

## Beitrag A: Helmut Heller, Sonja Teschemacher

# Internet of Things: Moderne Technik für die Umweltdatenerfassung

## Internet of Things: Modern Technology for Environmental Data Collection

Helmut Heller<sup>1</sup>, Sonja Teschemacher<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) der Bayerischen Akademie der Wissenschaften,*  
[heller@lrz.de](mailto:heller@lrz.de)

<sup>2</sup>*Lehrstuhl für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Technische Universität München,*  
[sonja.teschemacher@tum.de](mailto:sonja.teschemacher@tum.de)

### Abstract

Ideally, methods for collecting environmental data should be inexpensive and easy. Technologies developed for the Internet of Things (IoT) could potentially help achieve that goal: Employing the IoT architecture, IoT devices (such as single board microcontrollers, sensors, and radio systems), and IoT software, all originally developed for the commercial market or the maker scene, seems to be a perfect fit for the environmental sciences. In this paper we investigate whether IoT technology lives up to its promise by implementing the technologies in a practical case of hydrological research for direct flow measurements and report about the pros and cons we experienced.

### Zusammenfassung

An die Umweltdatenerfassung werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche Anforderungen gestellt, wobei in den meisten Fällen eine kostengünstige, einfach zu bedienende und zuverlässige Datenerfassung, -übertragung und -speicherung wünschenswert ist. Über Technologien des Internet of Things, die ursprünglich für kommerzielle Anwendungen und die Maker Szene entwickelt wurden, können mithilfe von Einplatinencomputern und einer Vielzahl an möglichen Erweiterungen verschiedenste Parameter gemessen und zu einem Cloud-Dienst übertragen werden. Mithilfe weiterer Anwendungen können die Daten in naher Echtzeit benutzerfreundlich dargestellt sowie

Warnungen bei Auftreten besonderer Ereignisse an den Nutzer gesendet werden. Die Methodik wird anhand eines hydrologischen Beispiels zur Direktabflussmessung vorgestellt und konnte durch die Kosteneffizienz und die Erleichterung von Monitoring und Wartung des Messnetzes einen maßgeblichen Beitrag zur Datenerfassung liefern.

## 1 Motivation

Umweltdaten beinhalten grundsätzlich alle Daten, mit denen die Umwelt beschrieben werden kann. Ihre Erfassung ist sowohl im wissenschaftlichen Bereich als auch für Entscheidungsträger interessant. Die verschiedenen Parameter unterscheiden sich dabei in ihrer zeitlichen und räumlichen Variabilität sowie der erforderlichen Genauigkeit und Relevanz für Entscheidungen. Diese Unterschiede resultieren in verschiedenartigen Anforderungen an die Technik zur Erfassung der Daten.

Üblicherweise werden Umweltdaten mit meteorologischen Parametern wie z.B. Temperatur, Globalstrahlung, rel. Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Niederschlag oder mit Messwerten zur Luftqualität assoziiert. Diese Messdaten sind aufgrund der zeitlichen Variabilität der zugrundeliegenden physikalischen Prozesse selbst zeitabhängig, können jedoch räumlich überwiegend gut interpoliert werden. Ausnahme ist dabei der Niederschlag, der sowohl zeitlich als auch räumlich sehr unterschiedlich auftreten kann. Im Gegensatz dazu verändern sich Daten, die die Geologie, den Bodenaufbau oder die Bodentextur beschreiben nur über längere Zeiträume, können jedoch große räumliche Variabilitäten aufweisen. Die zeitlichen Veränderungen sind auf Beeinflussungen durch Bodenbearbeitung oder die Phänologie der Vegetation während der Vegetationsperiode zurückzuführen.

Umweltdaten im Bereich der Hydrologie beinhalten typischerweise Wasserstände, Abflüsse oder Grundwasserstände. Je nach Anwendung bzw. Fragestellung können aber auch Schneehöhen, Bodenfeuchten oder Saugspannungen wichtige Informationen bieten. Die Daten weisen im Allgemeinen eine große räumliche und zeitliche Variabilität auf, da sie von den Landnutzungs- und Bodeneigenschaften sowie von den meteorologischen Verhältnissen beeinflusst werden. Der wichtigste Einflussfaktor ist dabei die Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung.

Daten mit einer großen räumlichen Variabilität erfordern ein möglichst dichtes Messnetz, da eine Interpolation der Daten zu großen Unsicherheiten führt. Bei kleinen

Variabilitäten ist dagegen eine geringe Anzahl an Messstationen ausreichend. Bei einer großen zeitlichen Variabilität ist dagegen unbedingt eine kontinuierliche Erfassung der Daten erforderlich, wohingegen bei langsamen Veränderungen auch eine manuelle Datenerfassung möglich ist. Insbesondere bei zeitlich variablen Daten, die kurzfristige Entscheidungen beeinflussen können, ist zudem eine automatische Datenübertragung notwendig. Aufgrund der teilweise hohen Kosten für die Datenerfassung und –übertragung ist die Erstellung eines Messnetzes üblicherweise ein Kompromiss zwischen der Messtechnik, der Dichte der Messstationen und der erforderlichen Datenmenge und –belastbarkeit. Ein Beispiel aus dem Bereich der Hydrologie wäre die Messung von Abflüssen, die aufgrund der maßgeblichen Beeinflussung durch Niederschlagsereignisse zeitlich und räumlich sehr variabel auftreten können und damit oft eine schnelle Reaktion von Entscheidungsträgern oder auch Wissenschaftlern erfordern.

In den letzten Jahren entstand unter dem Schlagwort “Internet of Things” (IoT) eine neue Technik, die “Things”, also “Dinge”, über das Internet miteinander und mit zentralen Komponenten vernetzt. Diese Dinge können Aktoren sein, z.B. Lampen wie die Philips Hue Lampen [Philips 2018], oder Sensoren wie etwa Temperatursensoren, z.B. von Nest [Nest 2018]. Gerade im Bereich “Smart Home” gibt es mittlerweile viele vernetzte Lösungen, etwa von QIVICON [Qivicon 2018]. All diesen Ansätzen sind zwei Faktoren gemein: die Architektur und der Massenmarkt, der durch Massenfertigung zu stark fallenden Preisen führt.

Neben diesem kommerziellen Ansatz entwickelte sich in den letzten 5 bis 10 Jahren jedoch auch eine sehr aktive und breite Gruppe von Bastlern und Hobbyisten, die sogenannte “Maker Szene”. Diese community folgt dem open source Gedanken und teilt bereitwillig Ideen und Lösungen, was zu gegenseitiger Befruchtung und Inspiration führt und die Gemeinschaft als ganzes unglaublich agil werden lässt. Entscheidend für das enorme Wachstum der Bewegung waren sicher zum einen das Erscheinen kleiner, einfach zu verwendender, billiger (2€ bis 35€) und sehr leistungsfähiger Einplatinencomputer für den embedded Bereich, wie 2005 Arduino und 2012 Raspberry Pi, zum anderen die Verfügbarkeit von preiswerten 3D-Druckern [Prusa 2018] für Privatpersonen. Neben den Chip-Produzenten bildete sich ein ganzes Ökosystem von Firmen, die Zusatzhardware (sog. breakout boards, shields oder hats)

anbieten, welche mit einfachsten Mitteln (teilweise sogar ohne Löten) eine enorme Erweiterung des Funktionsumfangs erlaubt.

Es ist nun naheliegend, diese aktuellen Entwicklungen aufzugreifen und aus dem Konsum- und Hobbybereich in den Bereich der Wissenschaft zu übertragen. Ihre Vorteile – preiswert durch Massenfertigung, einfach in der Anwendung, flexibel im Aufbau, vernetzt, offen, agil, vielfältig – ermöglichen erweiterte Messmethoden und dadurch die Gewinnung von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

## **2 Untersuchungsgebiet**

Anhand eines hydrologischen Beispiels soll demonstriert werden, welche IoT-Technologien und Maker Hardware sich auf welche Weise für die Datenerfassung an abgelegenen Orten eignet.

### **2.1 Hintergrund und Zielstellung**

Das Messgebiet wurde im Rahmen eines Projekts zur prozessbasierten Modellierung natürlicher und dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit aufgebaut [Teschemacher et al. 2015]. Eine der Maßnahmen ist die Änderung der Landnutzung und Bewirtschaftung, deren zu erwartende Wirksamkeit jedoch in bisherigen Studien eine große Heterogenität aufweist [DWA 2015]. Gründe hierfür sind einerseits gebiets- und ereignisabhängige Unterschiede, andererseits die unterschiedliche Abbildung der Prozesse von Abflussbildung und Konzentration in den verwendeten hydrologischen Modellen.

Ziel des Messkonzepts ist die Untersuchung der landnutzungsabhängigen Unterschiede von Bodenaufbau und bodenhydraulischen Parametern sowie deren Einfluss auf die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration. Dazu sollen die Abflusskomponenten sowie die vorherrschenden Rahmenbedingungen landnutzungs- und ereignisabhängig erhoben werden. Neben der Verbesserung des Prozessverständnisses sollen aus den Messergebnissen Erkenntnisse zum Einfluss von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen auf den Hochwasserabfluss und damit auf die Wirksamkeit dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen gewonnen werden. Zudem werden die Daten für die Parametrisierung, die Kalibrierung und die Validierung des hydrologischen Modells WaSiM verwendet [Schulla 2017], um dessen Eignung für die Szenarienrechnung zu analysieren.

