Machbarkeitsstudie zur dezentralen Überwachung von Mischwasserentlastungen

Abschlussbericht

durchgeführt von

der Arbeitsgruppe Gewässermonitoring des Lehrstuhls für
Anorganische und Analytische Chemie und
dem Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme
Universität des Saarlandes

Projektleitung
Prof. Dr. Horst P. Beck
Prof. Dr. Georg Frey

Bearbeitung
Dipl. Geogr. Angelika Meyer
Dipl. Ing (FH) Elisabeth Fünfrocken
Dipl.-Ing. Josef Meiers
Raja Rehan Khalid, M.Sc.

Saarbrücken, Dezember 2016

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 1

2 Einleitung 2

2.1 Hintergrund und Zielsetzung der Machbarkeitsstudie 2

2.2 Organisation und zeitlicher Ablauf der Machbarkeitsstudie 3

3 Theoretische Grundlagen 4

3.1 Mischwasserentlastung 4

3.2 Gewässergütemessungen 7

3.2.1 Strategien der Gewässergütemessung 7

3.2.2 Aufbau und Ausstattung einer Gewässergütemessstation 7

3.2.3 Datensicherung und -auswertung 8

3.3. Energieversorgung 8

3.3.1 Anforderungen an das Energiesystem 8

3.3.2 Nutzungspotential von Energieströmen 9

4. Umsetzung 13

4.1 Energetische und steuerungstechnische Ausstattung der Solarstation und Systemerweiterung 13

4.2 Auswahl der Messsonden für die Solarstation 17

4.3 Umsetzung des Batch-Betriebes und Pumpensteuerung 18

4.4 Generierung von Zusatzinformationen 21

4.5 Messdatenerfassung des elektrischen Messsystems 22

4.6 Entwicklung eines Messdatenverwaltungs- und Kommunikationssystems 26

4.7 Standortauswahl 30

4.8 Versuchsaufbau im Feld 33

5. Ergebnisse 35

5.1 Ergebnisse der Gewässergüte-Messungen 35

5.2 Auswertung der Daten im Vergleich mit anderen Standorten 40

5.3 Auswertung der technischen Daten und Fallstudien basierend auf einem Simulationsmodell 42

5.4 Entwicklung einer intelligenten, prädiktiven Steuerung 54

5.5 Herausforderungen beim Versuchsaufbau und -ablauf 61

5.6 Schwierigkeiten der chemischen Messungen 62

5.7 Herausforderungen im Bereich Energie und Technik 64

6. Fazit und Ausblick 65

7. Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole 67

8. Abbildungsverzeichnis 68

9. Tabellenverzeichnis 71

10. Literaturverzeichnis 72

11. Anhang 73

1 Zusammenfassung

Das Ziel der Machbarkeitsstudie war es, zu prüfen, inwiefern mit Hilfe einer energieautarken solarbetriebene Gewässergüte-Messstation die immissionsseitige Erfassung von Abschlägen aus einer Mischwasserentlastung sowie deren Bewertung auf ein Fließgewässer realisiert werden kann. Es galt insbesondere auch eine Strategie zu entwickeln, um ausschließlich im Falle eines Entlastungsereignisses einen zielgerichteten und verlässlichen Messbetrieb zu gewährleisten.

Wegen der besonderen Betriebsweise einer solchen Messstation und wegen der Unsicherheit, ob ein zuverlässiger Betrieb mit der vorhandenen Ausstattung an Solarmodulen in geeigneter Weise möglich ist, galt es zunächst, die technischen Gegebenheiten der Station zu analysieren, um sie dann durch entsprechende Umrüstungen für den neuen Verwendungszweck tauglich zu machen sowie die Energieeffizienz zu optimieren.
Zudem musste die Betriebsart auf die Energieausbeute angepasst werden. Daher wurde ein ereignisgesteuerter (batch-)Betrieb realisiert, bei dem die Förderpumpe, welche zu messendes Flusswasser in die Messstation fördert, nur im Falle eines Mischwasser-Abschlages eingeschaltet wird. Die Energiespeicher konnten so in der pump- bzw. messfreien Zeit wieder aufgeladen werden.
Die geringe Energieausbeute erlaubte ausschließlich den Einsatz von Messsonden für die Gewässergütemessungen, wodurch Art und Anzahl der messbaren Parameter (Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung, Ammonium und Nitrat) deutlich begrenzt war.
Um die erhobenen Messdaten interpretieren zu können, musste eine Vielzahl von Zusatzinformationen über den Zustand des Gesamtsystems erfasst und bei der Datenauswertung entsprechend berücksichtigt werden.
Grundsätzlich stellte es sich als schwierig heraus, Abschlagsereignisse mittels Ultraschall-Sensor zweifelsfrei zu detektieren. Zudem erwies sich die ionensensitiven Sonde für die Erfassung von Ammonium und Nitrat als wartungsintensiv und alles andere als betriebsstabil.
Es muss ferner angemerkt werden, dass die Plausibilisierung und Interpretation von im batch-Betrieb ermittelten Messdaten sich generell kompliziert gestaltet.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden auch zwei Ansätze zur Entwicklung einer intelligenten, prädiktiven Steuerung erarbeitet. Diese beschäftigen sich einerseits mit der Modellierung des Energieangebotes und –verbrauches und daraus resultierend mit der Erstellung eines Vorhersagemoduls für das zukünftige Energieangebot mit Hilfe von Zeitreihenanalysen. Andererseits wurde ein Vorhersagemodul auf Basis der Himmelsbeobachtung zwecks Ansteuerung der Sonnenstandsnachführung des PV-Moduls entwickelt.
Zum Zweck der Systemauslegung wurde ein Simulationsmodell des Systems erstellt, welches die Analyse hinsichtlich der energetischen Systemverfügbarkeit gestattet. Dieses Modell wurde mit den Kenntnissen und Messergebnissen, welche im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie gewonnen wurden, parametriert. Es wurde gezeigt, dass es zwar möglich ist, das System energieautark zu betreiben, allerdings nur in Verbindung mit sehr hohen Speicherkosten. Als problematisch wird der ununterbrochene Grundleistungsbedarf von 70W eingestuft. Daher scheint die Vergrößerung der PV-Modulfläche und/oder die Minimierung der Grundlast durch ein mehrstufiges Abschalten der Grundverbraucher und Aktivieren im Anforderungsfall sinnvoll.

2 Einleitung

2.1 Hintergrund und Zielsetzung der Machbarkeitsstudie

Nach wie vor erreichen viele Fließgewässer trotz erheblicher Anstrengungen den von der WRRL geforderten guten ökologischen Zustand nicht. Die Gründe dafür sind oftmals unklar. Derzeit wird daher in vielen Ländern der Focus u.a. auf die Abschätzung und Überwachung von Belastungen aus Mischwasserentlastungsbauwerken (i.d.R. Regenrückhaltebecken, Regenüberlaufbauwerke und Stauraumkanäle) gelegt.

Auch im Saarland ist dieses Thema in der Diskussion, insbesondere, da Mischwasserentlastungen auf Grund der zum Teil sehr hohen Besiedlungsdichte, des hohen Anschluss- und Versiegelungsgrades sowie der geringen Größe der meisten Vorfluter stellenweise gravierende Auswirkungen auf die Gewässer haben. Es gilt daher zu klären, ob diese Beeinträchtigungen auch entscheidend für die schlechte biologische Situation vieler Gewässer sind.

Grundsätzlich stellen Abschläge von Mischwasserentlastungsbauwerken vor allem in kleineren und mittleren Gewässern eine große Gefährdung dar. Dem hydraulischen Stress durch die einströmenden Wassermengen sind fast alle Komponenten der Biozönose ausgeliefert, zudem kann es auch zu morphologischen Veränderungen im Flussbett und im unmittelbaren Uferbereich kommen. Darüber hinaus gelangen im Zuge der Abschläge immer Schadstoffe in das Gewässer. Die Häufigkeit der Abschläge, die Menge und Zusammensetzung des eingetragenen Abwassers und die Dauer der Ereignisse sind von der Konzeption, aber auch von der Funktionalität (Wartung) des jeweiligen Bauwerkes abhängig. Die negativen Auswirkungen auf das Gewässer wiederum werden sehr stark von anderen temporären Faktoren wie z.B. Wasserstand und Vorbelastung des Gewässers, Wetter und Wassertemperatur etc. beeinflusst. Daher ist es sinnvoll, die Belastungssituation immissionsseitig, also im Gewässer selbst und nicht im Kanal zu erfassen.

Allerdings gestaltet sich die quantitative und qualitative Überwachung dieser Bauwerke und somit auch die Abschätzung ihrer Bedeutung sehr schwierig. Emissionsseitig werden bei den meisten Bauwerken weder die zeitliche Komponente (Zeitpunkt und Dauer des Abschlages) noch Menge und Inhaltsstoffe des eingeleiteten Abwassers erfasst. Darüber hinaus müssten aber auch immissionsseitig die Auswirkungen eines solchen Ereignisses auf das Gewässer (also im Gewässer selbst) ermittelt werden. Ein logistisches Problem besteht zudem darin, dass sich die Einleitstellen vieler Bauwerke in Bereichen ohne nennenswerte Infrastruktur befinden.

Ziel der vorliegenden Machbarkeitsstudie war es daher, eine Strategie zu entwickeln, um ausschließlich im Falle eines Entlastungsereignisses einen zielgerichteten und verlässlichen Messbetrieb mit Hilfe einer energieautarken Gewässergütemessstation zu gewährleisten und so immissionsseitig die Beeinträchtigung der Gewässergüte durch Abschläge aus Mischwasserentlastungsbauwerken zu erfassen. Dabei sollten nur so lange aktuelle Messwerte ermittelt werden, bis das Ereignis vorüber ist, damit die Energiespeicher in der messfreien Zeit wieder aufgeladen werden können.

2.2 Organisation und zeitlicher Ablauf der Machbarkeitsstudie

Die Machbarkeitsstudie wurde von der AG Gewässermonitoring des Institutes für Anorganische und Analytische Chemie sowie vom Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme der Universität des Saarlandes entwickelt und durchgeführt.

Die AG Gewässermonitoring beschäftigt sich seit vielen Jahren im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlandes (MUV) mit der kontinuierlichen Überwachung von Fließgewässern mit Hilfe von mobilen Gewässergütemessstationen. Die online (kontinuierlich) gewonnenen Messdaten werden unter Berücksichtigung weiterer Informationen wie hydrologischer Daten (z.B. Pegelstände und Abflussmengen), Klimadaten (z.B. Niederschläge und Sonneneinstrahlung) sowie der naturräumlichen Gegebenheiten und anthropogenen Einflüsse im Einzugsgebiet bzw. am Standort (z.B. Bodenarten, Zuflüsse, Regenüberlaufbauwerke, Kläranlagen, landwirtschaftliche Belastung etc.) interpretiert, um die Herkunft von Belastungen bestimmen sowie deren schädlicher Einwirkung auf die Fließgewässer abschätzen zu können.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie bestanden die Aufgaben der AG Gewässermonitoring vornehmlich in

- der Bereitstellung der Solarstation
- der strategischen Planung des Messbetriebes
- der Wartung und Pflege der Geräte für die Gewässergütemessungen
- der Qualitätssicherung der erhobenen Gewässergütedaten sowie
- der Auswertung und Interpretation dieser Messdaten.

Der Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden zur Bereitstellung verlässlicher Automatisierungs- und Energiesysteme. Die wichtigsten Anwendungsbereiche sind dabei die Automatisierung und Optimierung von Energiesystemen, insbesondere die Integration erneuerbarer Erzeuger und die damit verbundenen Herausforderungen für einen effizienten Betrieb sowie der Entwurf und die Analyse vernetzter Automatisierungssysteme, sog. C3-Systeme (Communication, Computation, Control), deren komplexes Zeitverhalten spezielle Anforderungen an den Entwurf und die Spezifikation sowie die Modellierung und Simulation stellt.

Zu den Aufgaben des Lehrstuhls für Automatisierungs- und Energiesysteme gehörten im Rahmen der Machbarkeitsstudie gehörten

- die Aufarbeitung und Optimierung der Solarstation im Hinblick auf die Energieausbeute
- die Entwicklung einer intelligenten, prädiktiven Steuerung für autarke Energiesysteme (Energiemanagement)
- die Verbesserung der Einbindung des Messsystems sowohl zum Gewässermonitoring als auch zum Energiemanagementsystem
- die Steuerung der Pumpe und des gesamten Messapparates in einem sicheren batch-Betrieb
- die Entwicklung eines Kommunikationssystems zur Messdatenerfassung, -speicherung und -verwertung unter Verwendung aktueller Standards
- die Generierung von Zusatzinformationen (z. B. Messzeitpunkte, Füllstand im Probentopf etc.), welche zur Auswertung der erhobenen Messdaten unabdingbar sind.

Die Machbarkeitsstudie wurde durch den Zweckverband Natura Ill-Theel mit Unterstützung des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz des Saarlandes finanziert. Sie war zunächst für die

Dauer von neun Monaten (01.09.2015 bis 31.05.2016) ausgelegt und wurde kostenneutral bis Ende September 2016 verlängert.

Innerhalb der Machbarkeitsstudie kam eine mobile Gewässergütemessstation zum Einsatz, die bereits vor einigen Jahren von der AG Gewässermonitoring angeschafft und grundsätzlich als energieautarkes System mit Solarzellen und Gasgenerator konzipiert worden war. Da die Energieausbeute allerdings nie zum kontinuierlichen Betrieb ausreichte[1], war sie für Netzspannung nachgerüstet worden und seither lediglich über einen konventionellen Stromanschluss (220V) betrieben worden.

3 Theoretische Grundlagen

Das folgende Kapitel gibt einen kurzen Einblick in die Grundlagen der Mischwasserentlastung sowie in die Strategien der Gewässergüteüberwachung und der Energieversorgung, da diese Begriffe für das Verständnis der Konzeption und der Durchführung der Machbarkeitsstudie unabdingbar sind.

3.1 Mischwasserentlastung

Unter dem Begriff der Mischwasserentlastung sind alle Bauwerke zusammengefasst, die innerhalb einer Mischwasserkanalisation, in der Regen- und Abwasser gemeinsam abgeführt werden, als Stauräume eingebracht wurden. Da in dieser Art der Kanalisation (im Gegensatz zur Trennkanalisation) Regenwasser und Abwasser nicht separiert abgeführt werden, werden Stauräume benötigt, um bei starkem Regen oder Tauwetter diejenige Menge an Wasser zurückzuhalten, die nicht mehr zur Kläranlage transportiert und dort behandelt werden kann.

Man unterscheidet hauptsächlich die folgenden Bauwerkstypen:

Regenüberlauf
Von einem Regenüberlauf (RÜ) aus wird über Pumpen oder freies Gefälle ein bestimmter Anteil der Schmutzwassermenge zur Kläranlage geleitet (Drosselabfluss), der Rest wird über eine Schwelle in das entsprechende Gewässer (Vorfluter) abgeschlagen. Das Mischwasser wird im Regenüberlauf weder gespeichert noch weiter behandelt (s. Abbildung 3.1-1).

[1] Besonders der kontinuierliche Betrieb der Pumpe verbraucht sehr viel Energie.

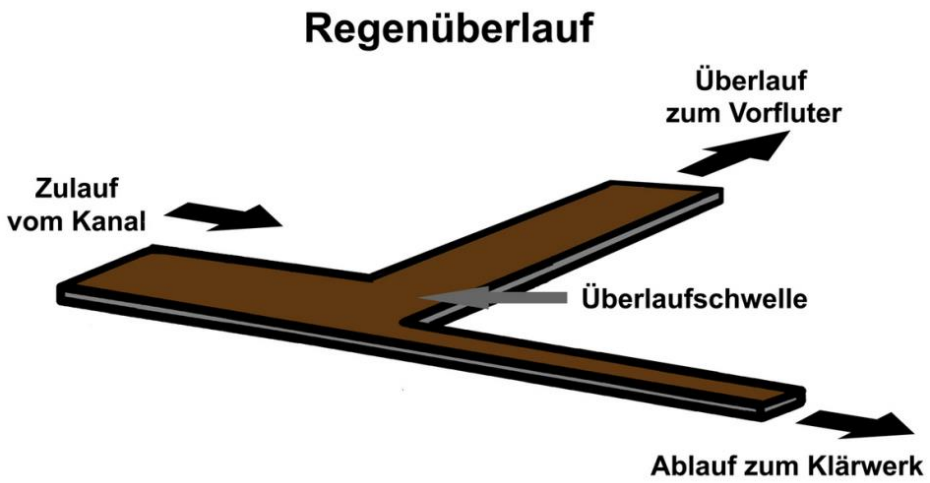


Abbildung 3.1-1 Schema eines Regenüberlaufes (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Regenüberlaufbecken

Im Gegensatz dazu findet im Regenüberlaufbecken (RÜB) eine Zwischenspeicherung des Mischwassers in einer Speicherkammer statt. Das gespeicherte Mischwasser wird mit Zeitverzögerung zur Kläranlage transportiert. In manchen Fällen erfolgt zuvor im Bauwerk auch eine mechanische Vorklärung (s. Abbildung 3.1-2).

