Messungen erfolgt normalerweise durch numerische Integration der Durchgangskurve. Dazu wird diese entweder händisch erfasst oder mit speziell dafür entwickelten Geräten automatisch registriert. Die händische Erfassung mit anschließender Eingabe der Messwerte benötigt eine gewisse Zeit, die bei Geländearbeiten i. Allg. begrenzt und damit kostbar ist. Zahlreiche Wiederholungen an einem Messort oder mehrere Messungen an unterschiedlichen Orten innerhalb eines Messtages sind damit nur eingeschränkt möglich. Beim Einsatz automatischer Messkoffer ist das Ergebnis unmittelbar nach der Messung verfügbar. Jedoch sind diese Geräte mit Kosten verbunden, die nicht für jede Institution oder jedes Projekt leistbar sind.

Eine rasche, betriebssichere Auswertung bei geringen Kosten ermöglicht die Anwendung der mechanischen Integration oder „Pumpenmethode“. Hierbei wird während dem Tracer-Durchgang Wasser am Messort mit konstanter Förderrate in ein Fass abgepumpt. Registriert wird dann neben der Hintergrundkonzentration der elektrischen Leitfähigkeit lediglich die Zeit des Tracer-Durchgangs bzw. des Pumpvorgangs und die Leitfähigkeit der Mischprobe im Fass. Das Ergebnis steht praktisch unmittelbar nach Erfassung dieser beiden Werte zur Verfügung.

Der Beitrag erläutert diese bislang nicht publizierte Auswertemethodik. Zwei Fallbeispiele zeigen, dass sich auf diesem Weg Ergebnisse erzielen lassen, deren Genauigkeit mindestens vergleichbar ist mit der der numerischen Integration der Durchgangskurve.