## 2.2 Gebietscharakteristik

Das Untersuchungsgebiet liegt im Einzugsgebiet der Glonn (Pegel Odelzhausen), das sich am südlichen Rand des Tertiärhügellandes zwischen Augsburg und München befindet (Abbildung 1). Das betrachtete Teilgebiet, das drei Messflächen mit unterschiedlicher Landnutzung beinhaltet, hat eine Größe von ca. 1 km<sup>2</sup>. Geologisch befindet es sich am südlichen Rand der oberen Süßwassermolasse [BGL 1996]. Die Bodenverteilung ist vergleichsweise homogen und besteht überwiegend aus Braunerde mit lehmiger Deckschicht [LfU 2015].

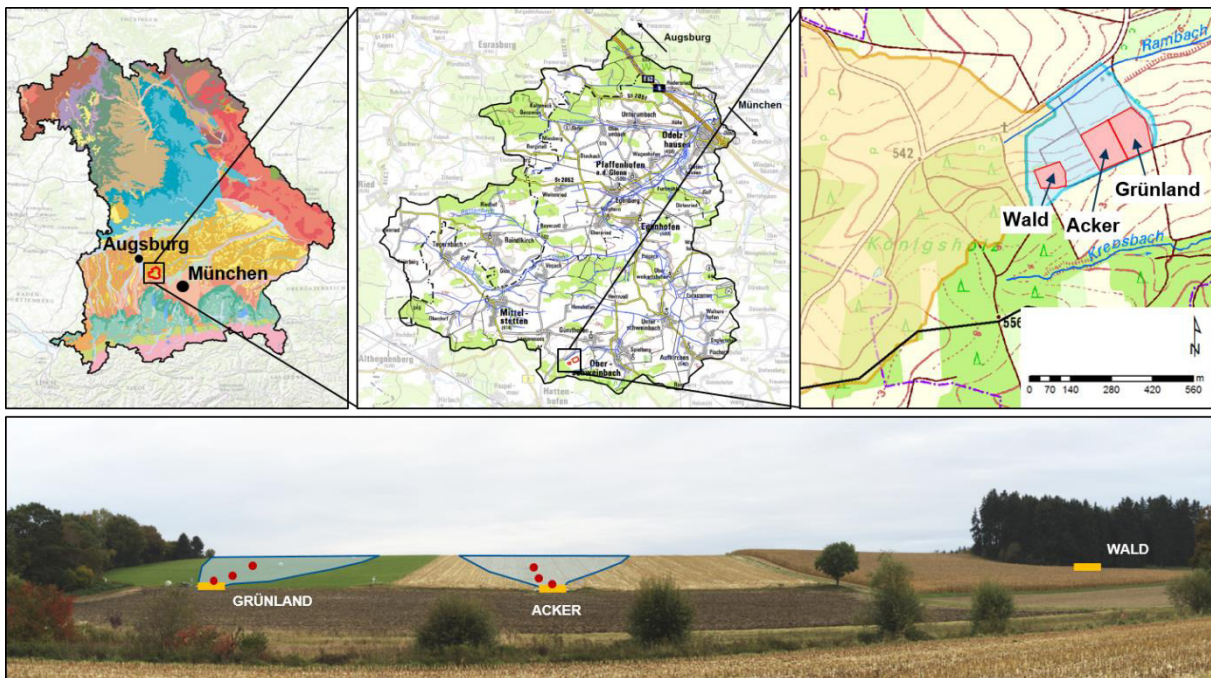


Abbildung 1: Lage und Ansicht des Untersuchungsgebiets; oben: Lage des Untersuchungsgebiets in Bayern und Anordnung der Messflächen im Untersuchungsgebiet; unten: Ansicht des Messhangs mit Grabenstandorten, Bodenparameter-Messstandorte und Akkumulationsflächen.

Der in nord-östlicher Richtung ausgerichtete Messhang beinhaltet eine Acker-, eine Grünland- und eine Waldfläche, die land- bzw. forstwirtschaftlich genutzt werden. Die Hangneigung liegt im Mittel bei 6,5° (Acker), 6,7° (Grünland) und 10,6° (Wald). Die Grünlandfläche wird als Mähwiese genutzt und entsprechend ca. zweimal pro Vegetationsperiode gemäht. Die Ackerfläche wird konventionell durch Pflugeinsatz bewirtschaftet. Die ausgewachsenen Bäume der Waldfläche bestehen hauptsächlich aus Fichten, im Jungwald überwiegen Laubbäume.

## 2.3 Messkonzept

Das Messkonzept beinhaltet verschiedene Parameter, die räumlich und zeitlich aufgelöst erfasst werden und zueinander in Beziehung gesetzt werden können (Abbildung 2). Die Speicherung der Daten erfolgt über getrennte Datenlogger.

### 2.3.1 Messaufbau

Der meteorologische Input des Systems wird über zwei *Davis Vantage 2 Pro* [Davis, 2018] Kompaktwetterstationen aufgezeichnet, von denen sich eine auf der Freifläche am Acker und eine im Wald befindet. Die gemessenen Parameter beinhalten die Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte, die Globalstrahlung und den Niederschlag. Aufgrund der kleinen Gebietsgröße und den dementsprechend zum Teil schnellen Abflussreaktionen, werden die Daten minütlich aufgezeichnet.

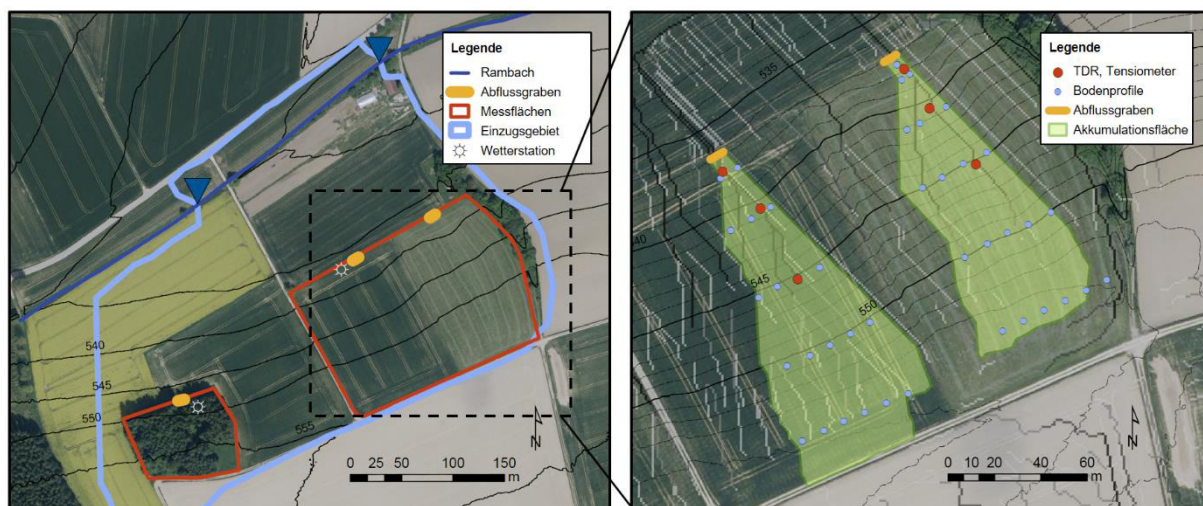


Abbildung 2: Komponenten des Messkonzepts und Positionierung im Messhang.

Der laterale Wasserfluss wird am Hangfuß der Felder unterteilt in Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss durch den Aushub von Messgräben und der Installation von Wehren, Ultraschallsensoren und Kippzählern erfasst (Abbildung 3). In jedem Graben wird der Zwischenabfluss mit sechs Kippzählern in zwei Ebenen und drei Segmenten getrennt gemessen, um die horizontale und vertikale Heterogenität bestimmen zu können. Während Abflussereignissen sammelt sich das Wasser in den Gräben und muss herausgepumpt werden. Am angrenzenden Bach wird zudem der Gesamtabfluss des Messhangs über Wehre bilanziert.

Um die Rahmenbedingungen der Abflussereignisse beschreiben zu können, werden an verschiedenen Standorten oberhalb der Gräben Tiefenprofile von Bodenfeuchte



und Saugspannung gemessen. Diese dienen als Information für den Wassergehalt im Boden und den vertikalen Wasserfluss. Zudem wird die Bodenfeuchte der Bereiche am Grabenrand erfasst, um eine direkte Korrelation zu den jeweiligen Abflüssen herstellen zu können.

### 2.3.2 Messnetz und Datenlogger

Die drei Messflächen liegen zwar am gleichen Messhang, sind allerdings räumlich so weit voneinander entfernt, dass eine gemeinsame Datenerfassung nicht möglich war. Zudem ermöglicht die getrennte Aufzeichnung eine bessere Validierung der Daten und eine verringerte Wahrscheinlichkeit größerer Datenverluste. An allen drei Standorten wird der Niederschlag erfasst, der als Vergleichsgröße der erfassten Daten betrachtet werden kann. Bei einer Übereinstimmung dieser Messungen kann daher von grundsätzlich funktionierenden Datenloggern ausgegangen werden.