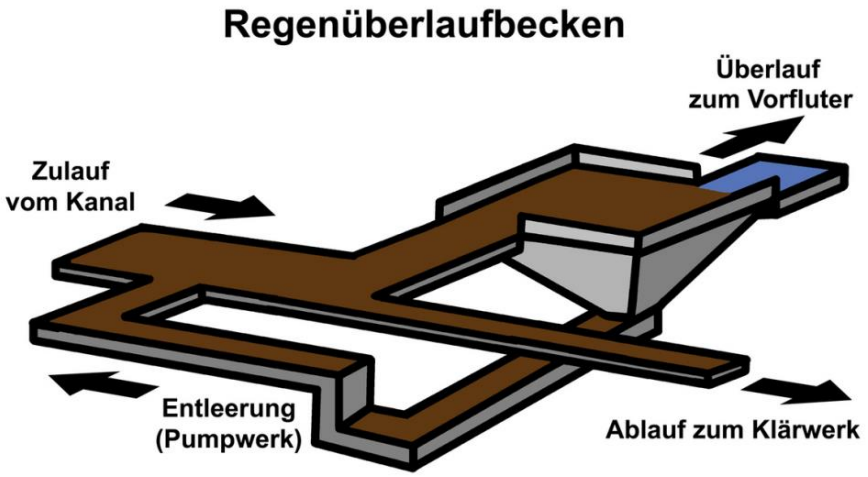


Abbildung 3.1-2 Schema eines Regenüberlaufbeckens (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Stauraumkanäle

Stauraumkanäle (SK) als Sonderform der Regenüberlaufbecken bestehen in einem deutlich vergrößerten Querschnitt des Kanales (s. Abbildung 3.1-3).

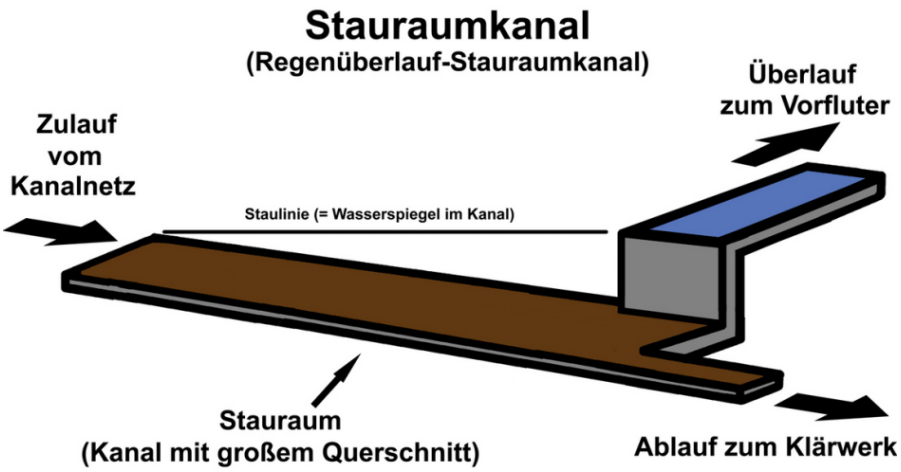


Abbildung 3.1.-3 Schema eines Stauraumkanals (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Die Bauwerkstypen können rund oder rechteckig, offen oder geschlossen konzipiert sein, zudem gibt es viele verschiedene Ausführungen im Hinblick auf die Gestaltung des Zu- und Ablaufes (vgl. hierzu MKULNV 2015).
Es existieren verschiedene Ansätze zur Dimensionierung von Mischwasserentlastungen, in die unterschiedliche Bemessungsgrößen wie z.B. Anzahl der angeschlossenen Einwohner (Einwohnerwerte, EW), Fläche des Entwässerungsgebietes, Anteil der undurchlässigen Einzugsgebietsfläche, Mischwasserabfluss zur Kläranlage, mittlerer Niedrigwasserabfluss oder Trockenwetterabfluss im Tagesmittel bzw. stündlicher Spitzenabfluss bei Trockenwetter im Gewässer an der Einleitstelle, langjährige mittlere Jahresniederschlagshöhe etc. Eingang finden.
In Deutschland wird in der Praxis für die Dimensionierung eines Bauwerkes oftmals das Arbeitsblatt ATV-A 128 „Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen“ der DWA (ehemals ATV) zu Grunde gelegt [DWA 1992].

Je nach Dimensionierung und baulicher Ausführung eines Bauwerkes und Menge des aufkommenden Mischwassers unterscheiden sich die Abschläge deutlich im Hinblick auf Entlastungshäufigkeit, -dauer und -menge sowie die Zusammensetzung des eingetragenen Abwassers.
Gemäß des sog. a/b-Wert-Konzeptes können zwei verschiedene Lastfälle unterschieden werden (ATV 1997):

- die stoffliche Belastung (a-Wert): „Der a-Wert ist ein Maß für die stoffliche Belastung des Gewässers und ergibt sich als Quotient des Einwohnerwertes des betreffenden kanalisierten Einzugsgebietes und des mittleren Niedrigwasserdurchflusses (MNQ) des Gewässers an der Einleitstelle.“ Dabei gelten a-Werte über 25 als kritisch für ein Gewässer (LAU, 2008)
- die hydraulische Belastung (b-Wert): „Der b-Wert ist ein Maß für die hydraulische Belastung des Vorflutgewässers. Er ist das Verhältnis von undurchlässiger Fläche des Entwässerungsgebietes zu oberhalb gelegenem Einzugsgebiet des Gewässers in Prozent. B-Werte >5% werden als kritisch bewertet, weil ab diesem Wert mit einer Abnahme der Individuenhäufigkeit und Artenzahl durch Verdriftung von Organismen durch teil- und großflächige Bewegung der Gewässersohle gerechnet werden muss.“ (LAU, 2008)

Die negativen Folgen von Mischwassereinleitungen können sich akut (hydraulisch, Ammoniak/Ammonium, ortho-Phosphat), verzögert (Sauerstoff) und langfristig (Gesamt-Stickstoff, Gesamt-Phosphor) auf das Gewässer auswirken (Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt 2014).

Allerdings besteht nicht nur im Falle eines regulären Abschlagereignisses eine Gefährdung für das Gewässer. Vielmehr führen oft auch technische Defekte und/oder mangelhafte Wartung eines Bauwerkes dazu, dass mehr ungeklärtes Abwasser in das entsprechende Gewässer eingeleitet wird als nötig oder dass auch in Trockenzeiten kontinuierlich Abwasser aus dem Kanal in das Gewässer gelangt.

3.2 Gewässergütemessungen

3.2.1 Strategien der Gewässergütemessung

Generell bestehen unterschiedliche Möglichkeiten des Fließgewässermonitorings je nach benötigtem Informationsgehalt im Hinblick auf die zu messenden Parameter und die zeitliche Auflösung.
Werden Stichproben entnommen und im Labor analysiert, wird dies als *off-site-Messung* bezeichnet. Es können aber auch kontinuierlich messende Geräte im Gewässer selbst *(in-situ-Messung)* oder in der Nähe des Gewässers in einer Messstation *(on-site-Messung)* eingesetzt werden. Mit Hilfe kontinuierlicher Messmethoden können zwar nur bestimmte Parameter erfasst werden, sie liefern jedoch durch die hohe Messfrequenz wichtige Hinweise auf kurzfristige Veränderungen und Einträge im Gewässer. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden on-site-Messungen durchgeführt.

3.2.2 Aufbau und Ausstattung einer Gewässergütemessstation

Zur Umsetzung von on-site-Messungen können unterschiedliche Messstationen zum Einsatz kommen. Die Konzeption einer solchen Station hängt neben den Standortbedingungen ganz wesentlich von der Fragestellung und der damit verbundenen Ausstattung ab. Im Folgenden wird daher der Aufbau und die Funktionsweise solcher Stationen beispielhaft anhand der von der AG Gewässermonitoring konzipierten mobilen Gewässergütemessstation erläutert.
Eine on-site betriebene Messstation stellt in der Regel einen Bypass zum eigentlichen Fließgewässer dar. Über einen Zulauf- und einen Ablauf-Schlauch wird das Flusswasser mit Hilfe einer im Gewässer installierten Pumpe durch den in der Station befindlichen Probentopf geleitet und kann auf der anderen Seite des Topfes wieder herausfließen (vgl. auch Abbildung 4.3-1). Im Probentopf selbst befinden sich Halterungen zum Einbringen verschiedener Messsonden sowie in größeren Stationen auch Vorrichtungen zur Probenentnahme für weitere Messgeräte (z.B. online-Photometer). Bei Bedarf kann auch ein automatischer Probenehmer in die Station integriert werden, welcher in einem vorgegebenen Zeitraster oder auch ereignisgesteuert ein definiertes Probenvolumen für eine spätere Analyse im Labor in spezielle Behälter abfüllt.
Alle Messgeräte sind über Leitungen an einen Datenlogger angeschlossen. Darüber hinaus können auch Signale oder Statusinformationen anderer Geräte (Bsp. Pumpe) auf den Logger aufgelegt werden. Der Datenlogger speichert die Werte im voreingestellten Zeitintervall, so dass diese mit Hilfe des angeschlossenen Modems jederzeit abgerufen werden können.
Grundsätzlich sollten zur Qualitätssicherung der online-Messwerte während einer Messkampagne regelmäßig Vergleichsproben aus dem Probentopf und dem Gewässer entnommen und im Labor analysiert werden. Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen können dann mit denen der online-Messgeräte verglichen und Fehlfunktionen der online-Geräte rechtzeitig erkannt und behoben werden.

3.2.3 Datensicherung und -auswertung

Die übermittelten Gewässergütedaten werden auf ihre Plausibilität hin überprüft und fehlerhafte Werte, die sich z.B. während der Wartung oder des Ausfalls eines Gerätes ergaben, entfernt.
Die Interpretation der aufbereiteten Zeitreihen erfolgt in der Regel unter Berücksichtigung von hydrologischen Daten (Abfluss), klimatischen Daten wie Niederschlag, Lufttemperatur, Luftdruck und Globalstrahlung, aber auch unter Beachtung von geologischer Ausstattung des Einzugsgebietes, von Landnutzung, Einleitern u.a..

3.3. Energieversorgung

Wegen des oft abgelegenen Standorts für die gewünschten Überwachungsmessungen spielt die Frage der Bereitstellung von Energie zum Betrieb eine entscheidende Rolle.

3.3.1 Anforderungen an das Energiesystem

Wie eingangs beschrieben war die Hauptaufgabe des Messsystems die zeitliche sowie qualitative Erfassung der Belastung aus Mischwasserentlastungsbauwerken. Bedingt durch die Messaufgabe und die Einsatzstandorte in unmittelbarer Nähe zu Binnenfließgewässern ergaben sich mehrere Anforderungen an das Energiesystem.

Umweltschutz
Aufgrund der unmittelbaren Nähe zu Fließgewässern stellten sich erhöhte Anforderungen an den Betrieb des Gesamtsystems hinsichtlich des Umweltschutzes. Diese sind:

- geringe Geräuschemissionen (z.B. durch Verbrennungsmotor eines Stromerzeuger-aggregates)
- geringe Stoffemissionen (z.B. durch Abgase des Verbrennungsmotors eines Stromerzeuger-aggregates)
- vorsichtiger Umgang mit Betriebsstoffen (z.B. Kraftstoffbevorratung für ein Stromerzeuger-aggregat)

Eine Möglichkeit zur Einhaltung oben genannter Anforderungen ist die Verwendung von erneuerbaren Energiequellen bzw. Brennstoffzellentechnologien.

Energieautarkie
Mischwasserentlastungsbauwerke befinden sich oft in Gegenden ohne direkte Energieversorgungsmöglichkeit. Aus diesem Grund sollte das System energieautark arbeiten, d.h. es sollte in der Lage sein, Energieproduktion und -verbrauch zu steuern, um einen zuverlässigen Betrieb ohne Ausfallzeiten zu gewährleisten. Insbesondere der Dauerbetrieb der Messdatenaufzeichnung und die Fernkommunikation sollten sichergestellt werden.
Erfolgt eine steuerbare Energieproduktion z.B. durch ein Stromerzeugeraggregat, kann sowohl die Energieproduktion als auch der -verbrauch beeinflusst werden
Im Fall der ausschließlichen Nutzung von erneuerbaren Energien (z.B. Windkraft oder Solarenergie) muss die Verbraucherseite an das nicht beeinflussbare Energieangebot angepasst werden.

Trotz zuverlässiger Sicherstellung der Energieversorgung musste auch garantiert werden, dass ein Standortwechsel, d.h. die In- und Außerbetriebnahme des Systems schnell und ohne hohen personellen und hilfstechnischen Aufwand erfolgen kann. Da die Solarstation als gebremster Hänger konzipiert ist und mit einem PKW gezogen wird, müssen insbesondere die im Rahmen der

Straßenverkehrszulassungsordnung geltenden Gesetze hinsichtlich angebauter Komponenten (z.B. Photovoltaik-Module, Stromerzeugeraggregat) berücksichtigt werden.

3.3.2 Nutzungspotential von Energieströmen

In diesem Kapitel wird ein kurzer Überblick über zur Verfügung stehende Energieströme gegeben. Anschließend wird das Potential der ausgewählten Energiequelle für die Systemanwendung ermittelt.

Energieträger sind Stoffe, aus denen direkt oder durch eine oder mehrere Umwandlungen End- bzw. Nutzenergie gewonnen werden kann. Sie werden entlang ihrer Bereitstellungskette von der Gewinnung bis zur finalen Nutzung durch den Endverbraucher untergliedert in Primär-, Sekundär-, End- und Nutzenergie. Dabei entstehen beim Übergang in jede Stufe, d.h. bei jeder Umwandlung, Verluste (siehe Abbildung 3.3.2-1).

Primärenergie sind Energieströme (z.B. Windenergie, Solarstrahlungsenergie), Primärenergieträger die Träger entsprechender Stoffe (z.B. Erdöl, Steinkohle), die noch keiner technischen Umwandlung unterworfen wurden.

Sekundärenergieträger bzw. -ströme sind die erste Umwandlungsstufe aus Primärenergieträgern oder -strömen und können zu weiteren Sekundärenergieträgern oder -strömen umgewandelt werden.

Der Endverbraucher bezieht die Endenergie, welche aus Sekundär- oder ggf. aus Primärenergieträgern bzw. -strömen entsteht.

Nutzenergie wird die Energie genannt, die nach der letzten Umwandlung in den Verbrauchergeräten für den jeweiligen Verwendungszweck zur Verfügung steht.

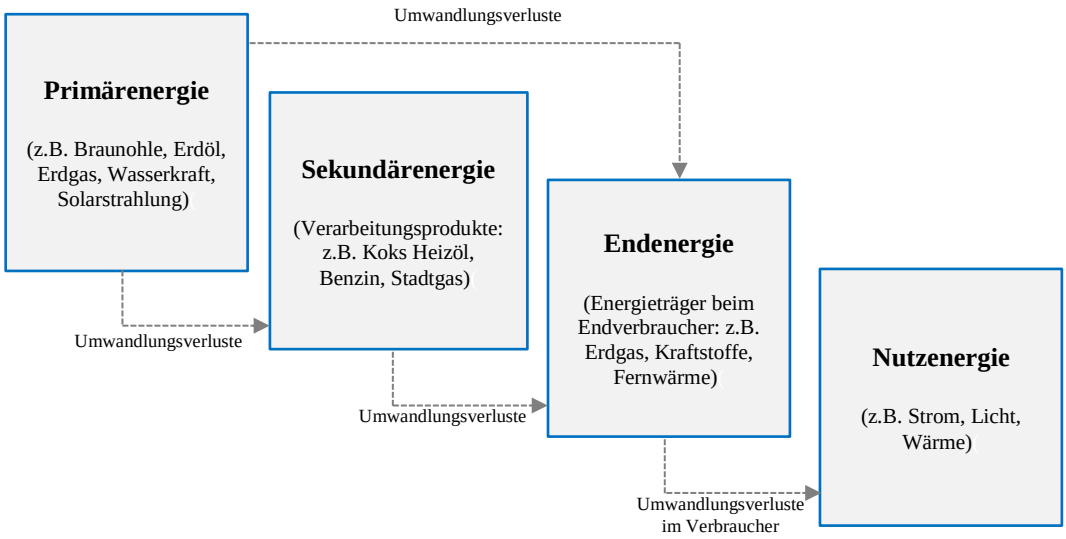


Abbildung 3.3.2-1: Energieumwandlungskette

Die Gesamtheit der unserer Zivilisation zur Verfügung stehenden Energie wird als Energiebasis bezeichnet. Man unterteilt sie in endliche Energievorräte und (nach menschlichen Dimensionen) unendlich vorhandene erneuerbare Energiequellen. Diese drei Quellen sind Erdwärme, Gravitation und Solarenergie. Energievorräte werden in fossile (lat. *fossilis* (ausgegraben)) und rezente (lat. *recens* (kürzlich)) Vorräte unterschieden (s. Abbildung 3.2.2-2).

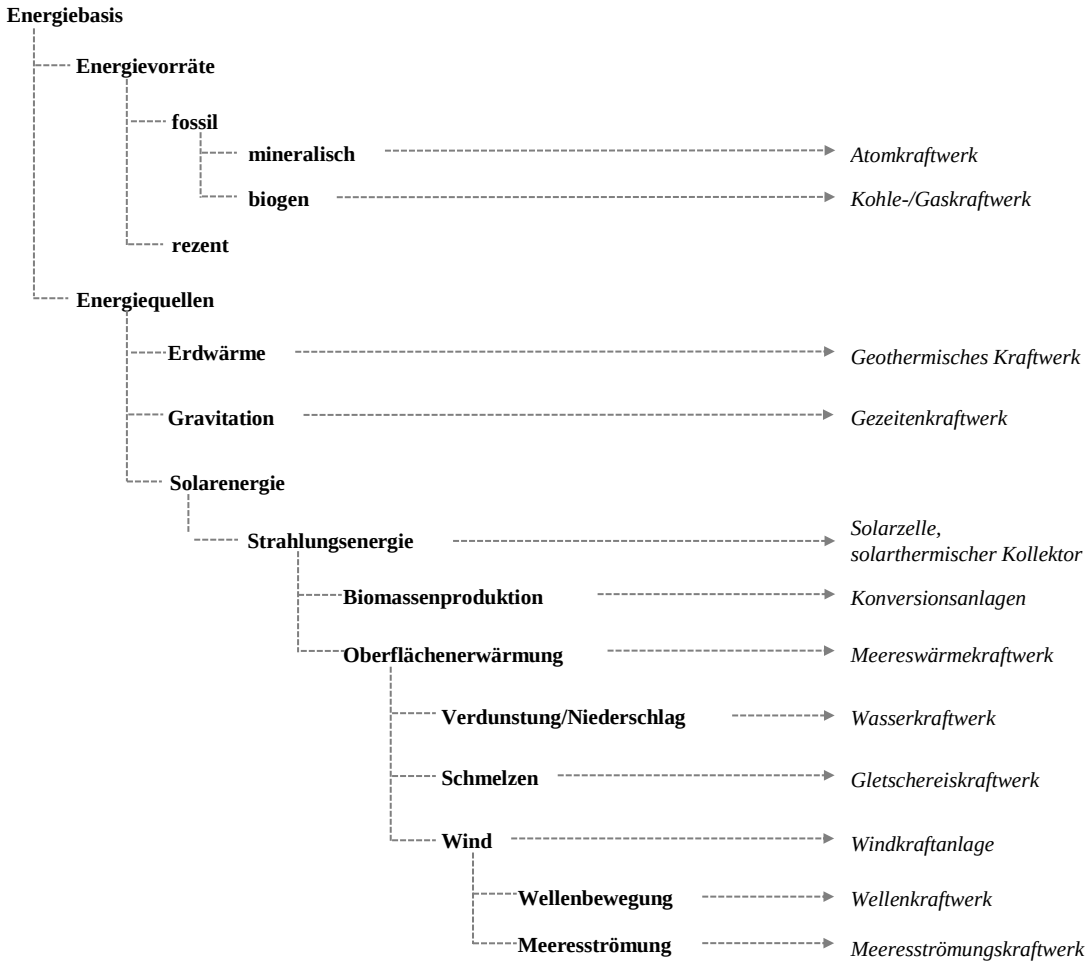


Abbildung 3.3.2-2: Unterteilung der Energiebasis und Möglichkeiten zur Nutzung des Energieangebots

In diesem Abschnitt soll eine erste Abschätzung der Energieausbeute der Solarenergie als erneuerbare Energiequelle für das Messsystem erfolgen.

Abbildung 3.3.2-3 zeigt hierzu die jährliche mittlere Globalstrahlungssumme auf eine horizontale Fläche für das Jahr 2010. Diese ergibt sich im Durchschnitt zu 1088 kWh/m² und soll im Folgenden als Referenzwert gelten.

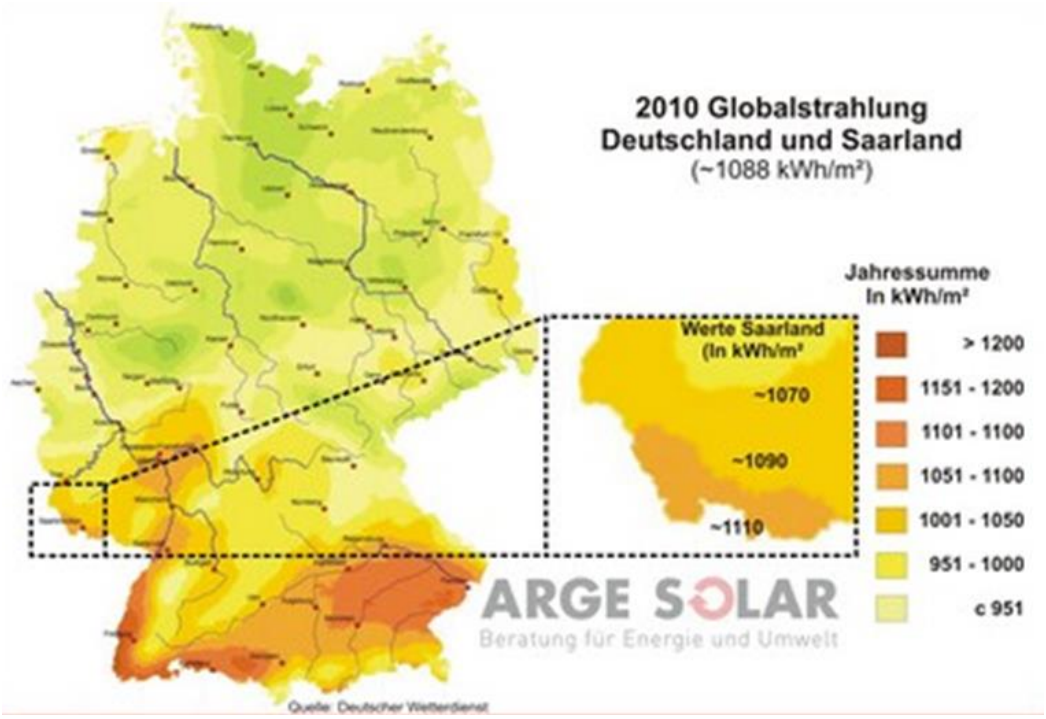


Abbildung 3.3.2-3: Globalstrahlung Jahressummen für Saarland (ARGE Solar, 2016)

Aufgrund der tages- und jahreszeitlich schwankenden scheinbaren Sonnenbahn um die Erde hängt die reale Energieausbeute einer Photovoltaik-Anlage von deren Ausrichtung und Neigung ab. Das Verhältnis der Jahressummen der Globalstrahlung auf eine geneigte und horizontale Empfangsebene wird als Flächenfaktor bezeichnet. Jahresdurchschnittswerte für Deutschland sind in Abbildung 3.3.2-4 dargestellt. Damit lässt sich der ideale Solarstrahlungsertrag I_{Jahr} nach Gleichung 1 errechnen.

$$I_{Jahr} = E_{GL} \cdot f \qquad (1)$$

mit I_{Jahr} Idealer Solarstrahlungsertrag in [kWh/m²]
E_{GL} Jährliche Globalstrahlungssumme in [kWh/m²],
f Flächenfaktor in [%]

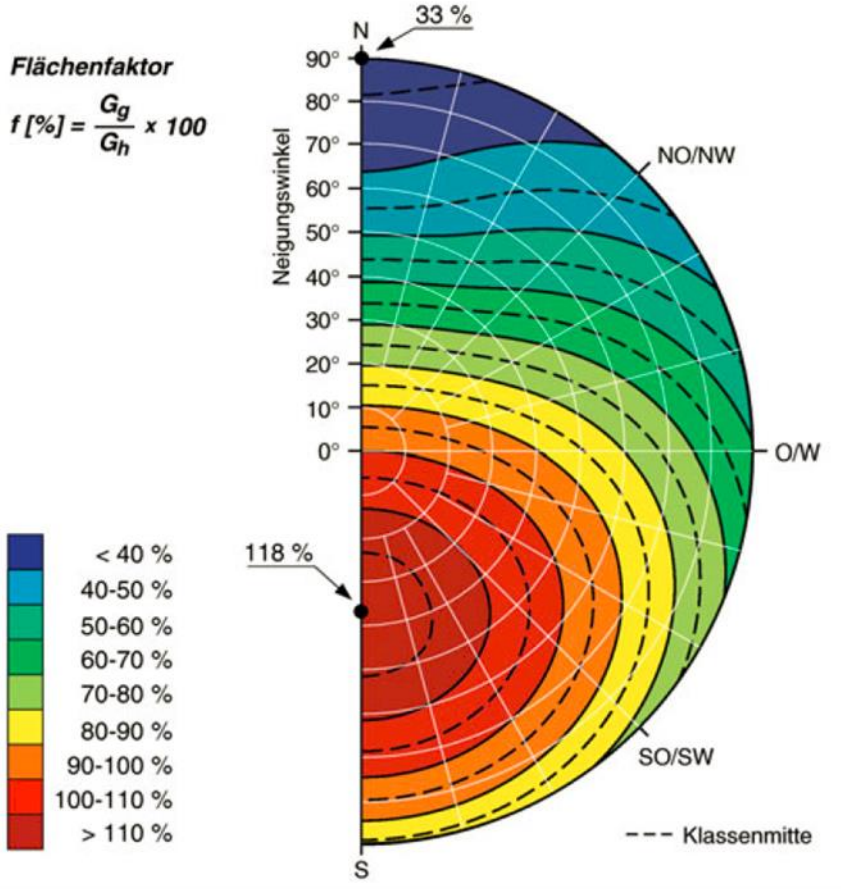


Abbildung 3.3.2-4: Flächenfaktor f zur Bestimmung der Globalstrahlung auf geneigte Flächen im Jahresmittel (Energieagentur NRW, 1997)

Nach Gleichung 1 und Abbildung 3.3.2-4 resultiert daraus ein jährlicher idealer Solarstrahlungsertrag bei einer durchschnittlichen jährlichen Globalstrahlungsjahressumme von 1088 kWh/m², einem Flächenfaktor von ca. 115% bei Süd-Ausrichtung der PV (Photovoltaik)-Anlage und 45° Neigung von ca. 1250 kWh/m².

Zur Abschätzung des PV-Anlagenstromertrages muss der Modulwirkungsgrad berücksichtigt werden. Dieser liegt bei monokristallinen Zellen zwischen 13-25%, bei polykristallinen Zellen zwischen 12-19% und bei amorphen Zellen maximal 11%.
Mit Hilfe der Modulherstellerangaben zur Nennleistung bei Standardtestbedingungen (*engl. Standard Test Conditions STC*), d.h. u.a. einer Umgebungstemperatur von 25°C, kann z.B. für einen angenommenen Wert für P_{STC} von 0,15 kW/m² pro 1kW/m² für monokristalline Zellen und dem idealen Solarstromertrag I_{Jahr} nach Gleichung 2(2) der ideale Solarstromertrag zu ca. 187 kWh/m² errechnet werden. Dies setzt voraus, dass keine Verschattung durch umliegende Gebäude, Sträucher, Bäume etc. auftritt. Erfahrungsgemäß kann dies in Fließgewässernähe nicht immer garantiert werden.

$$E_{th} = I_{Jahr} \cdot \frac{P_{STC}}{I_{STC}} \qquad (2)$$

mit E_{th} Idealer Solarstromertrag in [kWh]
P_{STC} Anlagennennleistung unter Standard-Testbedingungen in [kW/m²],
I_{Jahr} Idealer Solarstrahlungsertrag in [kWh/m²]
I_{STC} STC-Einstrahlung 1kW/m²,
f Flächenfaktor in [%]

Somit kann das Potential der Solarstrahlung als elektrische Energiequelle für eine Gewässergütemessstation in unmittelbarer Fließgewässernähe in der Gemeinde *Tholey* (vgl. Kapitel 4.1) abgeschätzt werden. Dabei ergibt sich eine ideale Energieausbeute von 187 kWh pro m² Kollektorfläche für die Solarstrahlung pro Jahr. Diese Energieausbeute kann eine Dauerlast von ca. 21W versorgen.

4. Umsetzung

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die praktische Umsetzung der Machbarkeitsstudie sowie die Ausstattung der Solarstation und daran vorgenommene Veränderungen gegeben

4.1 Energetische und steuerungstechnische Ausstattung der Solarstation und Systemerweiterung

Bei Inbetriebnahme der mobilen Solarstation musste in der ersten Erprobungsphase festgestellt werden, dass zwei wesentliche Komponenten nicht mehr funktionstüchtig waren.
Diese waren:
- das gasbetriebene Stromerzeugeraggregat (SEA)
- der PV-Laderegler

Die Startenergie des SEA wird dem Batteriesystem entnommen, der erzeugte Wechselstrom über den Wechselstrom-Eingang des Wechselrichters dem Wechselstrom-Verbrauchersystem bereitgestellt.
Aufgrund eines mechanischen Defektes des Verbrennungsmotors des SEA konnte dieses als konventionelle Energiequelle nicht weiter genutzt werden. Wegen der hohen Lärm- und Abgasemissionen sowie der Problematik der Brennstofflagerung wurde zugunsten des Umweltschutzes im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie auf eine Neuanschaffung verzichtet.
Der PV-Laderegler wurde wegen sporadisch aufgetretener Ausfälle ausgetauscht. Neuere Gerätegenerationen, wie der neu verbaute PV-Laderegler, bieten wegen eines als Maximum-Power-Point-Tracker (MPPT) bezeichneten Regelalgorithmus eine bessere Effizienz, indem sie fortwährend den besten Leistungspunkt der angeschlossenen PV-Module finden. Außerdem verfügt der neue verbaute Laderegler über 2 getrennte Eingänge für die PV-Module. Dies bietet bessere Vergleichsmöglichkeiten für zukünftige wissenschaftliche Fragestellungen.

Daneben mussten weitere Komponenten ausgetauscht werden:
- Speicherprogrammierbare Steuerung
- Saugpumpe

Die installierte Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) *Logo* konnte den neuen Anforderungen zur Systemsteuerung aufgrund ihrer begrenzten Anzahl von Steuersignalein- und -ausgangsklemmen nicht mehr gerecht werden und wurde durch eine SPS *S300* ersetzt.
Aufgrund der begrenzten Ansaugleistung der eingebauten Saugpumpe wurde diese durch eine Schmutzwassertauchdruckpumpe ersetzt. Zudem sind Druckpumpen betriebsstabiler, da bei Saugpumpensystemen bereits geringe Beschädigungen der Schläuche zum Versagen des Ansaugens aufgrund des nicht herstellbaren Unterdrucks führen.

Abbildung 4.1.-1 a zeigt die grundsätzliche Verschaltung der Hauptkomponenten in der ursprünglichen Konfiguration.

In der Energietechnik werden die elektrischen Stromarten
- Wechselstrom (AC: engl. Alternating Current = Wechselstrom) und
- Gleichstrom (DC: engl. *Direct Current* = *Gleichstrom*)

unterschieden.

Wechselstrom, welcher hier einphasig vorliegt, ist aus dem Haushaltsstrombereich bekannt. Die Nennspannung liegt bei ca. 240V. Während der in Kraftwerken durch rotierende Generatoren erzeugte Wechselstrom sinusförmig ist, hat der in elektronischen Wechselrichtern erzeugte STrom einen trapezförmigen Verlauf.

Mit dem Aufkommen der erneuerbaren Energien wurde eine Diskussion über die Verwendung von Gleichstromsystemen angestoßen. Dies liegt darin begründet, dass vor allem bei Photovoltaiksystemen Gleichstrom erzeugt wird und eine Umwandlung in Wechselstrom nur mit Energieverlusten behaftet ist. Auch die Speicherung von Energie kann nur in Form von Gleichstrom erfolgen. Jede Ein- und Ausspeicherung in Wechselstromsystemen ist daher immer mit Umwandlungsverlusten behaftet.