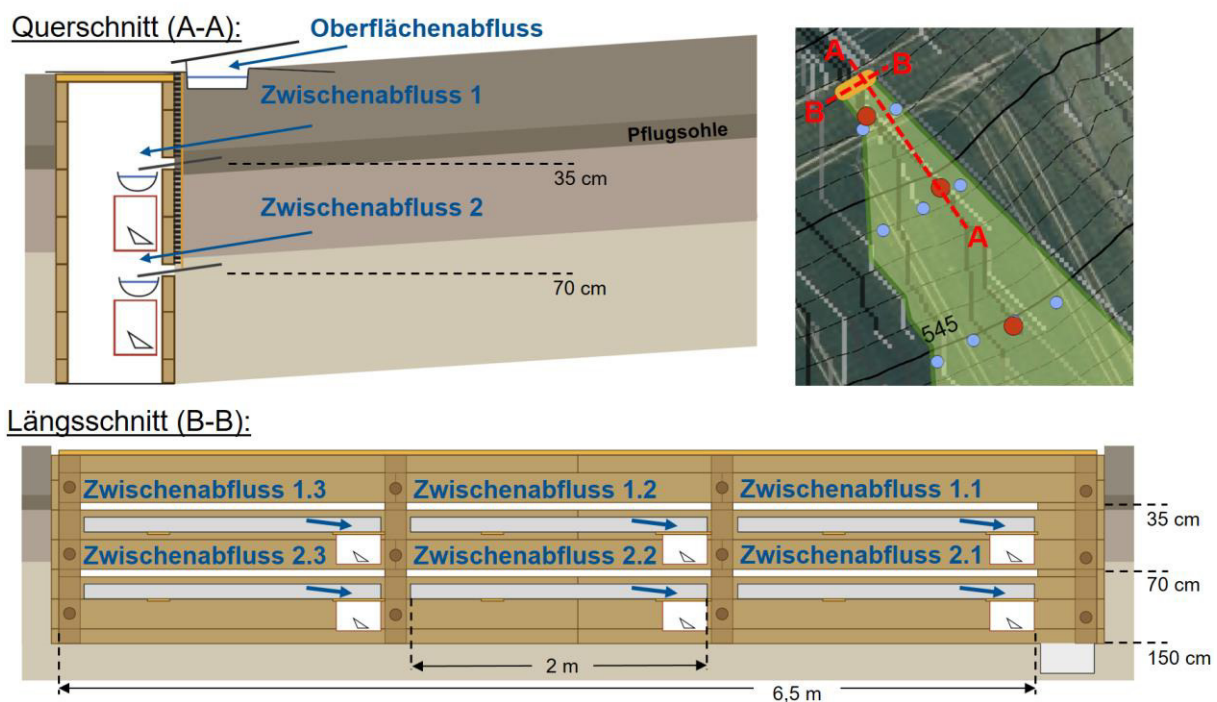


Abbildung 3: Aufbau und Instrumentierung der Gräben zur Messung der Zwischenabflüsse und des Oberflächenabflusses.

Die Erfassung der Wasserstände des Rambachs sowie die Bodenfeuchtemessungen in den Gräben erfolgt in separaten Datenloggern an den entsprechenden Standorten. Die Bodenfeuchte- und Saugspannungsdaten oberhalb der Gräben werden an zwei Standorten (Wald, Acker+Wiese) erfasst. Die genannten Daten werden jeweils lokal erfasst und müssen vor Ort ausgelesen werden. Kriterien für das Ausleseintervall sind

die Speicherkapazität des Loggers sowie die Notwendigkeit der Überprüfung der Datenvollständigkeit und -qualität.

Der Oberflächenabfluss (1 Ultraschallsensor + 1 Temperatursensor) und die Zwischenabflüsse (6 Kippwaagen) in den Gräben werden pro Landnutzung jeweils mit einem *Raspberry Pi* aufgezeichnet. Zudem wird der Wasserstand im Graben über einen Ultraschallsensor erfasst und die Daten der Wetterstation gespeichert. Die meteorologischen Rahmenbedingungen und die Messung eines möglichen Grabeneinstaus sind für das Monitoring und die Wartung des Gebiets von großer Bedeutung, da nur bei ausreichendem Niederschlag und entsprechenden Vorbedingungen ein Abfluss erfolgt bzw. bei Ausfall der Pumpen und einem daraus folgenden Anstieg des Wasserspiegels eine schnelle Wartung erforderlich ist. In diesem Fall ist daher ein regelmäßiges Ausleseintervall der Daten nicht ausreichend, um kontinuierliche Daten gewährleisten zu können.

## **2.4 Anforderungen an die Datenerfassung und -übertragung**

Aus dem Messaufbau, den zu messenden Parametern und den benötigten Informationen für das Monitoring und die Wartung des Messgebiets lassen sich folgende Anforderungen ableiten:

- Erfassung von 19 bis 51 Messwerten je Messstation in regelmäßigen, meist minütlichen Intervallen und Speicherung der Daten auf einem internen Datenspeicher mit ausreichender Größe,
- kontinuierliche Übertragung in naher Echtzeit, um eine schnelle Wartung bei Problemen gewährleisten zu können (eine Verzögerung von wenigen Minuten ist tolerabel),
- Darstellung der Daten in einem intuitiv und schnell zu erfassenden Format, ebenfalls in naher Echtzeit,
- rechtzeitige automatisierte Warnung bei Fehlfunktionen, wie etwa bei Volllaufen des Grabens durch Ausfall einer Pumpe oder bei Absinken der Batteriespannung,
- automatische Information bei Auftreten eines interessanten Ereignisses, zum Beispiel einem Niederschlagsereignis, das einen bestimmten, vorgegebenen Schwellwert überschreitet,



- Zuverlässigkeit des Datenloggers um Datenverlust und häufige Besuche vermeiden zu können,
- hohe Flexibilität, um auf sich ändernde Anforderungen während des Messzeitraums reagieren zu können,
- Finanzierbarkeit.

Durch die Umsetzung einer kostengünstigen Selbstbaulösung konnte der Umfang des im Rahmen der Projektmittel möglichen Messaufbaus deutlich vergrößert werden. Folglich wurde eine Kombination verschiedener Methoden ermöglicht, die eine Betrachtung verschiedener Gesichtspunkte und damit ein besseres Prozessverständnis zulässt [Bachmair & Weiler 2014; Bracken et al. 2013].

Das auf einem Raspberry Pi basierende Loggersystem wurde seit Messbeginn kontinuierlich weiterentwickelt und berücksichtigt den Einsatz von Internet-of-Things-Technologien. Die verwendeten Methoden sowie deren Umsetzung im Messgebiet werden in den folgenden beiden Abschnitten vorgestellt.

### **3 Methoden: IoT als „enabling technology“**

#### **3.1 Internet of Things**

Das “Internet of Things” (IoT) ist eine neue Technik, die “Things”, also “Dinge”, über das Internet miteinander und mit zentralen Komponenten vernetzt. Abbildung 4 zeigt bekannte Beispiele aus dem smart home Bereich (obere Reihe) sowie dem Fitnessbereich (untere Reihe). Das gemeinsame Merkmal all dieser Produkte ist informationstechnisch die Architektur, die in Abbildung 5 dargestellt ist, aber auch die Massenfertigung, die die Preise stark fallen lässt.

In der Architektur steht als zentrale Komponente eine Cloud-Instanz, die die Daten der Sensoren entgegennimmt, speichert, auswertet und Aktionen auslöst. Diese Komponente ist always-on und durch die Nutzung von Cloud-Services sowohl hochverfügbar als auch ohne eigene Hardware zu betreiben. Diese Cloud-Instanz wird typischerweise vom Hersteller (z.B. Nest, Philips, Qivicon) als Software-as-a-Service für die Kunden betrieben. Die Kunden müssen sich um nichts kümmern, registrieren ihre Sensoren und Aktoren einmalig bei der Cloud-Instanz und kommunizieren über einen Web-Browser ausschließlich mit der Cloud-Instanz. Dort legen sie über ein

graphisches Interface auch Regeln fest, unter welchen Bedingungen welche Aktion ausgelöst werden soll.

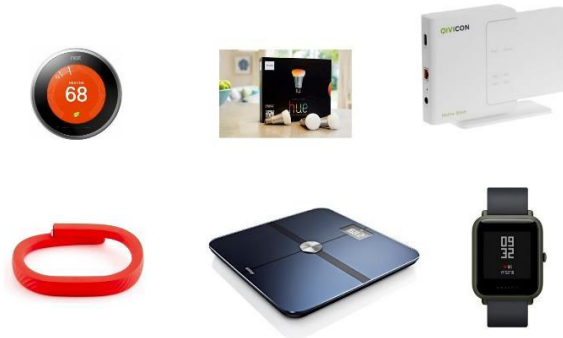


Abbildung 4: Kommerzielle Beispiele für den Einsatz von IoT.  
Obere Reihe: smart home devices (Nest Thermostat [Nest, 2018], Philips Hue Lampe [Philips, 2018], Qivicon Heizungssteuerung [Qivicon, 2018]), untere Reihe: Fitnessprodukte (Jawbone UP-Band, Withings Körperanalyzer [Withings 2018], Xiaomi Amazfit smart watch [Amazfit 2018]).