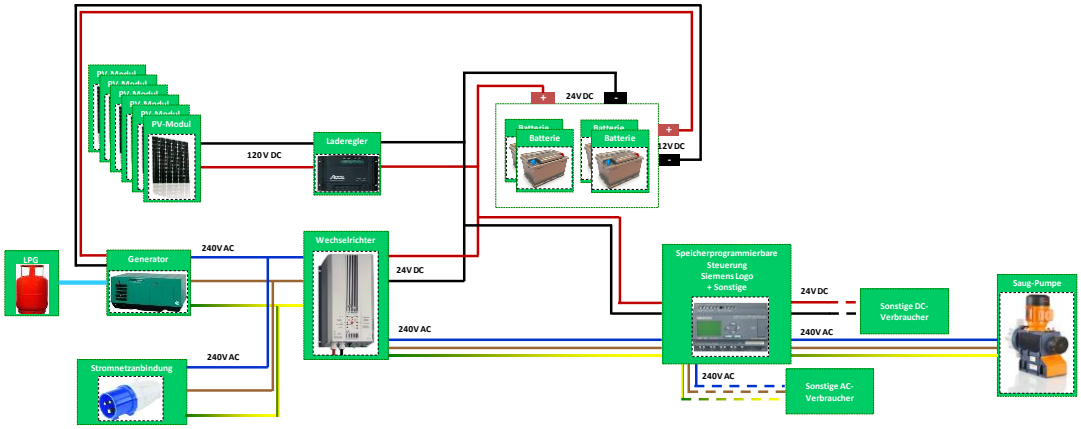
In der Solarstation sind die 6 PV-Module mit einer Gesamt-Peak-Leistung von 1050Wp an einen Laderegler angeschlossen, welcher die Batterien, den Starter des SEA, über die SPS das Gleichstrom- oder auch DC-Verbrauchersystem (DC: engl. *Direct Current* = *Gleichstrom*) und über den Wechselrichter das Einphasen-Wechselstrom- oder auch AC-Verbrauchersystem (AC: engl. *Alternating Current* = *Wechselstrom*) versorgt.
Der Gleichstromanschluss am Wechselrichter ist bidirektional, d.h. die Batterien können über diesen Anschluss über den Wechselstromeingang des Wechselrichters geladen und damit auch die Gleichstromverbraucher versorgt werden, in umgekehrter Richtung kann auch das Wechselstromnetz über die Batterien gespeist werden.
Das gasbetriebene SEA, zusammen mit dem Einphasen-Wechselstromanschluss für die externe Stromversorgung bildet den Wechselstromeingang am Wechselrichter.
Die SPS versorgt entsprechend dem programmierten Steuerungsalgorithmus alle Gleich- und Wechselstromverbraucher.
Als Hauptverbraucher ist die Wasserpumpe anzusehen, welche für die Probenahmen das Wasser aus dem Fließgewässer in den Probentopf ansaugt, in dem die Messungen erfolgen (vgl. auch Abbildung 4.1-1).

Das bestehende System wurde um die Funktionalität der automatischen Zuschaltung des Stromversorgungsnetzes, sofern es am Messstandort vorhanden und an den Anhänger angeschlossen ist, erweitert.

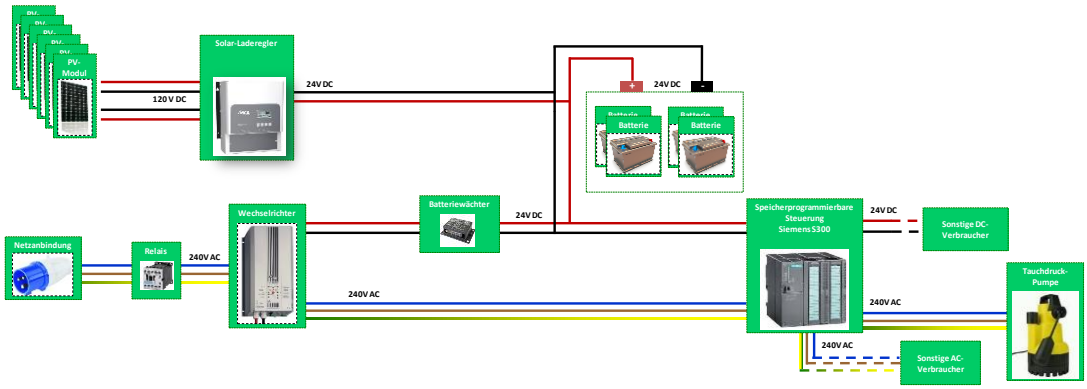
Hierfür wurden
- ein Batteriewächter und
- ein Wechselstrom-Trennrelais

eingebaut (siehe Abbildung 4.3-1 b).

Der Batteriewächter überwacht die Batteriespannung und gibt bei Unterschreiten eines Schwellwertes ein Schaltsignal an die SPS. Diese schaltet das Stromversorgungsnetz bei Bedarf über das Trennrelais zwischen Anschluss und Wechselrichter für einen gewissen Zeitraum zur Energieversorgung zu.



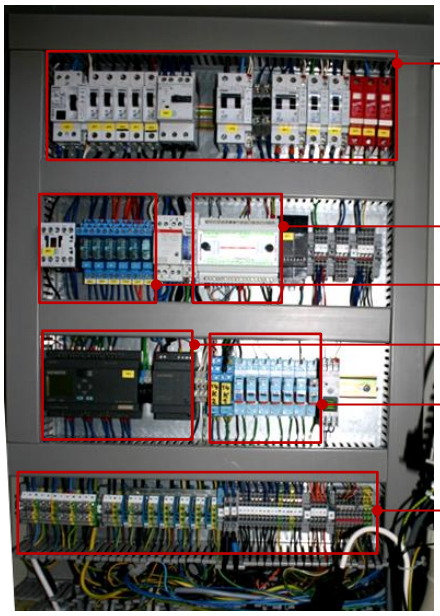
a) Ursprüngliche Systemkonfiguration



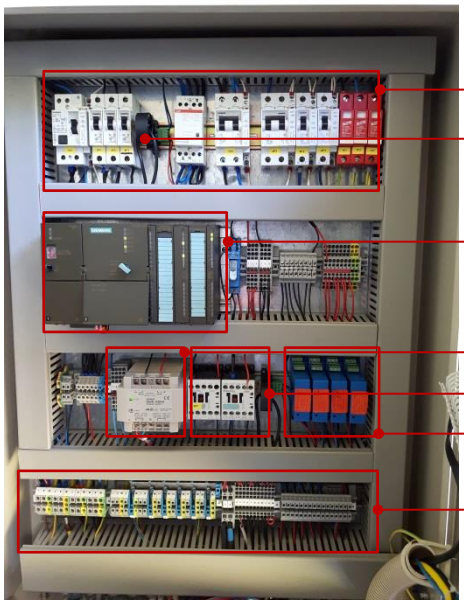
b) Neue Systemkonfiguration

Abbildung 4.1-1: Ursprüngliche und neue Systemkonfiguration nach Hardwareumbau

Nicht nur die genannten elektrischen Komponenten wurden ausgetauscht bzw. zusätzlich eingebaut, auch der elektrische Schaltschrank musste aufgrund sporadischer Kurzschlüsse neu verkabelt werden.
Viele der verbauten Bauteile wurden mit dem Einsatz der neuen SPS *S300* nicht mehr benötigt. Beispielsweise wurde die Funktion der Zeitschaltuhren für den Pumpenbetrieb komplett im Steuerungsalgorithmus der SPS programmiert. Der so freiwerdende Platz konnte u.a. für die elektrische Messtechnik genutzt werden. Abbildung 4.1-2 zeigt den Aufbau des Schaltschranks nach alter und neuer Konfiguration.



a) Schaltschrank nach alter Konfiguration



b) Schaltschrank nach neuer Konfiguration

Abbildung 4.1-2 Umbau des Schaltschranks

4.2 Auswahl der Messsonden für die Solarstation

Die stoffliche Belastung, die von einem Mischwasserabschlag in ein Gewässer ausgeht, kann je nach Ereignis sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Sie hängt von der anfallenden Regen- bzw. auch Schmelzwassermenge sowie dem im Kanal vorhandenen Volumen an ungeklärtem Abwasser und dessen Zusammensetzung ab. Grundsätzlich enthält ungeklärtes Abwasser eine Vielzahl von unterschiedlichen Substanzen. Für die meisten dieser Substanzen existieren allerdings keine Online-Analysenmethoden. Online gut zu erfassen sind hingegen die für häusliches Abwasser typischen Parameter Ammonium, TOC[1] (Gesamter organischer Kohlenstoff, engl. *total organic carbon*) und Phosphor (vor allem in Form von gelöstem ortho-Phosphat). Da eine verlässliche Messung von ortho-Phosphat und Kohlenstoff im online-Betrieb nur mit Hilfe energieintensiver Verfahren wie Photometer-Analysatoren zu realisieren ist (vgl. Kapitel 5.2), konnten diese Parameter im Rahmen der Machbarkeitsstudie nicht berücksichtigt werden. Daher wurden die Ammonium-Gehalte als Indikator für Abschläge herangezogen.
Darüber hinaus wurden die elektro-chemischen Parameter Temperatur, Sauerstoff und Leitfähigkeit ermittelt. Während sich die Temperaturen von kommunalem Mischwasser in der Regel kaum von den Werten im Gewässer unterscheiden, können Veränderungen der Leitfähigkeitswerte Hinweise auf derartige Einleitungen geben. Die Leitfähigkeit ist ein Maß für die im Wasser vorhandenen Salze. Da Regenwasser kaum Salze enthält, haben Einleitungen aus Mischwasserentlastungen oft eine sehr viel geringere Leitfähigkeit als Flusswasser bzw. reines Abwasser. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass auch Regen, welcher auf natürlichem Weg ins Gewässer gelangt, eine Verdünnung der Salzgehalte bedingt. Im Gegensatz dazu kann im Winter bei Einträgen durch Schneeschmelze die Leitfähigkeit im Mischwasser auf Grund der von Verkehrsflächen eingetragenen Streusalze deutlich erhöht sein.
Je nach Zusammensetzung des Mischwassers können Einträge aus Entlastungsanlagen zudem zu teilweise starken und lang andauernden Sauerstoff-Defiziten im Gewässer führen. Da die Nitrat-Gehalte in häuslichem Abwasser sowie im Niederschlagswasser sehr gering sind, kann auch ein Rückgang von Nitrat im Gewässer auf derartige Abschlagsereignisse hindeuten.

Auf Grund der zu erwartenden geringen Energieausbeute kamen für die Messungen in der Solarstation ausschließlich Messsonden infrage. Diese Sonden werden direkt im Probenmedium eingesetzt und arbeiten in der Regel reagenzienfrei. Sie haben eine sehr geringe Stromabnahme, da keine zusätzliche Energie für einen internen Probentransport, für die Kühlung und das Ein- und Ausleiten von Reagenzien oder auch die Temperierung der Messumgebung benötigt wird. Sonden erheben die Messwerte kontinuierlich und ohne Zeitverzögerung.
Folgende Parameter wurden mittels Sonden gemessen:

- Sauerstoff (optisches Verfahren: Lumineszenzstrahlung),
- Leitfähigkeit (induktiv) und Wassertemperatur,
- Trübung (optisches Verfahren) sowie
- Ammonium und Nitrat mit Hilfe einer ionensensitiven Sonde

Da die Temperatur grundsätzlich einen Einfluss auf ionensensitive Messungen haben, wird auch dieser Parameter in einer derartigen Sonde mit erfasst und kompensiert. Im Speziellen wirken sich Kalium-Ionen sowie der pH-Wert störend auf die Messung von Ammonium aus und Chlorid-Ionen beeinträchtigen die

[1] TOC wird oftmals als SAK-Äquivalent (SAK: Spektraler Absorptionskoeffizient) ermittelt. Dazu muss allerdings zunächst ein genauer Faktor zur Umrechnung vom mittels optischer Sonde sehr leicht zu erfassenden SAK-Werten zum TOC ermittelt werden.

Messung von Nitrat, weshalb diese drei Störioneneinflüsse ebenfalls simultan ermittelt und rechnerisch direkt in der Sonde kompensiert werden (Kompetenzzentrum Wasser 2009).
Die Sonden wurden einmal in der Woche gereinigt und kalibriert, zudem wurden Vergleichsproben entnommen und deren Ergebnisse mit den entsprechenden Werten der Messsonden verglichen.
Ein Schema der Solarstation mit der beschriebenen Messausstattung ist in Abbildung 4.4-1 dargestellt, eine detaillierte Übersicht über die eingesetzten Sonden, Messverfahren und Messbereiche findet sich in Tabelle 11-1 im Anhang.

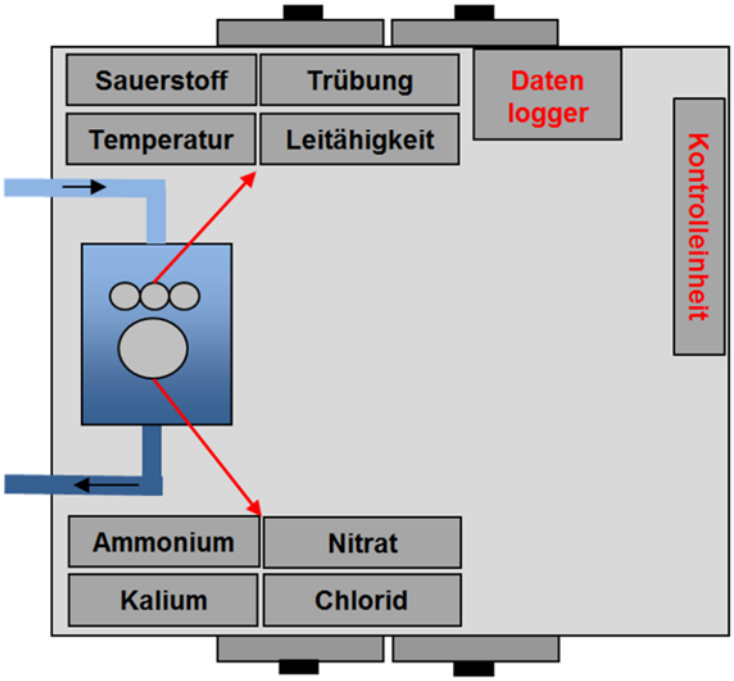


Abbildung 4.2-1: Schematische Darstellung der Solarstation

Die Sonden benötigen nach dem Einschalten eine gewisse Zeit, um einsatzfähig zu sein. Daher musste von einem Einschalten der Sonden bei einem Ereignis - analog zur Pumpe - abgesehen werden. Auch dürfen die meisten Sonden im Betriebszustand nicht trockenfallen, weswegen sichergestellt werden musste, dass auch in Phasen ohne Pumpenbetrieb bis zum nächsten Pump-Zyklus genügend Wasser im Probentopf verblieb. Dank der entsprechenden Steuerung konnte dies gewährleistet werden (vgl. Kapitel 4.3).

4.3 Umsetzung des Batch-Betriebes und Pumpensteuerung

Grundsätzlich steht bei einer autarken Versorgung nicht genügend Energie für den Dauerbetrieb einer Pumpe zu Verfügung. Daher musste der Pumpenbetrieb diskontinuierlich, im sog. Batch-Verfahren, erfolgen.
Da das Ziel der Studie war, den Einfluss von Abschlägen einer Mischwasserentlastung auf ein Fließgewässer zu überprüfen, sollte das Signal, die Pumpe einzuschalten, mit einem Abschlagsereignis gekoppelt werden. Es musste also ein Signal generiert werden, welches im Kanal bzw. am Auslass des zu überwachenden Bauwerkes ein Ereignis detektieren kann und im Fall eines Abschlages die Pumpe ansteuert.

Zu diesem Zweck kam ein Ultraschall-Sensor zum Einsatz. Das Messprinzip beruht auf der Laufzeitverschiebung der reflektierten Ultraschallwellen am Kanalboden bzw. der Abwasseroberfläche im Falle eines Abschlags. Über eine Kalibrierung ist eine Bestimmung der Abwasserhöhe über dem Kanalboden möglich. Vorteilhaft für diesen berührungsfreien Sensortyp ist, dass die Messwerte nicht durch im Abwasser enthaltene größere Schmutzpartikel (z.B. Papier) verfälscht werden. Das Signal dieses Sensors dient als Eingangssignal für die SPS, welche entsprechend dem Signalwert die Pumpe ansteuert. Um leichte Messwertschwankungen auszugleichen, wurde der Eingangsschaltsignalpegel der Abwasserstandshöhe im Kanal bzw. am Kanalaustritt über einem Zeitintervall von 5 Sekunden gemittelt und auf einen Schwellwert größer als 10 cm festgesetzt. Unterhalb dieses Wasserstandes wird die Pumpe ausgeschaltet und oberhalb eingeschaltet.
Abbildung 4.3-1 zeigt das Teilsystem der Probenahme mit der Pumpensteuerung. Neben dem Ultraschallsensor dienen im Wesentlichen zwei Grenzwertschalter für den Füllstand im Probentopf, unterer (minimaler) und oberer (maximaler) Wasserstand, als Sensor. So wird neben der Pumpe als weiterer Aktor das Auslassventil am Probentopfboden gesteuert: Bei maximalem Wasserstand und nach einer gewissen Messdauer wird dieses geöffnet und bei Erreichen des minimalen Wasserstandes geschlossen.

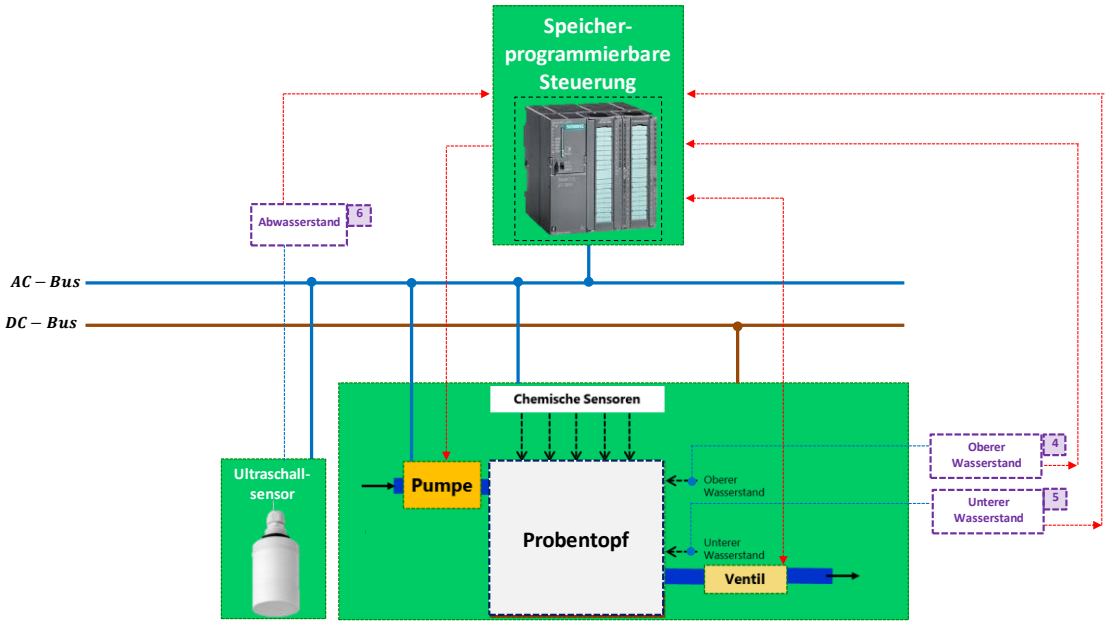


Abbildung 4.3-1: Teilsystem Probennahme - Sensoren, Aktoren, SPS

Bei der Umsetzung des Batch-Betriebes der Pumpe und des Ventiles im Probentopf wurden drei Steuerungsmodule entwickelt, wovon allerdings nur das Grundmodul im Rahmen der Projektlaufzeit umgesetzt wurde:

1. Grundmodul (Pumpe)
2. Erweiterungsmodul 1 (Heizung)
3. Erweiterungsmodul 2 (Energieverfügbarkeit)

In Abbildung 4.3-2 werden die genannten Steuerungsmodule zusammenhängend in einem Flussdiagramm dargestellt.

Das Grundmodul beinhaltet den im Wesentlichen oben angeführten Steuerungsalgorithmus. Bei Überschreiten des festgesetzten Abwasserstandes, welcher vom Ultraschallsensor detektiert wird, und einem Wasserstandslevel im Probenbehälter unterhalb des oberen Grenzwertschalters wird die Pumpe angeschaltet. Wenn der obere Wasserstand im Probenbehälter erreicht ist, wird die Pumpe wieder ausgeschaltet und das Auslassventil geöffnet, woraufhin sich der Probenbehälter wieder entleert, bis der untere Wasserstand unterschritten wird. Danach schließt das Auslassventil und der Steuerkreis wird geschlossen.
Das Erweiterungsmodul 1, dessen Umsetzung jedoch innerhalb der Projektlaufzeit nicht erfolgen konnte, ergänzt das Grundmodul um die Steuerung eines Heizers für den Probentopf und die Schlauchverbindung, um ein Einfrieren in der Winterperiode zu verhindern (vgl. Kapitel 5.5). Der Algorithmus ist dem Grundmodul vorangeschaltet, da ein sicherer Pumpenbetrieb nur im aufgetauten Zustand möglich ist. Zu installierende Wassertemperatursensoren messen die Temperaturen in den Schläuchen und dem Probentopf und erwärmen diese, bis die Frostgrenztemperatur von 0°C überschritten wird.

Das ebenfalls noch zu implementierende Erweiterungsmodul 2 ergänzt das Grund- und Erweiterungsmodul 1 um die Einbeziehung der Information über die Energieverfügbarkeit, damit sowohl der Pumpenbetrieb als auch die Heizfunktionalität ermöglicht werden kann.

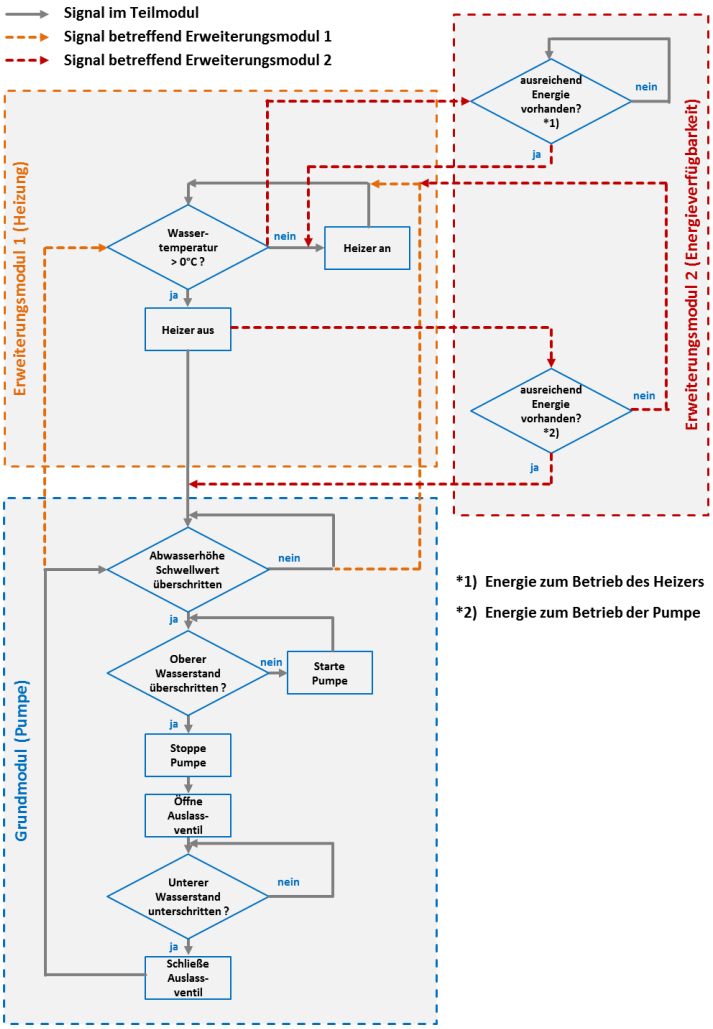


Abbildung 4.3-2: SPS Steuerungsalgorithmus - Grundmodul und Erweiterungsmodule

Die Umsetzung des Grundmoduls in Funktionsblöcke zeigt Abbildung 4.3-3. Funktionsblöcke stellen eine Programmiersprache von Steuerungsalgorithmen nach der internationalen Norm IEC 61131 dar. Hierbei entstanden zwei Netzwerke:

- Netzwerk 1: Start der Pumpe bei einem Abschlagsereignis und Wasserstand im Probentopf zwischen dem unteren und oberen Wasserstandsgrenzschalter
- Netzwerk 2: Öffnen des Auslassventils bei Erreichen des oberen Wasserstandsgrenzschalters und Schließen bei Erreichen des unteren Wasserstandsgrenzschalters

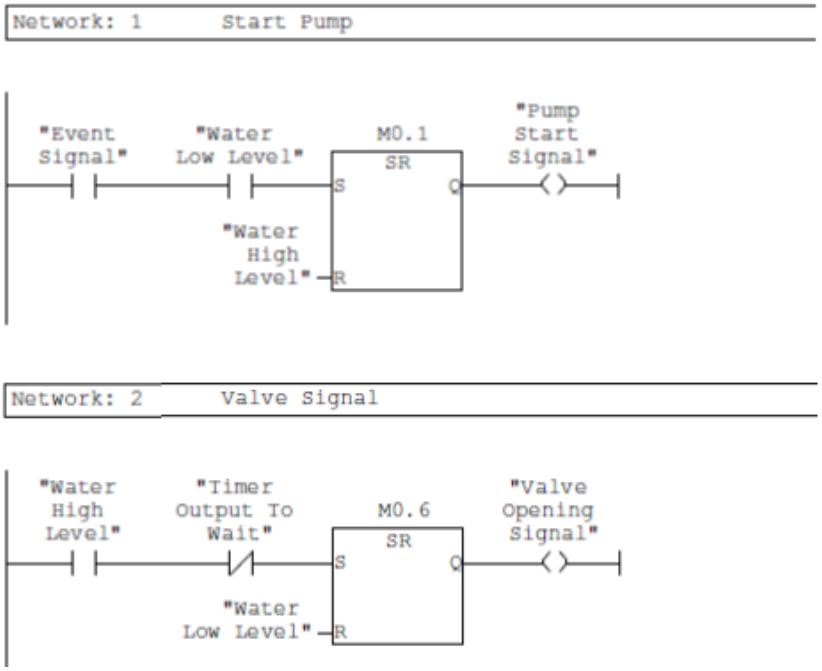


Abbildung 4.3-3: Umsetzung des Grundmoduls in Funktionsblöcke zur Implementierung in die SPS

4.4 Generierung von Zusatzinformationen

Neben dem im Kapitel 4.1 beschriebenen Austausch einiger wesentlicher Systemkomponenten und dem Umbau des Schaltschranks wurde das System um weitere Sensoren ergänzt. Während im folgenden Kapitel schwerpunktmäßig auf die energetische Messdatenerfassung eingegangen wird, sollen an dieser Stelle die Sensoren zum Zweck der Unterstützung der chemischen Messdatenauswertung und der Prozesssteuerung behandelt werden.

Folgende beiden Signale wurden generiert:

- Abwasserstandshöhe / -grenzwertschaltsignal
- Pumpensignal (vgl. auch Kapitel 4.3)

Die Information über den Betrieb der Pumpe ist für die Ermittlung des Auswertezeitraums der chemischen Gewässeranalyse wichtig. In der ursprünglichen Systemkonfiguration war ein kontinuierlicher bzw. intermittierender Pumpenbetrieb vorgesehen und eine Information über den Pumpenbetrieb stand daher nicht zur Verfügung. Es musste daher anhand der Veränderung der chemischen Messdaten auf ein Abschlagsereignis geschlossen werden. Dies hatte zur Folge, dass eine subjektive Einschätzung auf den Zeitraum getroffen werden musste. Mit der neuen Information erfolgt eine Verbesserung der chemischen Gewässerprobenanalyse hin zu mehr Objektivität.

4.5 Messdatenerfassung des elektrischen Messsystems

Zur Beurteilung des energetischen Teilsystems ist es notwendig, die unterschiedlichen elektrischen Hauptleistungen im System zeitlich zu erfassen und zu speichern. Da das ursprüngliche System über keinerlei Möglichkeit verfügte, diese Art von Daten zu erfassen, wurden innerhalb dieser Studie entsprechende Sensoren, Datenerfassungs-, Datenauswertungs- und Datenfernübertragungs-hardware installiert.

Der Betrieb des Gesamtsystems erfolgt wegen der überwiegend mit Wechselspannung versorgten Geräte mit Einphasen-Wechselstrom.

Zur Erfassung der Energieströme wurden verschiedene Sensoren nachgerüstet, welche sich in drei Typen charakterisieren lassen:

- Elektrische Spannungssensoren
- Elektrische Stromsensoren
- Sonstige elektrische Signale

Nachfolgende Tabelle 4.5-1 listet die installierten Sensoren mit der Angabe von Messpunkt und Messgröße auf. Zur Veranschaulichung des Messpunktes innerhalb des Gesamtsystems sind die Sensoren in Abbildung 4.5-1 dargestellt.

Tabelle 4.5-1: Installierte elektrische Sensoren zur Spannungs-, Strommessung und sonstige Signale

Nummer	Bezeichnung	Beschreibung (Messpunkt, Messgröße)
Spannungsmessung		
1	Batteriespannung	Batteriespannung (DC) an den Batteriepolen
2	Wechselrichterspannung	Spannung (AC) am Wechselrichterausgang
Strommessung		
1	Netzbezugsstrom	Strom (AC) am Wechselrichtereingang versorgungsnetzanschlussseitig
2	PV-Erzeugungsstrom	Strom (DC) der PV-Anlage am Ladereglerausgang
3	AC-/DC-Umwandlungsstrom	Strom (DC) am DC-Anschluss des Wechselrichters, lädt Batterie im Netzbetrieb und versorgt AC-Verbraucher durch Batterieentladung im Inselbetrieb
4	Batteriestrom	Strom (DC) beim Laden bzw. Entladen der Batterie
5	AC-Verbraucherstrom	Strom (AC) zur Versorgung der Wechselstromverbraucher
Sonstige Signale		
1	Globale Solareinstrahlung	Sonneneinstrahlung in der Horizontalen durch Pyranometer oberhalb der Module
2	Solareinstrahlung in Modulebene	Sonneneinstrahlung in der Neigungseben der PV-Module durch Pyranometer auf Modulhöhe
3	Pumpensignal	Spannungssignal (AC) beim Pumpbetrieb der Schmutzwassertauchpumpe
4	Oberer Wasserstand im Probenbehälter	Spannungssignal (DC) des oberen Wasserstandsgrenzschalters im Probenbehälter
5	Unterer Wasserstand im Probenbehälter	Spannungssignal (DC) des unteren Wasserstandsgrenzschalters im Probenbehälter
6	Abwasserstand /Grenzwertschaltsignal	Spannungssignal (DC) des Wasserstandssensors am Abwasseraustrittskanal zum Fließgewässer, zusätzlich binäres Schaltsignal bei Überschreiten eines einstellbaren Grenzwertes

Die Berechnung der Leistung allgemein erfolgt über das Produkt aus Spannung U und Stromstärke I nach Gleichung 3(3).

$$P_x = U_y \cdot I_z \tag{3}$$

mit P_x elektrische Leistung x in [W],
U_y elektrische Spannung am Messpunkt y in [V],
I_z elektrische Stromstärke am Messpunkt z in [A]

Mit den in Abbildung 4.5-1 und Tabelle 4.5-1 dargestellten Sensoren zur elektrischen Spannungs- und Strommessung lassen sich die in Tabelle 4.5-2 und ebenfalls in Abbildung 4.5-1 gezeigten Hauptenergieflüsse mit Gleichung 3(3) berechnen.

Tabelle 4.5-2: Hauptenergieflüsse im System mit zugehörigen elektrischen Messgrößen

Leistungsbezeichnung	**Beschreibung**	**Messgröße / Messpunkt**
P_{PV}	Elektrische Leistung, die von der PV-Anlage in das System eingebracht wird	Gleichspannung / 1: Batterie Gleichstrom / 2: hinter Solarladeregler
P_{Batt}	Elektrische Leistung von und zum Batteriespeichersystem	Gleichspannung / 1: Batterie Gleichstrom / 6: Batterie
P_{Netz}	Elektrische Leistung vom externen Wechselstromversorgungsnetz	Wechselspannung / 2: Wechselrichter AC-Eingang Wechselstrom / 1: Wechselrichter AC-Eingang
$P_{AC/DC}$	Elektrische Leistung, die vom Wechselrichter von Wechsel- (AC) in Gleichstrom (DC) umgewandelt wird und umgekehrt	Gleichspannung / 1: Batterie Gleichstrom / 3: Wechselrichter DC-Ein-/Ausgang
$P_{DC-Verbraucher}$	Elektrische Leistung, die von den Gleichstromverbrauchern aufgenommen wird, sie ist im Verhältnis zu den AC-Verbrauchern vernachlässigbar	vernachlässigbar, Berechnung aus übrigen Hauptenergieflüssen
$P_{AC-Verbraucher}$	Elektrische Leistung, die von den Wechselstromverbrauchern aufgenommen wird	Wechselspannung / 2: Wechselrichter AC-Eingang Wechselstrom / 5: Wechselrichter AC-Ausgang Wechselrichter

Wie in Abbildung 4.5-1 gezeigt, werden die gemessenen Werte in einem DAQ-Sender (DAQ: engl. *Data Aquisition = Datenerfassung*) temporär gespeichert und mittels GSM-Fernwirktechnik an die Empfangseinheit im Institut gesendet.