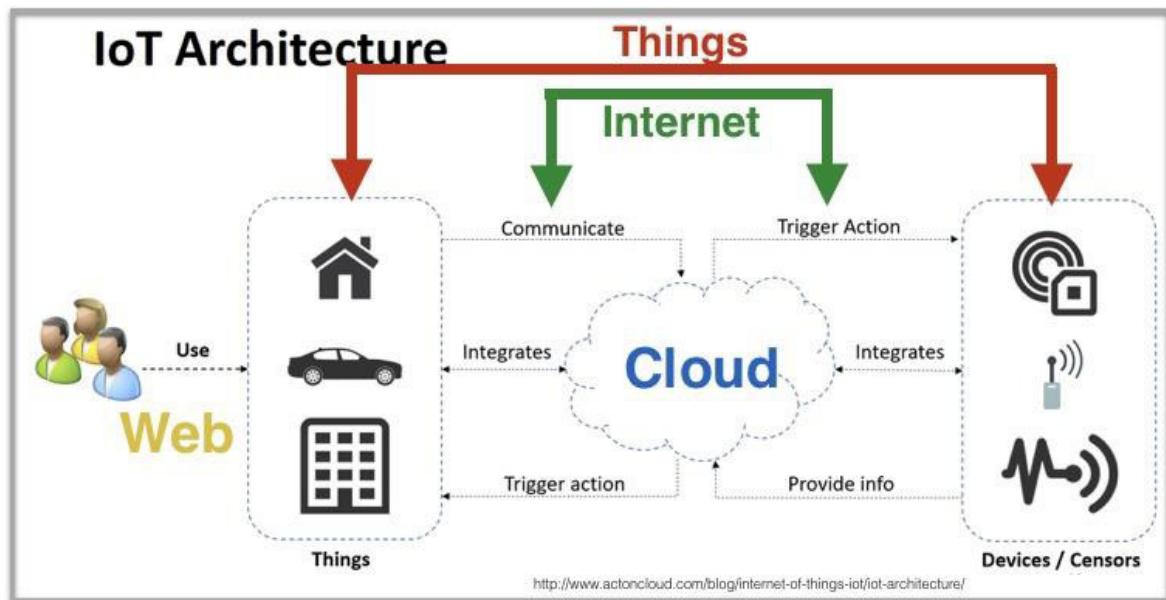


Abbildung 5: IoT Architektur.

Damit die Dinge (Things) ihre Daten in die Cloud liefern können, bedarf es einer Datenanbindung, die heutzutage über das nahezu überall verfügbare Internet realisiert wird. Dank fortschreitender Miniaturisierung und aufgrund des Drucks des Massenmarkts fertigen Chip-Schmieden heute spezialisierte IoT-Chips, wie den ESP8266 [Espressif, 2018], die sich mit einigen wenigen externen Bauteilen zu einem kompletten Modul (z.B: ESP-01 [EBay, 2018]) ergänzen lassen und das für unter 2€ eine 32bit CPU, 1 MByte Flash Speicher, WiFi, eine serielle Schnittstelle und 4 Input/Output Pins (GPIO) bietet [Frings, 2018].

Im IoT kommunizieren nun nicht nur Sensoren und Aktoren mit ihrer zugehörigen Cloud-Instanz, sondern diese kann zur Entscheidungsfindung über das Internet auch mit anderen Cloud-Instanzen, sogenannten Cloud-Services, kommunizieren (und auch selbst solche Services für andere Maschinen bereitstellen). So kann die Cloud-Instanz für ein Smart Home etwa prognostizierte Wetterdaten für den Standort des Hauses von anderen Cloud-Services abrufen [Lewis, 2016], um eine vorausschauende Temperaturregelung zu realisieren. Erst diese Verknüpfung von vielen Cloud-Services ist die Grundlage für die enorme Leistungsfähigkeit des IoT, das im Grunde genommen nichts anderes ist als Datenaustausch zwischen Maschinen über das Internet.

### **3.2 Cloud Computing**

Cloud Computing nimmt einen zentralen Platz in der IoT Architektur ein, aber was ist das eigentlich genau? Beim Cloud Computing stellt ein Cloud-Anbieter wie Amazon oder Google oder auch das Leibniz-Rechenzentrum (LRZ) eine Infrastruktur für virtuelle Maschinen bereit. Das heisst, dass der Kunde auf der Hardware des Cloud-Anbieters virtuelle Maschinen, also virtuelle Computer, die sich verhalten, wie ein realer Computer, z.B. ein Linux-Server, starten kann. Im vorliegenden IoT-Fall macht das der IoT-Hersteller, also Withings oder Nest. Auf dem virtuellen Server läuft nun ein mandantenfähiges (d.h. es kann mehrere voneinander isolierte Benutzer bedienen) Programm, das die Daten der IoT Sensoren entgegen nimmt, in einem für jeden Benutzer separaten Bereich speichert, auswertet, darstellt und mit dem Benutzer aber auch anderen IoT oder Cloud-Services kommuniziert. Da hier dem Benutzer ein laufendes Applikationsprogramm zur Verfügung gestellt wird, spricht man von Software-as-a-Service (SaaS).

Gerade im IoT-Bereich, wo mit einer hohen Zahl (im Bereich von Millionen) von Geräten gearbeitet wird, die darüber hinaus auch noch stark fluktuieren kann, da die IoT-Sensoren ja nicht kontinuierlich senden, kommt noch ein anderer Vorteil der Cloud zum tragen: ihre Elastizität. Darunter versteht man, dass bei plötzlich steigender Arbeitslast ohne große Verzögerung automatisch weitere virtuelle Cloud-Maschinen gestartet werden können, die sich die Last teilen. So kann auch bei stark schwankenden Lastprofilen eine temporäre Überlast der Cloud-Instanz vermieden werden. Geht die Last zurück, so werden die zusätzlichen Instanzen wieder

abgeschaltet. Der IoT-Hersteller muss also keine eigene Hardware, die für den Spitzenlastfall dimensioniert ist, anschaffen und in Bereitschaft halten, sondern er kauft vom Cloud-Provider stets genau die benötigte Rechenleistung ein.

Ähnlich einer kommerziellen public Cloud wie der von Amazon, Google oder Microsoft bietet das LRZ eine private Cloud [LRZ, 2018] nur für Wissenschaftler an. Gründe, die für ihre Benutzung sprechen sind (i) diese Cloud ist für Münchner Wissenschaftler kostenlos, (ii) das LRZ bietet kostenlose Unterstützung bei der Benutzung der LRZ Cloud und (iii) es bleiben die Daten garantiert in Deutschland, da sie in einem rein deutschen Rechenzentrum ohne ausländische Abhängigkeiten gespeichert und verarbeitet werden. Der Datenschutz ist somit gewährleistet, da fremde Mächte, wie z.B. US-Behörden, keinen Zugriff auf diese Daten erhalten.

### 3.3 Maker Szene

Während vor 20 oder 30 Jahren “Bastler” mit dem Lötkolben Schaltungen aus Einzelteilen (Transistor, Widerstand, Kondensator, Spule, ...) zusammenbauten, verwenden heutzutage die sogenannten *Maker* fertige Module, die sich oft durch einfaches Zusammenstecken zu völlig neuen Maschinen kombinieren lassen. Dabei sind auf den Modulen oft Millionen von Transistorfunktionen integriert, die ungleich mehr Möglichkeiten bieten, als dies noch vor 10 Jahren denkbar war. Ein Mikrocomputer mit eingebautem WiFi access point, wie z.B. der oben genannte ESP-01 [EBay, 2018] wird durch Aufstecken eines digitalen DS18B20 Temperatursensors zu einer mobilen Temperaturmessstelle und kann durch Ergänzen mit anderen Sensoren einfach und preiswert zu einer drahtlosen Wetterstation erweitert werden.

Die früheren Bastler waren oft Einzelkämpfer, die heutigen Maker sind über das Internet vernetzt und bilden so eine Gemeinschaft, die dem open source Gedanken folgt und bereitwillig Ideen und Lösungen teilt, was zu gegenseitiger Befruchtung und Inspiration führt und die Gemeinschaft als ganzes unglaublich agil werden lässt. Viele YouTube Kanäle liefern Ideen und Wissen frei Haus [Spiess 2018; GreatScott! 2018; Make 2018; TPAI 2018] und auf den einschlägigen Webseiten [instructables 2018; Hackster 2018] der Maker Szene finden sich viele weitere Anregungen. Auch Zeitschriften, z.B. die deutsche “Make:” [Make Magazin, 2018], die im Heise-Verlag erscheint, liefern regelmäßig Anregungen für neue Einsatzmöglichkeiten der IoT-Technologie.

Da diese Maker als Gruppe auch eine gewisse Marktmacht darstellen, hat sich gerade im Elektronikbereich ein ganzes Ökosystem von Firmen gebildet [Adafruit, 2018; Sparkfun, 2018; element14, 2018], die Zusatzhardware (sog. breakout boards, shields oder hats) anbieten, welche teilweise sogar nur durch Zusammenstecken eine enorme Erweiterung des Funktionsumfangs erlauben. So gibt es von diesen Firmen Sensoren für Temperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Helligkeit, Wasserstand, Abstand (Ultraschall) oder passive Bewegungsmelder (PIR) auf breakout boards, die einfach durch Aufstecken eingebunden werden können.

Die Gemeinschaft der Maker trifft sich regelmäßig auf Messen, sogenannten Maker Faires [Maker 2018] zum Ideenaustausch. Dort werden die eigenen Projekte der Gemeinschaft vorgestellt. Diese Treffen sind unglaublich motivierend und inspirierend und stellen das offline Pendant zur online community dar.

### **3.4 Einplatinencomputer**

Entscheidend für das enorme Wachstum der Bewegung war sicher das Erscheinen kleiner, einfach zu verwendender, billiger und sehr leistungsfähiger Einplatinencomputer für den embedded Bereich, wie 2005 Arduino und 2012 Raspberry Pi [RaspberryPi 2018]. Diese Computer erlauben erst die Anbindung der Sensoren, welche nur ein analoges oder digitales elektrisches Signal liefern, an das Internet und damit die Umsetzung der IoT-Architektur.

Die Einplatinencomputer unterscheiden sich durch ihre individuelle Funktionalität, die sich im jeweiligen Preis (2 € bis 35 €) widerspiegelt. Während ein Arduino beispielsweise analoge Eingänge bietet, kann auf einem Raspberry Pi ein voll funktionstüchtiges Linux-Betriebssystem installiert werden, auf dem mehrere Programme parallel ausgeführt werden können. Das Betriebssystem und die USB-Schnittstellen ermöglichen insbesondere die einfache Einbindung zusätzlicher Produkte, wie beispielsweise einen UMTS-Stick zur Herstellung einer Internetverbindung. Je nach Anwendungsfall und –erfordernissen können verschiedene Systeme miteinander verbunden werden, um so die jeweiligen Vorteile nutzen zu können. Sollte an einer Messstelle UMTS nicht vorhanden sein, so kann auch eine LoRa [Cytron, 2018] Funkstrecke zwischengeschaltet werden, mit der bei Sichtverbindung bis zu 40 km überbrückt werden können.