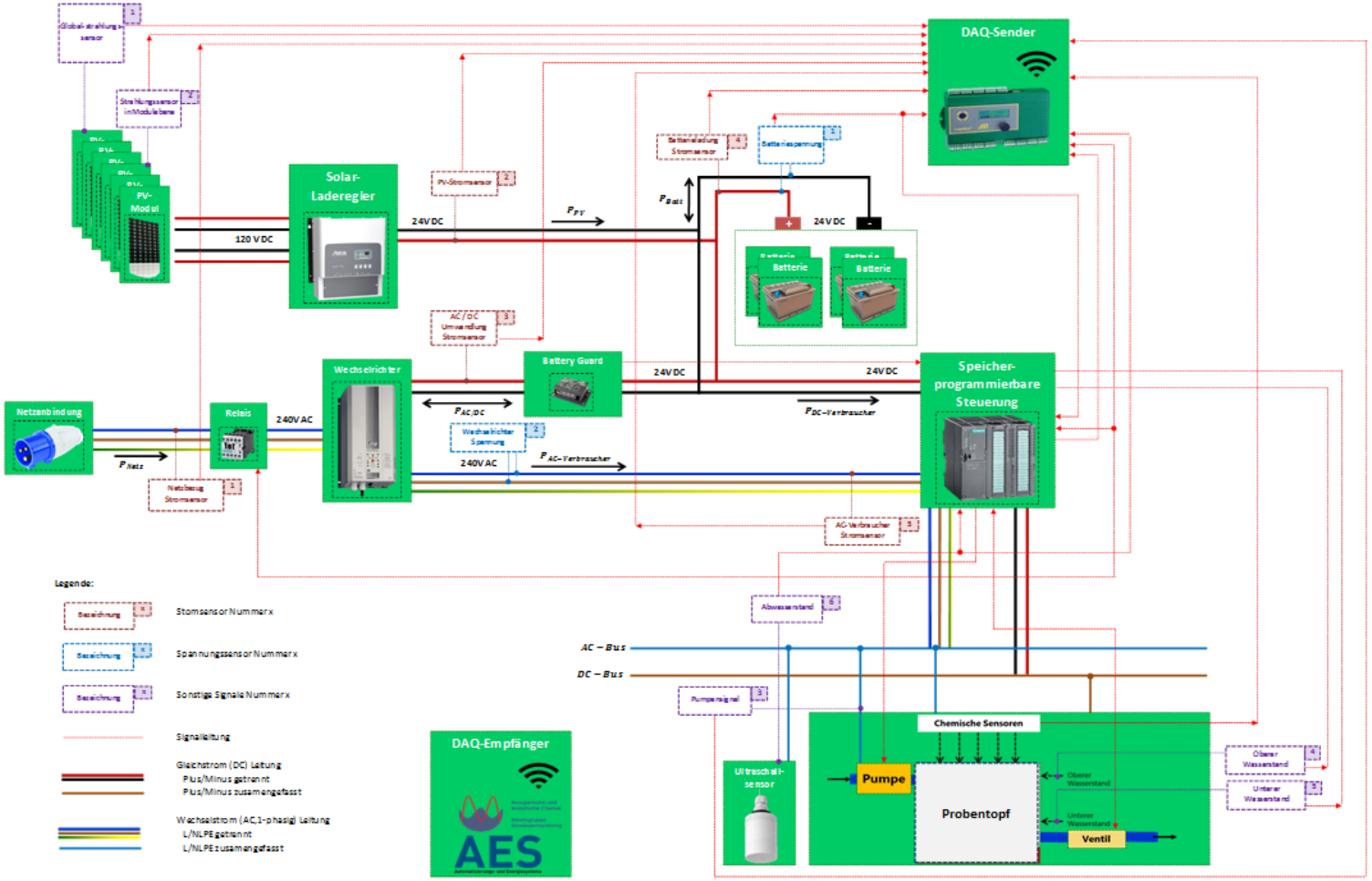


Abbildung 4.5-1: Messdatenerfassung und Steuersignale in der neuen Systemkonfiguration nach Hardwareumbau

4.6 Entwicklung eines Messdatenverwaltungs- und Kommunikationssystems

Gerade in mobilen Systemen, die Messwerte erfassen und autonom arbeiten sollen, ist eine zuverlässige Messdatenerfassung von großer Bedeutung. Dabei sollte die Technik der Messdatenspeicherung und -fernübertragung auf einem aktuellen Stand sein. Denn gerade mit dem Einzug des Mobiltelefons in unser Alltagsleben haben sich kabellose Datenfernübertragungsstandards schnell fortentwickelt und etabliert.
Das im Folgenden vorgestellte System konnte bis Projektende nicht vollständig umgesetzt werden. Einzelne Module wurden jedoch am Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme schon im Rahmen anderer Projekte erprobt.
Das System beinhaltet einerseits die Messdatenverwaltung, welche aus folgenden Komponenten besteht:

- Messdatenerfassung
- Messdatenaufbereitung
- Messdatenspeicherung

Des Weiteren wird ein Kommunikationssystem verwendet, welches die lokal gespeicherten Messdaten mittels Fernübertragungstechnik aus dem Bereich der Mobilfunktechnik zum Institut übermittelt.
Gängige Mobilfunkstandards sind heute:

- UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) (3G, 3. Generation des Mobilfunks) Übertragungsraten: Download: 384 Kbit/s; Upload: 384 Kbit/s
- HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) (3.5G): Übertragungsraten: Download: 7,2 Mbit/s; Upload: 1,4 Mbit/s
- LTE (*Long Term Evolution*) (4G): Übertragungsraten: Download: 100 Mbit/s; Upload: 75 Mbit/s

Die angegebenen Übertragungsraten werden in der Realität jedoch wegen lokal unterschiedlicher Netzabdeckung selten erreicht.
In der Vergangenheit wurde GSM (*Global System for Mobile Communications*) auch als 2G (*2. Generation des Mobilfunks*) mit Übertragungsraten in beiden Richtungen vom 14,4kbit/s verwendet.

Das vorgestellte System zur Messdatenerfassung und -verwaltung soll kompakt und mobil gestaltet sein. Deshalb werden die Komponenten kompakt in einem Gehäuse verbaut. Darin sind folgende Hauptbauteile enthalten:

Programmierbarer Feldbuscontroller mit integrierter SPS und mit Messklemmen und Messumformer: Diese Einheit ist modular erweiterbar und kann damit sich verändernden Ansprüchen hinsichtlich der Anzahl und Art der Messwerteerfassung angepasst werden. Sie dient als Messdatenserver, der diese auf Anfrage den Clients zur Verfügung stellt. Zudem können auch Aktoren durch die integrierte SPS angesteuert werden.

Sensoren:
Im Bereich der Energietechnik sind dies Messwandler für den Gleich- und Wechselstrom als auch für die elektrische Spannung. Prinzipiell können auch alle Sensoren verwendet werden, welche im Bereich der Messtechnik ein sogenanntes Normsignal, z.B. 0-20mA, 4-20mA oder 0-10V über den entsprechenden Messbereich zur Verfügung stellen.

Embedded Controller mit Datenbank und der Nutzung von bidirektionaler Fernwirktechnik:
Dieser dient als Client, welcher die Messdaten in einem bestimmten Intervall beim Server abfragt und in einer Datenbank speichert. Mittels der oben aufgeführten Mobilfunkübertragungsstandards sollen die Daten zwischen der lokalen Datenbank in der Solarstation und dem Duplikat im Institut synchronisiert werden.

Im Institut befindet sich die Gegenstelle der Fernwirktechnik, in der das Datenbankduplikat und evtl. Online-Datenanalyse und -auswertungen stattfinden. Abbildung 4.6-1 zeigt den prinzipiellen Aufbau des beschriebenen Konzeptes.

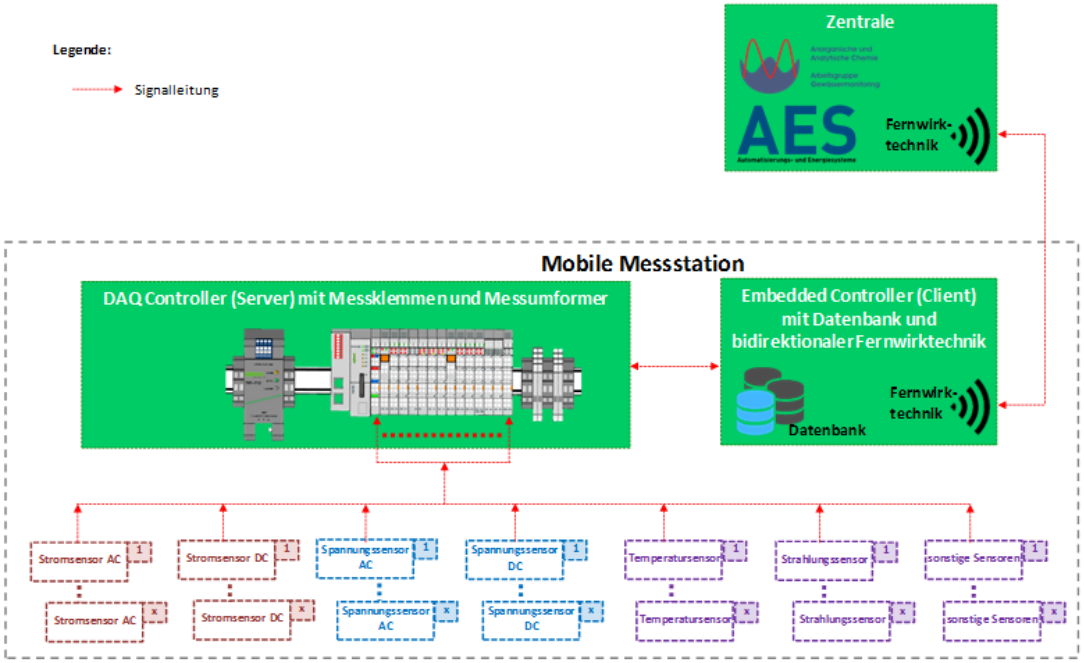


Abbildung 4.6-1: Konzept des Messdatenverwaltungssystems mit Fernwirktechnik

Zu Projektende konnte das Konzept nicht gänzlich umgesetzt werden. Abbildung 4.6-2 zeigt einen Teilaufbau des vorgestellten Prototyps.
Viele Teilmodule wurden jedoch bereits schon in anderen Projekten des Lehrstuhls für Automatisierungs- und Energiesysteme umgesetzt. Beispielhaft sei hier die Messdatenerfassung eines Heizsystems mittels einer Kombination von einem Embedded Controller mit Datenbank und einem Feldbuscontroller genannt. Die erfassten Messwerte werden ebenfalls online von der lokalen Datenbank im Embedded Controller in die Datenbank des Lehrstuhls übertragen und dort visualisiert.

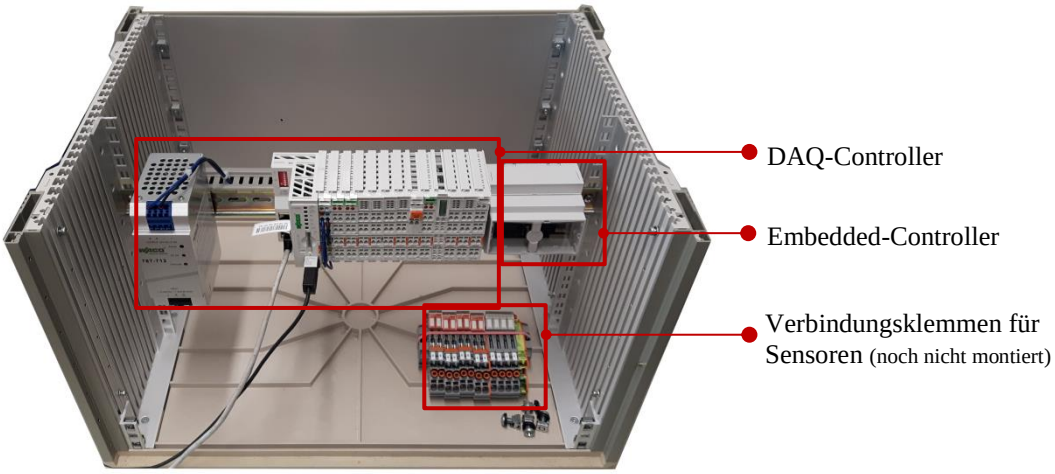


Abbildung 4.6-2 Prototyp des Mess- uns Kommunikationssystems

Zur Speicherung und Verwaltung der Datenmengen eignen sich Datenbanksysteme.
In Datenbanksystemen wird strikt zwischen Datenbestand, bzw. Datenbank und Datenbankmanagementsystem, durch das bspw. Abfragen erfolgen, unterschieden.
Eingesetzt wurde ein auf dem Modell relationaler Datenbanken basierendes Datenbanksystem. Die mathematische Grundlage dieses Modells ist die Relation. Sie stellt die mathematische Beschreibung der Datentabellen und die Beziehung zwischen diesen her. Der Datenbestand ist also eine Sammlung von Tabellen, in denen Datensätze abgespeichert werden, und die in Beziehung zueinander stehen.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde eine Datenbank mit einem für das Messsystem vorteilhaften Datenbankschema (Datenbankstruktur) erstellt.

Charakteristisch für die Gewässergütemessstationen der AG Gewässermonitoring sind sowohl
- mehrere unterschiedliche Messstationen (*station*) als auch
- wechselnde Standorte (*location*).

Zudem erfolgt die Erfassung der Messwerte (*measurement_data*) innerhalb der unterschiedlichen Stationen:
- an unterschiedlichen Messpunkten (*measurement_point*)
- mit unterschiedlichen Messgrößen (*measurement_type*)

Abbildung 4.6-3 zeigt das Objektbeziehungs- (engl. *Enhanced-Entity-Relationship, EER*) -modell mit Hilfe der aus oben angestellten Überlegungen umgesetzten Datenbankstruktur. Das EER liefert eine grafische Beschreibung der darin verwendeten Elemente, wobei deren Bedeutung und ihre Struktur dargestellt werden. Im dargestellten EER ist z.B. zu erkennen, dass die Tabelle *station* über das Attribut *STATION_ID* mit der Tabelle *measurement_point* in Relation steht.
Umgesetzt wurde das Datenbanksystem in der frei verfügbaren und weltweit meist verbreiteten relationalen Datenbanksprache *MySQL*.

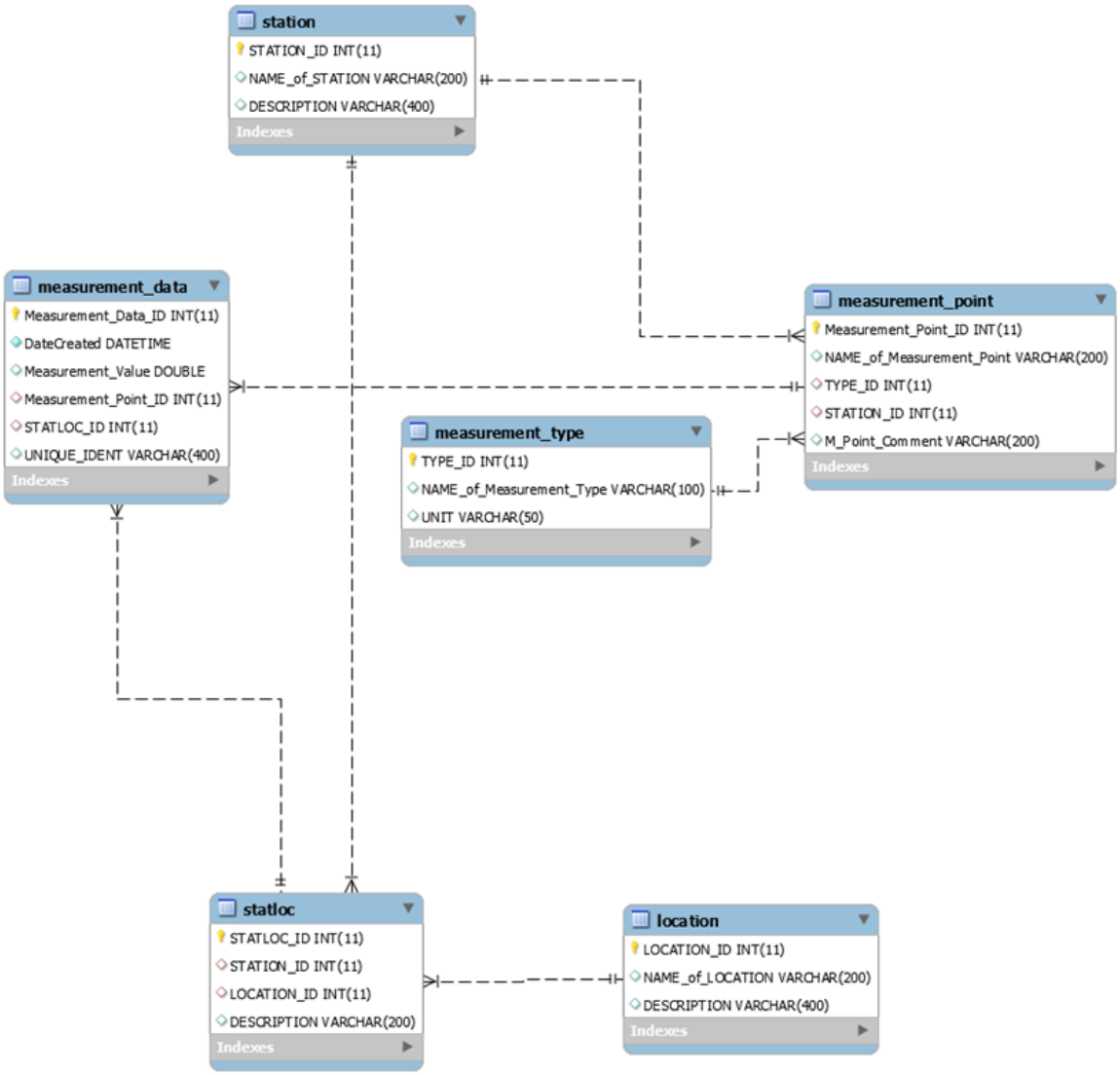


Abbildung 4.6-3: Enhanced Entity Relationship - Modell der entwickelten Datenbank zur Messdatenspeicherung

Zur detaillierten Veranschaulichung der Datenbankinhalte werden in Abbildung 4.6-4 beispielhaft einige Datensätze des Energiemesssystems gezeigt.

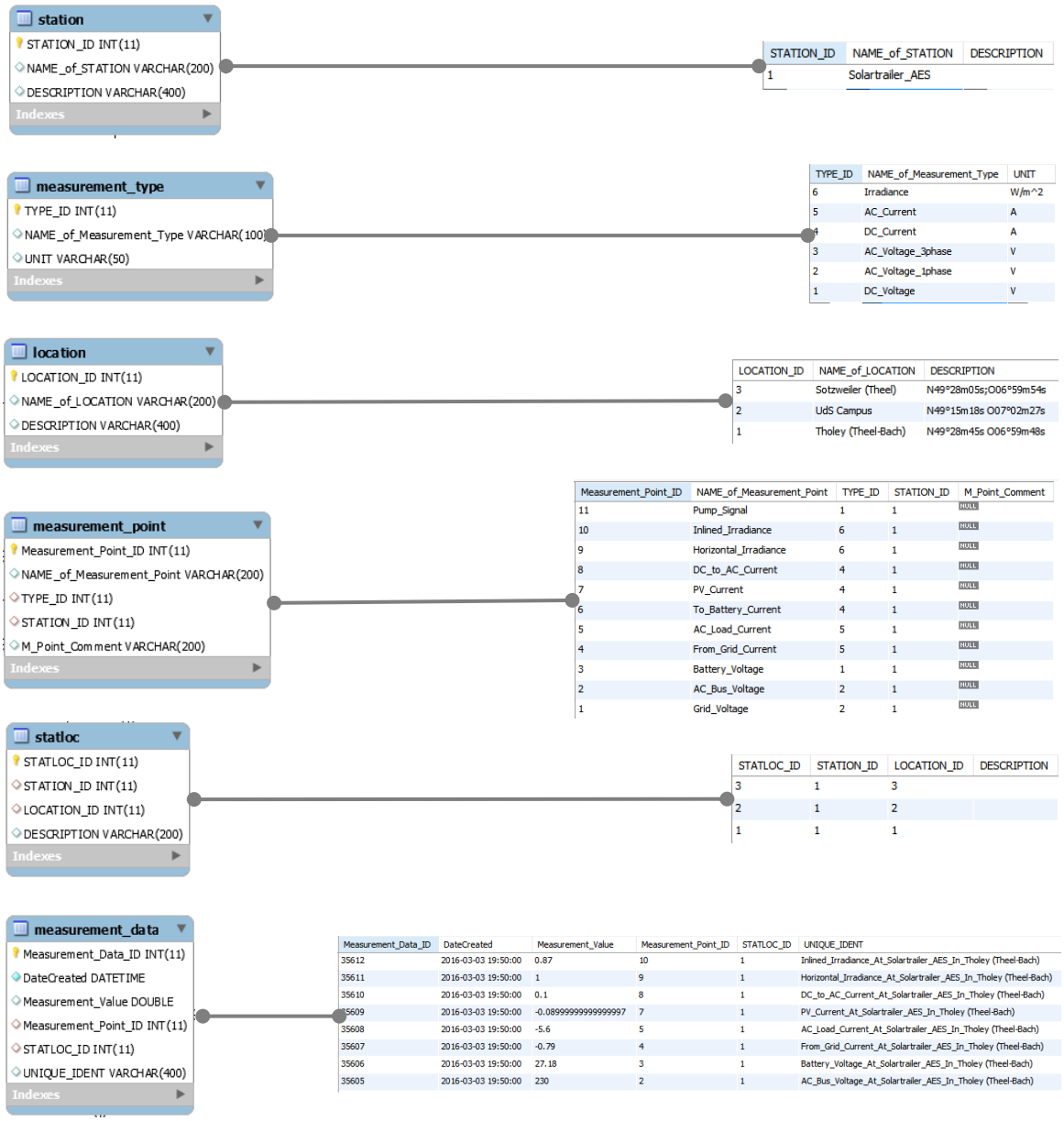


Abbildung 4.6-4: Inhalt der einzelnen Datenbanktabellen am Beispiel der Messwerte des Energiesystems

4.7 Standortauswahl

Da die Machbarkeitsstudie durch den Zweckverband Natura Ill-Theel gefördert wurde, sollten die Messungen am Auslauf eines Regenüberlaufbauwerkes oder eines Stauraumkanals im Einzugsgebiet der Flüsse Ill bzw. Theel durchgeführt werden. Um Beeinträchtigungen aus oberhalb gelegenen Mischwasserentlastungsbauwerken oder anderen Einleitern ausschließen zu können, wurde ein Messstandort im Oberlauf eines Gewässers gesucht. Darüber hinaus musste die Zugänglichkeit zum Bauwerk bzw. zu dessen Auslauf gewährleistet sein, um entsprechende Messsonden zur Erfassung eines Abschlagsereignisses anbringen zu können. Der Standort musste eine geeignete

Sonnenexposition aufweisen, es sollte aber auch eine Stromversorgung vorhanden sein, um im Zweifelsfall die Solarstation mit Netzspannung betreiben zu können.
Unter Berücksichtigung all dieser Kriterien wurde der zur Kläranlage Bergweiler gehörige Staukanal RÜB 19 am Theelbach in *Tholey* als Untersuchungsobjekt ausgewählt (siehe Abbildung 4.7-1 und 4.7-2). Die Solarstation wurde am 18. November 2015 an diesem Standort aufgestellt. Die technischen Kenngrößen des Staukanals finden sich in Tabelle 4.7-1.

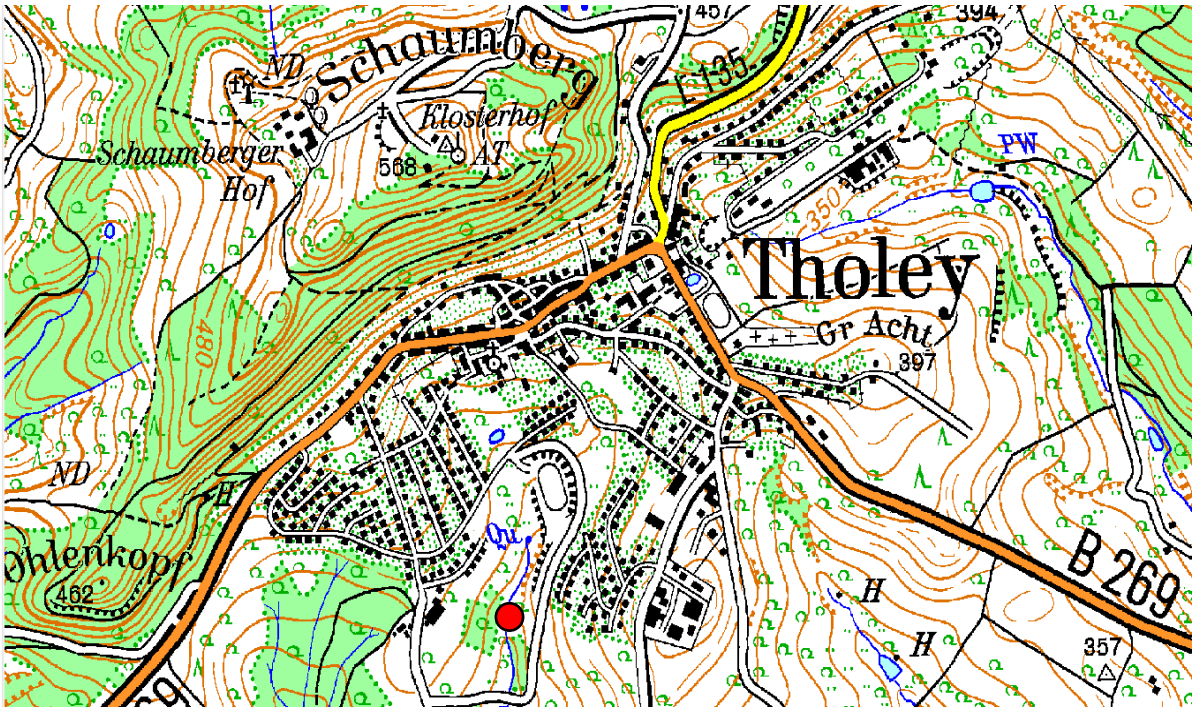


Abbildung 4.7-1: Lage des Messstandortes in *Tholey* (Quelle: Zora, Maßstab ca. 1:9.000)

Abbildung 4.7-2: Standort in *Tholey* (Quelle der Karte: Zora, Maßstab ca. 1:6.000)

Tabelle 4.7-1: Kenndaten des RÜB 19 in *Tholey*

Durchmesser [mm]	Auslauf-Durchmesser [mm]	Gesamt-Volumen [m3]	[l/s]
2000	400	356	118

Da der Oberlauf des Theelbaches im Sommer trockenfällt, musste Mitte des Jahres nach einem Alternativ- Standort gesucht werden, auf den die oben beschriebenen Kriterien ebenfalls zutreffen sollten. Es konnte jedoch kein Standort gefunden werden, an dem das entsprechende Gewässer vom Oberlauf her unbelastet gewesen wäre. Daher wurde als Folge-Standort das ebenfalls zur Kläranlage Bergweiler gehörige Regenüberlaufbauwerk RÜB18 in *Bergweiler* am Mittellauf der Theel ausgewählt und dieser Standort am 7. Juli 2016 bezogen (siehe Abbildung 4.7-3 und 4.7-4). Die technischen Kenngrößen dieses Bauwerkes finden sich in Tabelle 4.7-2.

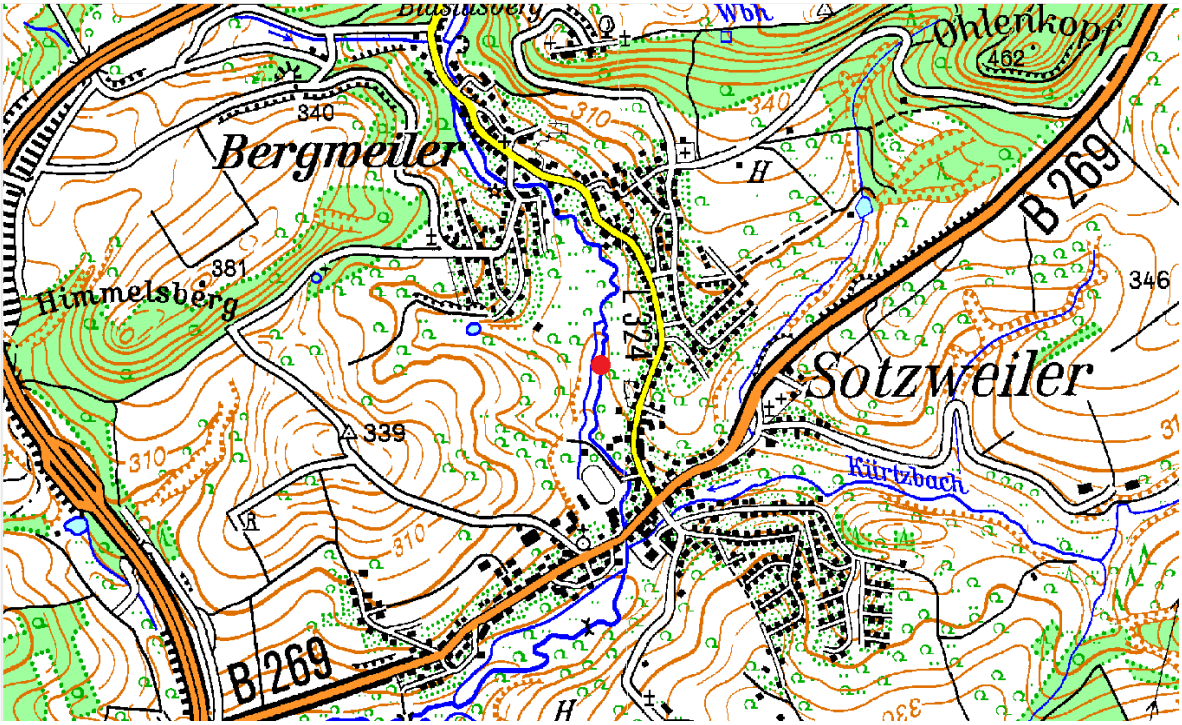


Abbildung 4.7-3: Lage des Messstandortes in *Bergweiler* (Quelle: Zora, Maßstab ca. 1:10.000)

Abbildung 4.7-4 Standort in Berg*weiler* (Quelle der Karte: Zora, Maßstab ca. 1:6.000)

Tabelle 4.7-2: Kenndaten des RÜB 18 in *Bergweiler*

Maße (Breite x Höhe) [mm]	Auslauf-Durchmesser [mm]	Gesamt-Volumen [m3]	[l/s]
3500 x 200		900	150

4.8 Versuchsaufbau im Feld

Tholey

Die Solarstation wurde am Standort bestmöglich Richtung Süden bzw. Südwesten ausgerichtet, um eine optimale Sonneneinstrahlung auf die Solarzellen gewährleisten zu können. Zusätzlich wurde eine Stromversorgung über eine 220V-Leitung angebracht. Die Pumpe wurde etwa 10m hinter dem Auslauf des Staukanals im Gewässer eingebracht (vgl. auch Kapitel 5.5). Die zu fördernde Höhe an diesem Standort betrug etwa 5m, sowohl der Zulauf- als auch der Ablaufschlauch wurden über den kürzest möglichen Weg von der Pumpe zur Station bzw. von der Station in das Gewässer zurück verlegt. Um Abschläge des Staukanals aufzeichnen und die Pumpe einschalten zu können, wurde ein Ultraschall-Sensor zur Erfassung des Wasserstandes direkt über dem Ablaufrohr des Regenüberlaufes eingebracht. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus findet sich in Abbildung 4.8-1.

Abbildung 4.8-1: Wasserstandssensor über dem Auslauf des Staukanales

Bergweiler

Auch hier konnte die Solarstation in Richtung Südwesten ausgerichtet und eine Stromversorgung über eine 220V-Leitung angeschlossen werden. Die Pumpe wurde im Abstand von ca. 5m vom Ablauf des Staukanals im Gewässer eingebracht. Die zu fördernde Höhe an diesem Standort betrug etwa 2m, die Schläuche wurden auch hier über den kürzest möglichen Weg von der Pumpe zur Station hin bzw. zurück ins Gewässer verlegt. Der Ultraschall-Sensor zur Erfassung des Wasserstandes wurde im Kanal unterhalb eines Kanaldeckels direkt neben der Solarstation eingebracht. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus findet sich in Abbildung 4.8-2 und 4.8-3.

Abbildung 4.8-2: Auslauf des Staukanales in *Bergweiler*

Abbildung 4.8-3: Wasserstandssensor unter dem Kanaldeckel in *Bergweiler*

5. Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Gewässergüte-Messungen

Im Folgenden werden einige Messungen[3] dargestellt, die im Verlauf der Kampagne erhoben wurden. Es muss beachtet werden, dass die jeweils vor und nach dem Ereignis gemessenen Werte nicht den realen Zustand im Gewässer darstellen, es handelt dabei lediglich um das seit dem letzten Pumpereignis im Probentopf verbliebene und gealterte Wasser. Die Phasen vor und nach dem Pumpbetrieb besitzen daher keine Relevanz. Zudem können keine Rückschlüsse auf die Wassermenge und damit auch nicht auf die Frachten gezogen werden, da es sich um eine reine Wasserstandssmessung zur Ansteuerung der Pumpe handelt. Die Sonde war bis zu einem Wasserstand von 1m geeicht und konnte höhere Wasserstände somit nicht korrekt erfassen.

Am Standort in *Tholey* konnten wenige Einträge von Mischwasserentlastungen beobachtet werden. Abbildung 5.1-1 veranschaulicht ein solches Ereignis am 8. Februar 2016. Beim Einsetzen des Pumpbetriebes zeigte sich zunächst ein abrupter Anstieg von Ammonium auf fast 5 mg/l. Gleichzeitig wird die Konzentrationen von Nitrat verdünnt (siehe Abbildung 5.1-1, erster Rahmen: ca. 10:15h bis ca. 14h).
Die Ammonium-Gehalte gehen trotz des anhaltenden Abschlages deutlich zurück, was darauf schließen lässt, dass beim ersten Spülstoß stärker belastetes Abwasser, evtl. auch Schlamm, welcher von einem früheren Ereignis im Bauwerk zurückgeblieben war, ausgetragen wird (sog. *First-Flush-Effekt*). Die Zunahme von Nitrat ab ca. 13h deutet darauf hin, dass weniger Wasser aus dem Entlastungsbauwerk läuft und die im Gewässer vorhandenen Nitrat-Gehalte weniger stark verdünnt werden. Gegen 14:30h kommt es zu einer kurzen Pause, etwas später erfolgt jedoch ein zweites Abschlagseregnis (siehe Abbildung 5.1-1, zweiter Rahmen: ca. 14:30h bis ca. 20h). Dieses Ereignis weist zunächst einen ähnlichen, wenn auch weniger ausgeprägten Verlauf auf wie das erste. Später jedoch gegen 19h wird noch einmal Ammonium eingetragen. Dies rührt vermutlich daher, dass die größten Mengen an kommunalem Abwasser am frühen Morgen und in den Abendstunden anfallen.