### 3.5 3D Druck

Mit 3D-Druckern lassen sich nicht nur angepasste Gehäuse der genau richtigen Größe und Form einfach ausdrucken, sondern es können auch funktionale Bauteile hergestellt werden. Das *additive manufacturing*, bei dem das Baumaterial Schicht für Schicht (FDM: Fused Deposition Modeling) aufgetragen wird, erlaubt zudem das Einbetten von elektronischen Bauteilen (z.B. Magnetfeldsensoren) im Druckteil. Wichtig ist auch der schnelle *turn around*: innerhalb weniger Stunden steht ein physisches 3D-Objekt zur Verfügung. Oft müssen anschließend noch Korrekturen durchgeführt werden, bis nach einigen Iterationen ein einsatzfähiges Teil vorhanden ist. Werden größere Stückzahlen gebraucht, so kann die Druckbeschreibung (das sogenannte STL file) anschließend per Internet zu einem Dienstleister übertragen werden, der dann in wenigen Wochen die Teile fertigt.

## 4 Anwendung von IoT in den Umweltwissenschaften

Das vorliegende Anforderungsprofil auf dem hydrologischen Messgebiet legt eine Lösung durch Übertragung der IoT Architektur auf den Wissenschaftsbereich und Verwendung von IoT Baugruppen nahe. Anhand dieses Beispiels möchten wir demonstrieren, welche IoT Technologien und Maker Hardware sich auf welche Weise für hydrologische Messungen an abgelegenen Orten (Stichwort "off-grid") eignet, um ansonsten nicht durchführbare Messungen zu ermöglichen. In einem ersten Schritt wurde die IoT Architektur aus Abbildung 5 auf die Gegebenheiten des Wissenschaftsbereichs angepasst. Abbildung 6 zeigt die modifizierte IoT Architektur.

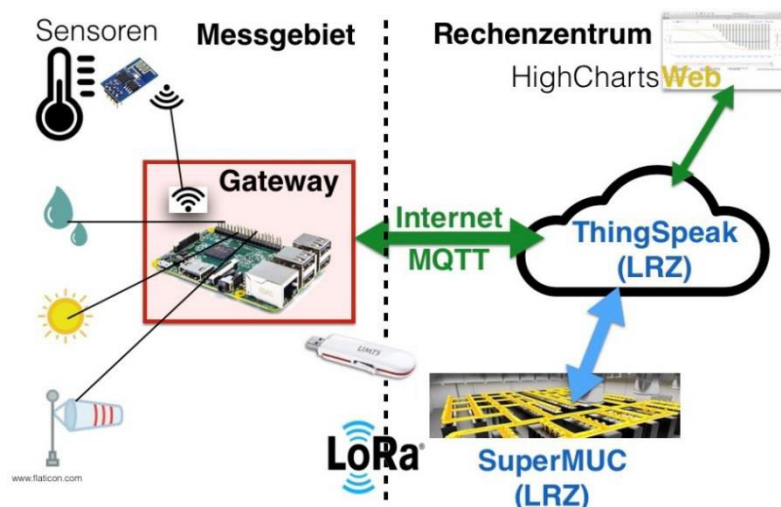


Abbildung 6: Für den Wissenschaftsbereich modifizierte IoT Architektur.



## 4.1 Datenerfassung und -übertragung

Auf der linken Seite befindet sich das Messgebiet mit den Umweltsensoren für Temperatur, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windstärke und -richtung, Niederschlag, Zwischenabflüssen, Oberflächenabfluss und diversen internen Parametern wie Batteriespannungen, Stromaufnahme, Ladestrom, Solarpanelspannung, Aktivität der Lenzpumpen und Wasserstand im Graben. Alle Daten laufen in einem Gateway-Rechner, hier ein Raspberry Pi Modell 2B bzw. 3B (RPI) mit Linux Betriebssystem, zusammen und werden dort lokal auf einem USB Speicherstick abgespeichert. Dieser lokale Speicher dient als Sicherung gegen Datenverlust bei längerem Ausfall der Internetanbindung und zusätzlichem Ausfall der Spannungsversorgung während keine Daten gesendet werden können. Die Sticks sind zudem durch eingebautes „wear leveling“ wesentlich haltbarer als die internen Micro-SD-Karten, die bei ständigen Schreibvorgängen mit der Zeit ermüden und so zu Ausfällen des Loggers führen. Bei erneuter Verfügbarkeit der Internetanbindung werden die bisher noch nicht übertragenen Daten automatisch nachsynchronisiert, sodass auf dem Cloud-Server ein vollständiger Datensatz vorhanden ist. Die für die Analysen besonders wichtigen meteorologischen Daten werden zudem im Datenlogger der DAVIS Wetterstation zwischengespeichert, der allerdings bei der benötigten zeitlichen Auflösung nur wenige Tage puffern kann. Diese Zwischenspeicherung läuft unabhängig vom RPI, insbesondere auch, wenn dieser mangels Strom abgeschaltet werden musste. Sobald der RPI bei genügend Batteriespannung wieder erwacht, holt er sich die zwischenzeitlich im DAVIS Datenlogger gespeicherten Daten und überträgt diese in die Cloud.

Die Anbindung an das Internet erfolgt über einen handelsüblichen UMTS Stick, der in den RPI eingesteckt werden kann. Eine PrePaid Flatrate für 2€/Monat erlaubt eine bandbreitenbegrenzte Anbindung an das Internet, die jedoch für die geringen Datenmengen völlig ausreichend ist. Allerdings erlaubt der Provider bei diesem Tarif keine *eingehenden* Internetverbindungen, sodass es nicht möglich war, sich remote auf dem RPI einzuloggen, um Änderungen an den Programmen vornehmen zu können. Diese Problematik wurde durch einen reverse ssh-Tunnel zur Cloud-Instanz mit autossh [cytopia, 2018] gelöst, der sich im Betrieb sehr bewährte. Somit ist es nun möglich, sich jederzeit und einfach remote auf dem RPI einzuloggen und sowohl Fernwartung als auch Anpassungen an den Programmen vorzunehmen.

## 4.2 Datenspeicherung und -darstellung

Auf der rechten Seite von Abbildung 6 ist der Teil gezeigt, der im Universitätsrechenzentrum, hier das Leibniz-Rechenzentrum in Garching bei München, abläuft. In der LRZ Compute Cloud [LRZ, 2018] installierten wir ThingSpeak [The Mathworks, 2018] als die zentrale Instanz, die über das IoT-Protokoll MQTT [MQTT 2018] die Daten von den Gateways in naher Echtzeit (die Verzögerung beträgt nur wenige Sekunden) entgegennimmt und speichert. Um die Übertragung gegen Angriffe und Manipulationen abzusichern, werden alle Daten kryptographisch verschlüsselt durch den reverse ssh-Tunnel übertragen. Um Datenverlust auch bei längerem Ausfall der Funkstrecke auszuschließen, werden alle Daten zusätzlich lokal auf dem RPI gespeichert und täglich als kompletter Datensatz nochmals in die Cloud übertragen. In der Cloud findet täglich ein automatischer backup aller Daten auf Band statt, für den das LRZ mindestens 10 Jahre Verfügbarkeit garantiert.

Da die Daten in Echtzeit in der Cloud vorliegen, können sie auch sofort angezeigt werden [Teschemacher & Heller 2018]. Wir verwendeten das Highstock Framework [Highcharts 2018], das eine interaktive live Exploration der Messdaten erlaubt. Es ist so mit einem Blick erkennbar, ob etwa eine Störung der Messeinrichtung vorliegt, die es erforderlich macht, den Fehler umgehend vor Ort zu beheben. Dies beugt dem Verlust unwiederbringlicher Messdaten sowie der nachhaltigen Beschädigung des Messaufbaus vor. Es handelt sich bei Highcharts/HighStocks um ein JavaScript Framework, das einfach auf der Webseite eingebunden werden kann. Nach Aufruf der Webseite führt der Webbrowser des Wissenschaftlers den JavaScript Code aus. Dieser Highcharts Code kann seinerseits ThingSpeak nach Daten fragen und diese von dort abholen.

Die IoT Architektur kann hier ihre Stärke ausspielen: verteilte Sensoren senden über MQTT ihre Daten verschlüsselt an einen MQTT-Broker in der Cloud. Dieser gibt die Daten an eine ThingSpeak Instanz weiter, die die Daten speichert und verwaltet. Ein Webserver liefert auf Anfrage eines Klienten ein JavaScript-Programm aus, das im Webbrowser ausgeführt wird und sich seinerseits an den ThingSpeak-Server wendet. Von dort fordert es die vom Benutzer gewünschten Daten an und stellt diese dann lokal dar. Da die Daten für den gewünschten Zeitraum nun lokal vorliegen erfolgt die Reaktion auf Benutzereingaben (etwa Ausblenden von Graphen, Verschieben des Darstellungsfensters, etc.) nahezu instantan, was das Arbeiten sehr angenehm und

effektiv macht. Dass MQTT-Broker, ThingSpeak und der Webserver alle auf der gleichen virtuellen Maschine in der Cloud laufen, ist keineswegs erforderlich. Jede Komponente könnte auch irgendwo im Internet laufen, solange die Komponenten untereinander erreichbar sind.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft eine Darstellung der Messwerte der meteorologischen Station auf der Freifläche am Acker und im Wald, die von unterschiedlichen Datenloggern gesendet wurden. Die Daten werden gemeinsam dargestellt und können so verglichen und plausibilisiert werden. Die grau dargestellten Legendenpunkte wurden für die Darstellung ausgeblendet.

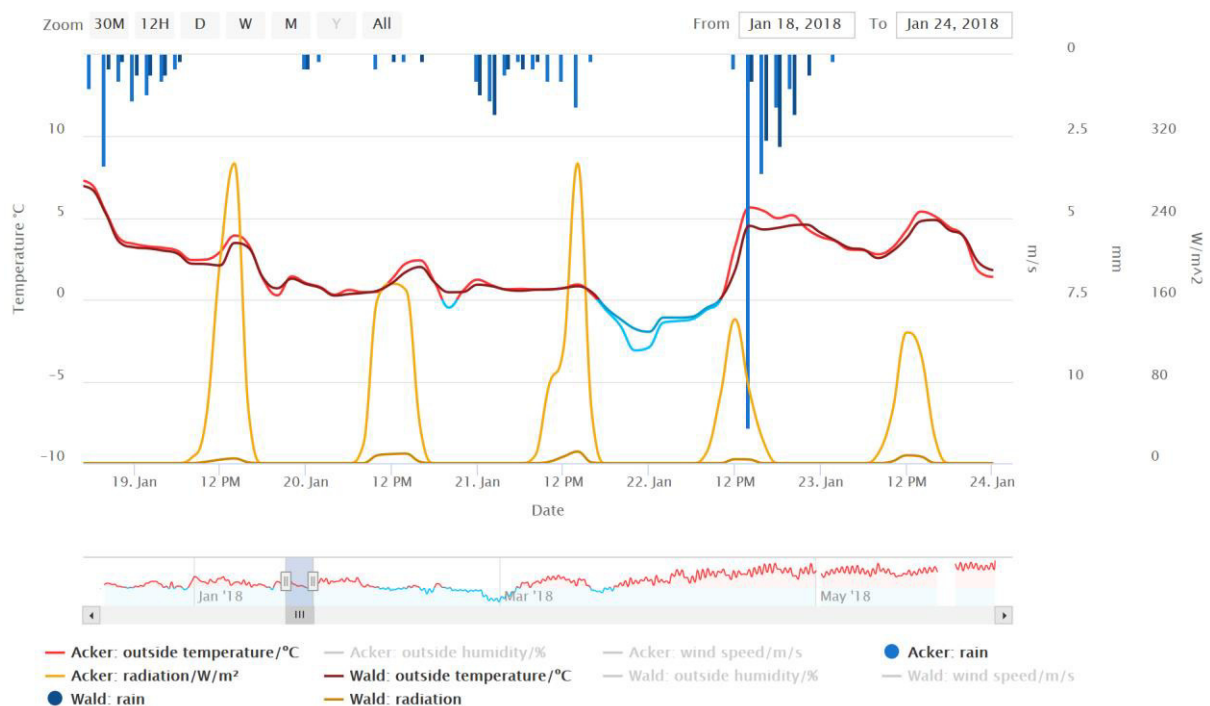


Abbildung 7: Darstellung der meteorologischen Parameter Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung für die Stationen auf der Freifläche und im Wald.

### 4.3 Alerting on Demand

Wir verwenden die minutenaktuellen Messdaten ferner im Rahmen des “Alerting on Demand” (Abbildung 8) dazu, uns über IFTTT [IFTTT 2018] per email oder SMS umgehend über besondere Situationen informieren zu lassen. Dazu zählt das Auftreten für die Messung wichtiger natürlicher Phänomene, wie z.B. hier Niederschlag, aber auch das Ausbleiben regelmäßiger Messwerte (z.B. weil das Funklink oder der Strom ausgefallen sind) bzw. deren Wiederaufnahme. Welche Ereignisse zu einem Alarm führen, ist vollständig frei programmierbar und kann flexibel an die Erfordernisse angepasst werden. Dazu läuft ein Python Programm auf der

Cloud-Instanz als CRON-Job jede Stunde und holt sich von ThingSpeak die jeweils neuesten Daten der letzten Stunde. Wenn ein Ereignis auftrat oder keine neuen Daten geliefert wurden, ruft das Programm einen IFTTT URL auf und übermittelt zusätzliche Parameter (etwa die Niederschlagsmenge). Dieser URL wurde zuvor einmalig in sechs einfachen Schritten in IFTTT als “Maker Event” konfiguriert und mit dem Google Mail applet verknüpft. So kann festgelegt werden, welche email mit welchen Parametern (z.B. die Niederschlagsmenge oder -intensität) an wen verschickt wird, wenn der URL aufgerufen wird. Statt Google Mail könnte auch eine SMS verschickt werden. Und IFTTT könnte, ganz dem Paradigma des IoT folgend, andere Datenquellen mit einbeziehen.

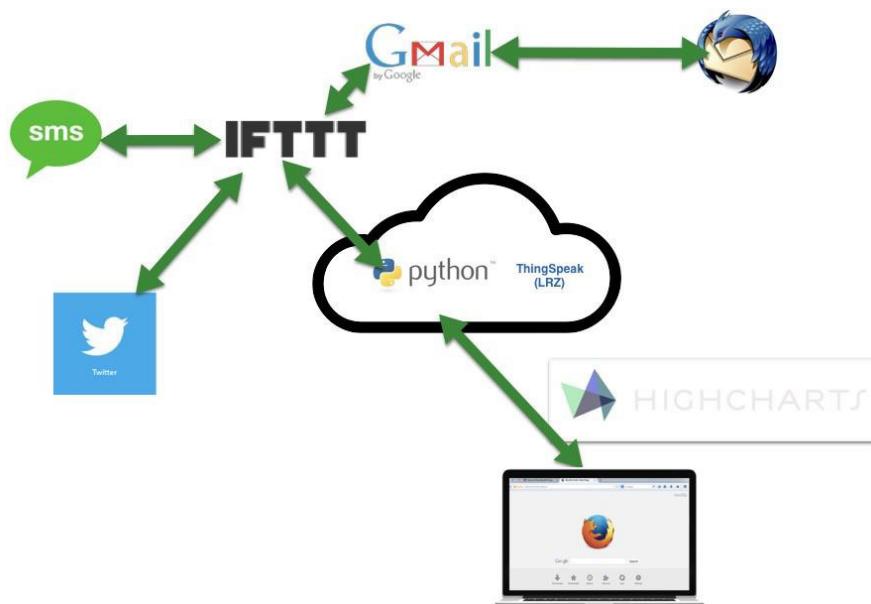


Abbildung 8: Alerting on demand.

Eine weitere Möglichkeit wäre dementsprechend, dass IFTTT die Messanlagen zum Stromsparen schlafen legt und nur aufweckt, wenn für das Messgebiet Regen vorhergesagt wird.

#### 4.4 Hardware-Erweiterungen

Die Stromversorgung der Messstationen erfolgt über Solarpanele und Pufferakkumulatoren, da die Messungen fernab von urbanen Gebieten stattfinden und daher kein Netzanschluss zur Verfügung steht. Abbildung 9 zeigt den Aufbau einer der drei identischen Messstationen. Die Stromversorgung ist aus Redundanzgründen zweifach ausgelegt. Der RPI wird über einen fernsteuerbaren Schaltwandler aus den 12V Bleiakkumulatoren versorgt. Da der Computer die Datenerfassungszentrale ist,

muss er möglichst lange laufen. Daher wird er aus beiden Akkumulatoren versorgt, entkoppelt über zwei 1N4001 Dioden, sodass er sich immer aus dem Akkumulator mit der höheren Spannung bedient. Der linke Akkumulator in Abbildung 9 speist hauptsächlich die Hauptlenzpumpe, die ein Volllaufen des Grabens verhindert und durch einen unabhängigen Schwimmerschalter betätigt wird, wenn der Wasserstand eine Schaltschwelle überschreitet. Der rechte Akkumulator ist primär für den RPI gedacht, speist aber auch eine Notlenzpumpe, die in Aktion tritt, wenn der Graben bereits teilweise gefüllt ist. Jeder Akkumulator wird von einem eigenen Solarpanel mit eigenem Solarregler geladen. Die Solarregler schalten auch die Last ab, wenn die Akkuspannung zu tief absinkt, um eine Beschädigung der Akkumulatoren zu verhindern.

Übersichtsplan Verkabelung RPI

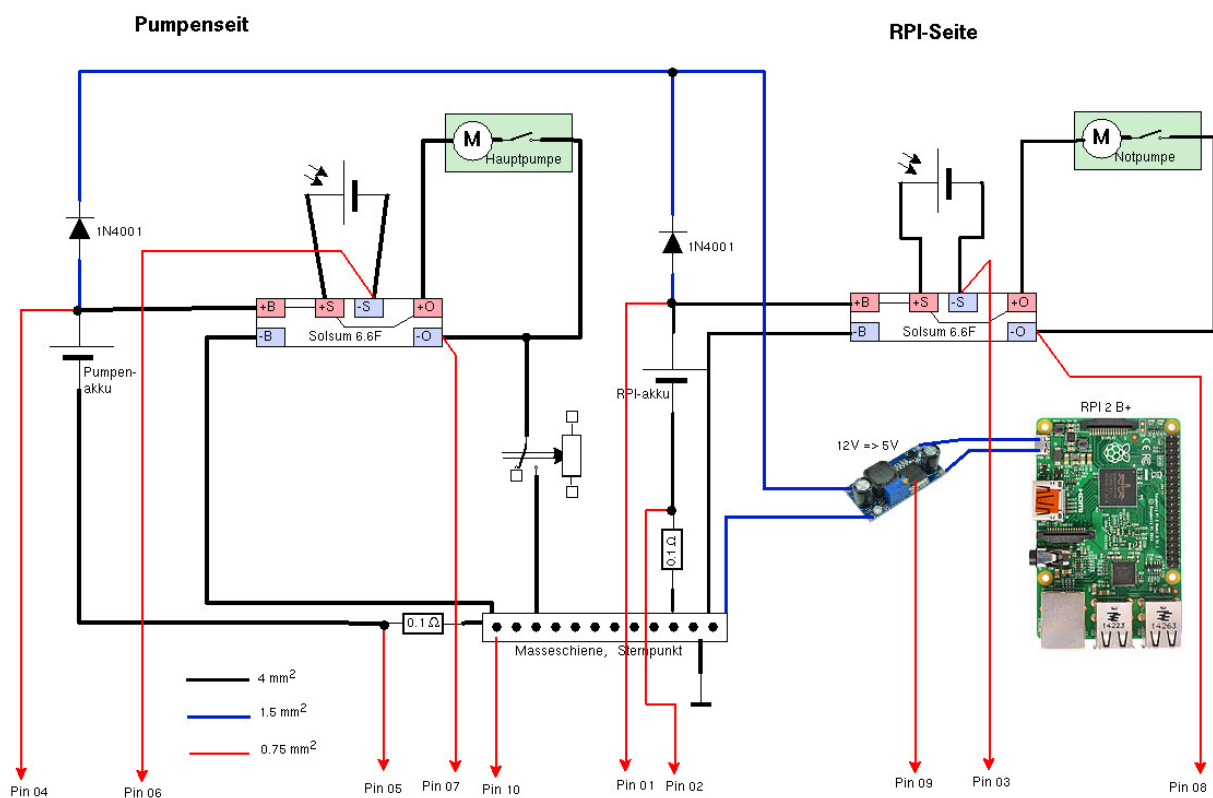
24.11.2017,  
Dr. Helmut Heller

Abbildung 9: Verdrahtungsplan.

Nach Abflussereignissen und den damit einhergehenden längeren Pumpdauern, hat es sich gezeigt, dass die in den Akkumulatoren gespeicherte Energie gerade in den Wintermonaten und bei längeren Bewölkungsphasen für einen durchgehenden Betrieb nicht ausreicht. Dies führte einerseits zu einem Ausfall der Pumpen und einem folgenden Anstieg des Wasserspiegels im Graben (Abbildung 10), andererseits wurde

ein hinter dem Solarregler angeschalteter RPI hart abgeschaltet, was zu Filesystem-Inkonsistenzen führt und dieses beschädigen kann. Wir haben daher eine Fernüberwachungsschaltung mit 8-fach Analog-Digital-Wandler für Solarpanel, Akkumulatoren, Solar-Laderegler und Pumpen entwickelt, die es uns erlaubt, die Ursachen für die Abschaltungen der Station zu ermitteln. Gleichzeitig verhindert diese Schaltung ein hartes Abschalten des Microcomputers bei Spannungsausfall; stattdessen wird der Raspberry Pi bei Unterspannung kontrolliert heruntergefahren und dann erst der Spannungswandler abgeschaltet. Das Einschalten erfolgt automatisch sobald die Spannung einen per Software einstellbaren Schwellwert wieder überschreitet.

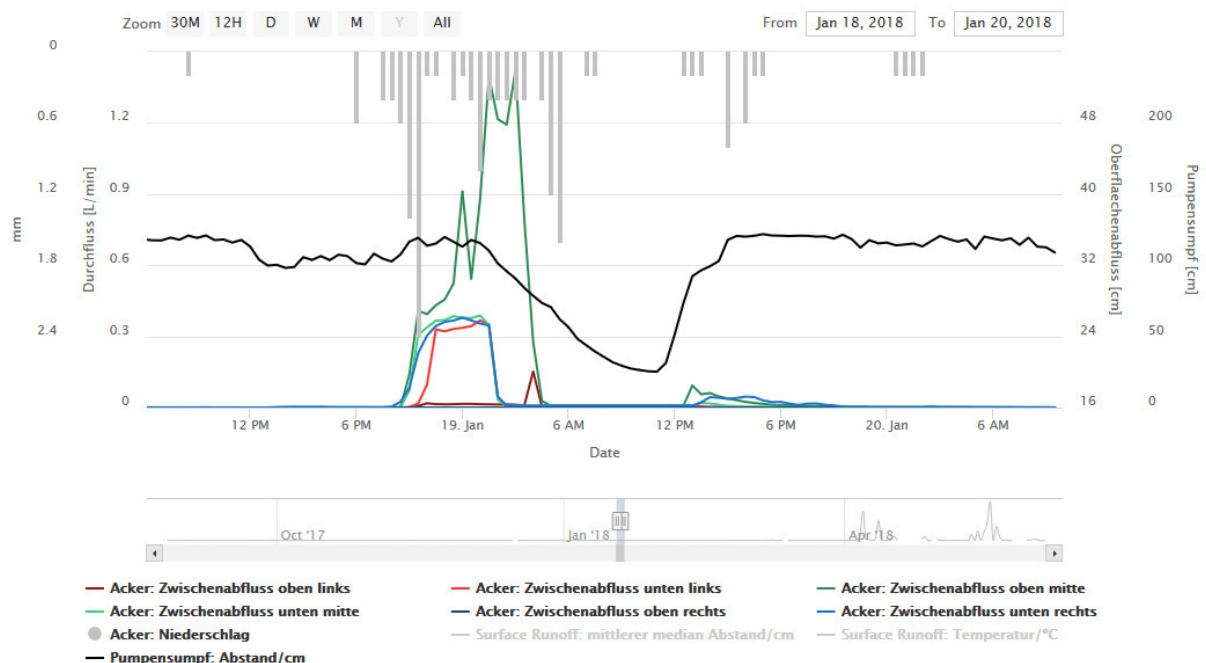


Abbildung 10: Überwachung der Messdaten während eines größeren Niederschlagsereignisses im Winter, das nach einem Ausfall der Pumpen zu einem Einstau des Grabens geführt hat.

Mithilfe der Spannungsüberwachung kann die Regelung und die Funktionsfähigkeit der Laderegler überprüft werden. Es hat sich beispielsweise gezeigt, dass die Laderegler die Last schon sehr früh abwerfen. Außerdem drosseln sie, wie in Abbildung 11 (Batterie Wald RPi) ersichtlich ist, den Ladestrom bereits bei einer Akkuspannung von nur 13,6V, was den Akkumulator sicher nicht vollständig auflädt. Der andere Laderegler in Abbildung 11 (Batterie Wald Pumpen) scheint zudem einen Defekt zu haben, denn er trennt nachts das Solarpanel nicht vom Akkumulator ab: die Spannung am Solarpanel sinkt nur bis auf etwa den Wert der Akkuspannung ab, müsste aber wie bei allen anderen Reglern bis auf wenige Volt absinken. Mithilfe dieser



Informationen können so bereits vor einem Wartungsbesuch Lösungen erarbeitet bzw. entsprechende Ersatzteile besorgt werden.

Die online-Überwachung der Messstationen offenbarte außerdem, dass die in den Kippwaagen verwendeten elektro-mechanischen Sensoren (Reed Relais) insbesondere nach längeren Einstauzeiten zu Ausfällen (hängen bleiben) neigen und dann vor Ort ersetzt werden müssen. Wir entwickelten daher eine vollelektronische Alternative, die auf einem HALL-Sensor basiert und durch 3D-Druck ein langlebiges und wartungsfreies snap-in replacement für den mechanischen Sensor darstellt.



Abbildung 11: Vergleich des Regelverhaltens zweier Solarregler im Wald.

## 4.5 Messergebnisse

Die ersten Daten im Untersuchungsgebiet wurden im Juni 2016 aufgezeichnet. Bisherige Messungen zeigen eine Beeinflussung der Speicherkapazität und Infiltrationsfähigkeit von der Landnutzung und der Bewirtschaftung, wodurch Unterschiede im Jahresverlauf zu erwarten sind [Rieger et al. 2017]. Zudem konnte ein Einfluss der Vorbedingungen festgestellt werden. Die Modellierung des Messhangs mithilfe des hydrologischen Modells WaSiM zeigt eine Übereinstimmung der landnutzungsabhängigen Zwischenabflusscharakteristik, wird jedoch durch die Unterschiede von Modell- und Gebietsparametern erschwert [Teschemacher et al. 2018]. Eine Zusammenstellung weiterer Messergebnisse zur Beschreibung der Landnutzungsabhängigkeiten und Reaktionszeiten ist in Arbeit.

## 5 Fazit und Ausblick

Der durch Verwendung von IoT-Technologie kosteneffizient mögliche Aufbau von drei identischen Messstationen auf Basis des RaspberryPi Microcomputers ermöglichte umfangreiche, landnutzungsabhängige, hydrologische Messungen, die ansonsten innerhalb des vorgegebenen finanziellen Rahmens nicht möglich gewesen wären. Die bisherigen Messergebnisse können eine Eignung des verwendeten Loggersystems bestätigen, wodurch der Raspberry Pi nach einer entsprechenden Test- und Optimierungsphase als kostengünstige Alternative zu konventionellen Datenloggern gesehen werden kann. Durch die Flexibilität des Betriebssystems konnten verschiedene Zusatzmodule eingebunden werden, die das Monitoring eines Messnetzes deutlich erleichtern. Im vorgestellten Anwendungsfall konnten etwa durch die Echtzeit-Datenübertragung der Messdaten sowie zusätzlicher Informationen wie die Batteriespannung Probleme schneller erkannt und gezielt vor Ort behoben werden.

Die hier eingesetzte IoT-Lösung muss dennoch als Prototyp bezeichnet werden, denn Probleme, die erst im Betrieb aufscheinen, wie hängende Reed-Kontakte, zu hoher Stromverbrauch, ungenügende Ladung der Akkumulatoren, Instabilitäten beim Betrieb der RPIs, defekte SD-Karten oder zu hohes Rauschen auf den ADC-Eingängen mussten und müssen laufend adressiert und durch Modifikationen behoben werden. Kommerzielle Geräte sind dagegen aufgrund der längeren Entwicklungsphase meist zuverlässiger, in ihrem Funktionsumfang aber auch deutlich eingeschränkter, weniger flexibel oder wesentlich teurer. Die hohe Flexibilität der IoT-Selbstbaulösung ermöglicht es erst, die Probleme im laufenden Betrieb zu identifizieren und Stück für Stück zu beheben. Gerade in innovativen, neuen Messsituationen überwiegt die Flexibilität einer Selbstbaulösung den Verlust an Stabilität gegenüber einem etablierten Serienmessgerät.

Durch die Speicherung der Daten in der LRZ-Cloud, können diese Daten im LRZ über den "Data Science Storage" (DSS) mit anderen LRZ-Computern geteilt werden. So wäre es beispielsweise möglich, die Daten als Input für aufwändige Rechnungen auf dem SuperMUC, einem der schnellsten Rechner in Europa, zu verwenden. Oder sie auf der GPGPU-Farm des LRZ mit Methoden des *Machine Learning* zu analysieren, ohne sie erneut kopieren und übertragen zu müssen; dies ist insbesondere für große Datensätze im TeraByte-Bereich von Bedeutung.

Beim vorgestellten Anwendungsfall handelt es sich um einen Forschungsspezialfall, der nur bedingt wiederverwendbar ist. Die verwendeten Methoden sind jedoch auf andere hydrologische Fragestellungen übertragbar. Die Anwendungsmöglichkeiten lassen sich dabei allgemein in zwei Gruppen aufteilen.

Einerseits kann durch eine automatische Datenübertragung, -darstellung, -sicherung und -auswertung bei kontinuierlich messenden Messstationen (z.B. Abfluss, Meteorologie) die Wartung deutlich erleichtert werden. Unregelmäßigkeiten können automatisch erkannt und die Wartungsintervalle der Stationen den Bedürfnissen entsprechend angepasst werden.

Andererseits besteht im hydrologischen Bereich die Problematik, dass Umweltmessdaten mit großer räumlicher und zeitlicher Heterogenität, die nicht über Satellit, Befliegungen oder Radar gemessen werden können, oft nicht mit ausreichender Genauigkeit erfasst werden. Beispiele sind hier Schneehöhen, Bodentemperaturprofile oder Bodenfeuchteprofile. Eine kosteneffiziente Erstellung und Wartung von kleinräumigen Messnetzen würde die Datengrundlage für detaillierte Analysen erheblich verbessern.

### **Danksagung**

Die Untersuchungen erfolgten innerhalb des ProNaHo-Forschungsvorhabens, das im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt durchgeführt wird. Unterstützt wurden die Feld- und Laboranalysen durch das DHG Forschungsstipendium für hydrologische Feldstudien.

## **6 Literaturverzeichnis**

- Adafruit (2018): Adafruit Industries, Unique & fun DIY electronics and kits. <https://www.adafruit.com/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Amazfit (2018): <https://www.geekbuying.com/item/English-Version-Huami-Amazfit-Smartwatch-Youth-Edition-392751.html>, <https://www.xiaomiglobal.de/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Bachmair, S.; Weiler, M. (2014): Interactions and connectivity between runoff generation process-es of different spatial scales. In: *Hydrological Processes* 28, 4, 1916–1930.
- BGL (1996): Geologische Übersichtskarte 1:500.000 Bayern. München: Bayerisches Geologisches Landesamt.
- Bracken, L.J.; Wainwright, J.; Ali, G.A.; Tetzlaff, D.; Amith, M.W.; Reaney, S.M.; Roy, A.G. (2013): Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. In: *Earth-Science Reviews* 119, 17–34.

- cytopia (2018): SSH tunnelling for fun and profit: Autossh. <https://www.everythingcli.org/ssh-tunnelling-for-fun-and-profit-autossh/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Cytron (2018): example tutorial of LoRa wireless point-to-point communication. <https://cytrontechnologies.github.io/RFM-LoRa-Shield-Examples/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- DAVIS (2018): Vantage Pro2 Sensor Suite. <https://www.davisnet.com/solution/vantage-pro2/> (aufgerufen am 01.06.2018).
- DWA (2015): *DWA-M550* - Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall.
- EBay (2018): ESP8266 Serial WIFI Wireless Transceiver. <https://www.ebay.de/itm/ESP8266-ESP-01-Serial-WIFI-Wireless-Transceiver-Wireless-LWIP-AP-STA-AIP/142636717307?hash=item2135cf94fb:g:sG0AAOSwEeVZeyZo> (aufgerufen am 3.6.2018).
- element14 (2018): <http://uk.farnell.com/internet-of-things> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Espressif (2018): ESP8266. <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Frings (2018): ESP8266 und ESP8285 Module Starter Anleitung. <http://stefanfrings.de/esp8266/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- GreatScott! (2018): <https://www.youtube.com/channel/UC6mlxFTvXkWQVEHPsEdflzQ> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Hackster (2018): Learn to design, create, and program electronics. <https://www.hackster.io/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Highcharts (2018): Make your data come alive. <https://www.highcharts.com> (aufgerufen am 3.6.2018).
- IFTTT (2018): If This Then That. <https://ifttt.com/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- instructables (2018): <http://www.instructables.com/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Lewis (2016): Now you can always take the weather with you. <https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/weather/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- LFU (2015): Digitale Übersichtsbodenkarte von Bayern im Maßstab 1:25000: ÜBK25. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- LRZ (2018): The LRZ Compute Cloud. <https://www.lrz.de/cloud> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Make (2018): Work Shop <https://www.youtube.com/channel/UChY6O8Ahw2cz05PS2GhUbg> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Make: Magazin (2018): <https://www.heise.de/make/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Maker Faire (2018): Bodensee, 2. Juni 2018. <https://maker-faire.de/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- MQTT (2018): <https://mosquitto.org/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Nest (2018): Nest Thermostats. <https://nest.com/thermostats/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Philips Hue (2018): Das smarte LED-Lichtsystem mit App-Steuerung. <https://www2.meethue.com/de-de#>, <https://www.digitaltrends.com/smart-home-reviews/philips-hue-review/> (aufgerufen am 2.6.2018).
- Prusa (2018): Original Prusa i3 MK2S kit. <https://shop.prusa3d.com/> (aufgerufen am 3.6.2018).

- Qivicon (2018): Willkommen im Smart Home. <https://www.qivicon.com/de/>, <https://www.amazon.de/Deutsche-Telekom-QIVICON-Home-99920525/dp/B00J8K5AWG> (aufgerufen am 3.6.2018).
- RaspberryPi (2018): Teach, Learn and Make with Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/> (aufgerufen am 4.6.2018).
- Rieger, W.; Teschemacher, S.; Haas, S.; Springer, J.; Disse, M. (2017): Multikriterielle Wirksamkeitsanalysen zum dezentralen Hochwasserschutz. In: *Wasserwirtschaft 107*, 11, S. 56–60.
- Schulla (2017): Model Description. WaSiM: Water balance Simulation Model. Zürich.
- Sparkfun (2018): <https://www.sparkfun.com/> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Spieß, A. (2018). The Guy with the Swiss Accent. [https://www.youtube.com/channel/UCu7\\_D0o48KbfhpEohoP7YSQ/featured](https://www.youtube.com/channel/UCu7_D0o48KbfhpEohoP7YSQ/featured) (aufgerufen am 3.6.2018).
- Teschemacher, S.; Haas, S.; Rieger, W. (2015): ProNaHo Prozessbasierte Modellierung Natürlicher sowie Dezentraler Hochwasserrückhaltemaßnahmen zur Analyse der ereignis- und gebietsabhängigen Wirksamkeit. IN: *DWA Landesverbandstagung Bayern*, Straubing, Germany, Oct 21-22, 2015.
- Teschemacher, S.; Disse, M.; Rieger, W. (2018): Experimentelle und modellgestützte Untersuchung der Abflussbildung und -konzentration in verschiedenen Landnutzungstypen am Beispiel eines Messhangs im Einzugsgebiet der Glonn (Odelzhausen). In: *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 39.18, Beiträge zum Tag der Hydrologie 2018*. Dresden, S. 95-106.
- Teschemacher, S.; Heller, H. (2018): <http://tunnel.dyn.mwn.de/~sonja/meteo> (aufgerufen am 3.6.2018).
- The Mathworks (2018): ThingSpeak. <https://thingspeak.com> (aufgerufen am 3.6.2018).
- TPAI (2018): The Post Apocalyptic Inventor. <https://www.youtube.com/channel/UCDbWmfrwmzn1ZsGgrYRUxoA> (aufgerufen am 3.6.2018).
- Withings (2018): Withings WS-50 Smart Body Analyzer. <https://www.amazon.de/Withings-WS-50-Smart-Analyzer-schwarz/dp/B00BKRRQ4E8>, <https://support.health.nokia.com/hc/de/categories/200118207-Smart-Body-Analyzer-WS-50> (aufgerufen am 3.6.2018).