[3] Zeitliche Auflösung: 5 Minuten

Diese hoch belastete Abwassermenge in den Abendstunden konnte noch nicht wieder vollständig im Kanal gefasst werden, so dass noch einmal höher belastetes Abwasser ins Gewässer abgeschlagen wurde.

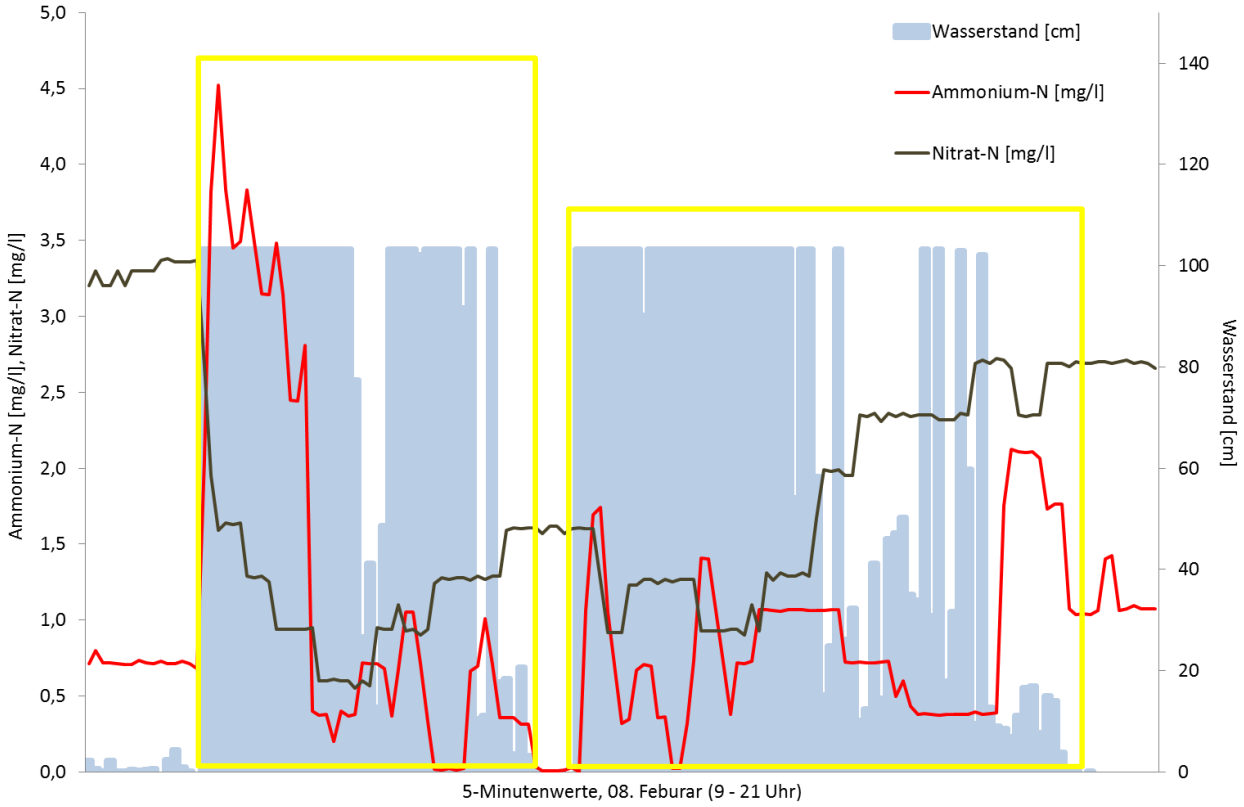


Abbildung 5.1-1: Gehalte von Ammonium und Nitrat sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Trotz der eingetragenen Mengen an Ammonium bleiben die Sauerstoff-Gehalte im Gewässer stabil, was sicherlich auch an den niedrigen Temperaturen von ca. 7 °C liegt (siehe Abbildung 5.1-2). Die Leitfähigkeit geht beim Einsetzen des Abschlages auf Grund der Niederschlagsmenge zunächst stark zurück, steigt dann aber kontinuierlich wieder an. Dasselbe geschieht während des zweiten Ereignisses. Die Trübung verläuft während des ersten Ereignisses erwartungsgemäß entgegengesetzt zur Leitfähigkeit. Allerdings kommt es etwa in der Mitte des zweiten Ereignisses zu zwei Trübungsspitzen. Diese könnten auch durch Einträgen verursacht sein, die nicht aus dem Abschlagsbecken, sondern vom den umliegenden Flächen stammen und über Oberflächenabspülungen ins Gewässer eingetragen wurden.

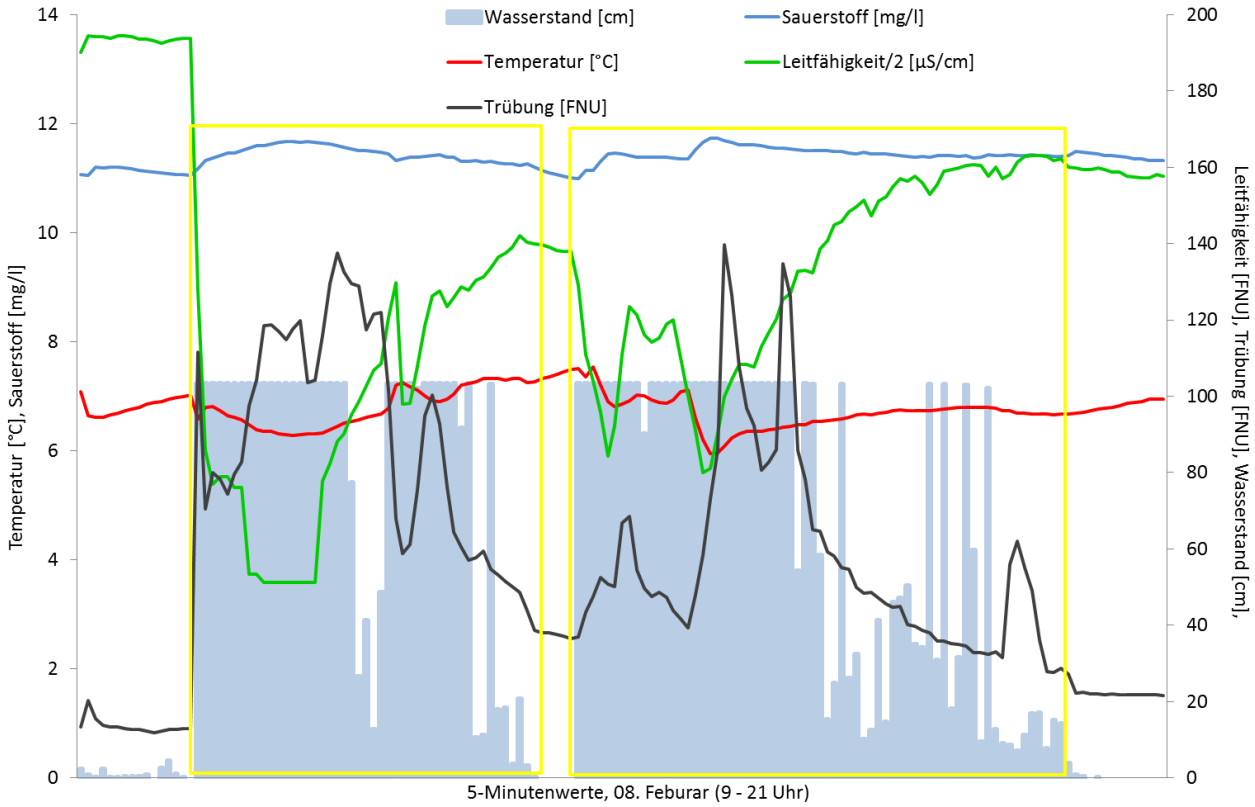


Abbildung 5.1-2: Temperatur, Sauerstoffgehalte, Leitfähigkeit und Trübung sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Vergleicht man diejenigen Parameter, auf die die Abschlagsereignisse in der oben erläuterten Art und Weise einen direkten Einfluss im Gewässer hatten (Ammonium, Nitrat, Leitfähigkeit und Trübung), so lassen sich die verschiedenen Eintragswellen besser erkennen. Diese sind in Abbildung 5.1-3 nochmals detailliert dargestellt, wobei jeweils der Beginn des Ereignisses mit einem Pfeil gekennzeichnet ist.

Mit der ersten Welle wird eine große Menge Ammonium und Trübstoffe, ggfs. auch Feststoffe eines vorherigen Ereignisses, eingespült. Durch die zweite Welle geht die Trübung jedoch zurück, es handelt sich also um Wasser mit geringerem Feststoffanteil, da vermutlich ein Großteil der Feststoffe bereits ausgespült wurde. Die dritte Welle ist nicht mehr so stark ausgeprägt, Welle 4 und 5 sind überformt durch die Regenmengen, die über die Geländeoberflächen in das Gewässer gelangen (Trübung) (s.o.). Bei der letzten Welle handelt es sich um den oben beschriebenen Eintrag von Haushaltsabwässern.

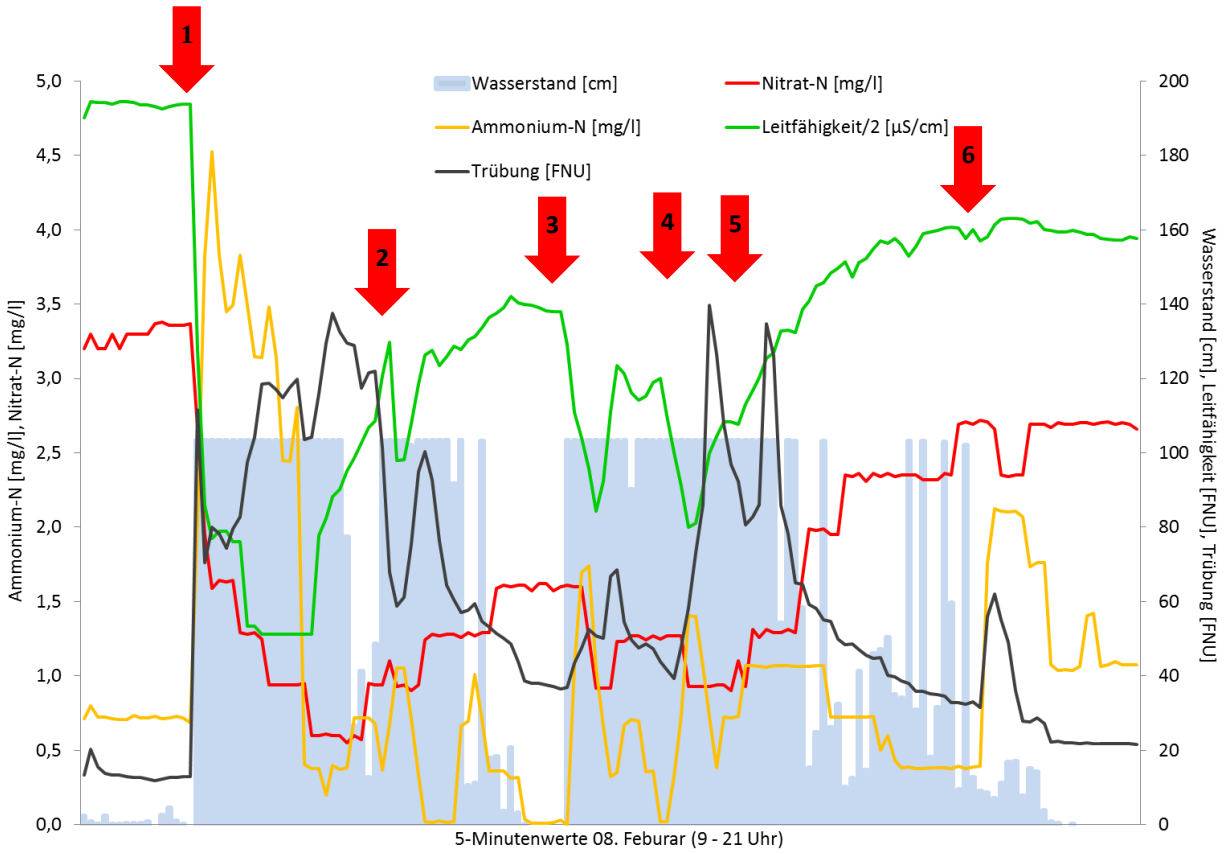


Abbildung 5.1-3: Konzentrationen von Ammonium und Nitrat, Leitfähigkeit und Trübung sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Anfang März konnte ein Ereignis beobachtet werden, bei dem Einträge von Streusalzen sichtbar wurden (siehe Abbildung 5.1-4). Schon beim geringen Anstieg des Wasserstandes wurde die Pumpe angeschaltet und es wurde eine Zunahme der Ammonium-Konzentration sowie der Trübung aufgezeichnet. Zudem kam es auch zu einer geringen Erhöhung der Leitfähigkeit und wenig später zu einem starken Anstieg derselben, welcher durch Auswaschungen von Streusalzen von Verkehrsflächen herrührt. Da Ende Februar bzw. Anfang März die Lufttemperaturen deutlich sanken, wurden vielerorts Streusalze eingesetzt (vgl. auch Abbildung 11-3 im Anhang). Die Ammonium-Gehalte sowie die Leitfähigkeit und die Trübung fallen schnell wieder ab und stagnieren während des restlichen Ereignisses auf einem geringen Niveau. Die Sauerstoff-Gehalte sind hingegen von Anfang an stabil[4].

[4] Die geringen Gehalte vor dem Ereignis sind auf eine Sauerstoff-Zehrung in Folge der „Alterung“ des Wassers im Probentopf zurück zu führen und spiegeln, wie bereits beschrieben, nicht die tatsächlichen Verhältnisse im Gewässer wider.

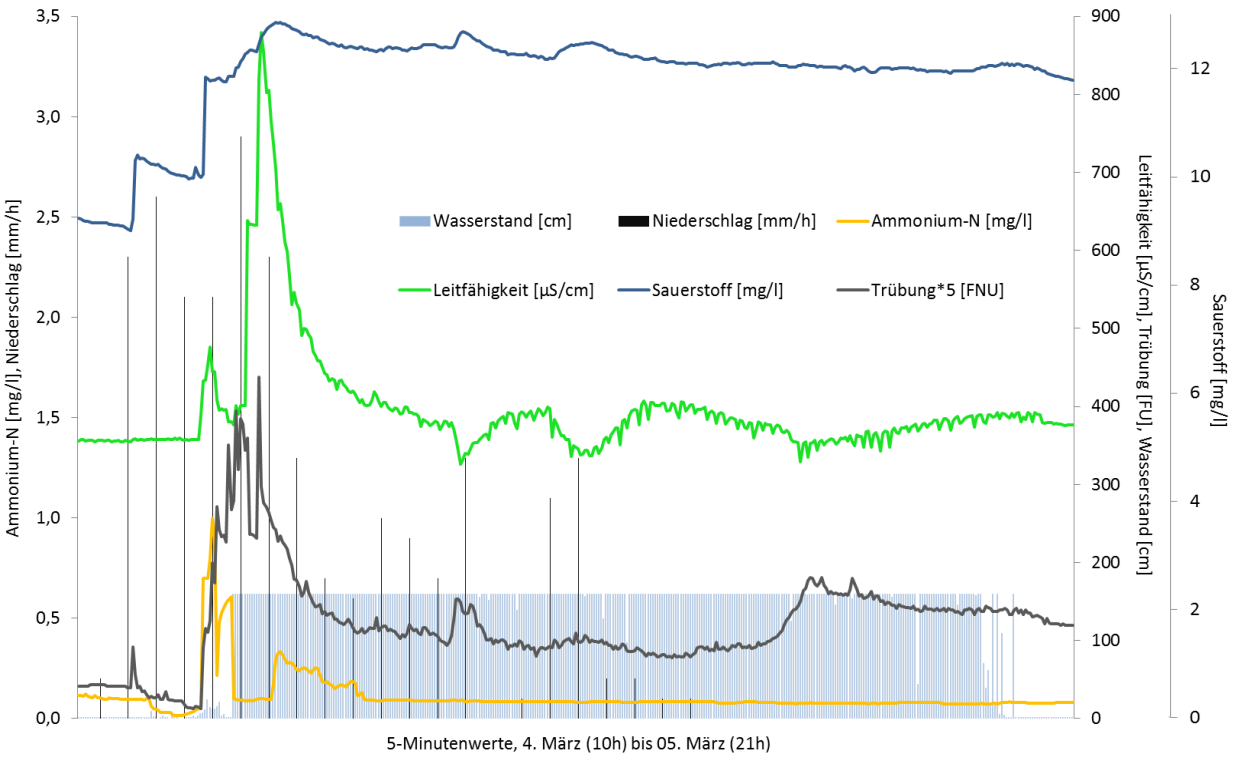


Abbildung 5.1-4: Ammonium- und Sauerstoff-Gehalte, Trübung und Leitfähigkeit sowie Wasserstand am 04. und 05. März 2016

Ab Mitte März wurde auch das Pumpensignal mit erfasst. Dieses digitale Signal zeigt an, ob die Pumpe läuft (1) oder nicht (0) und liefert den entscheidenden Hinweis für die Auswertung der Daten. Am 5. März konnte ein Ereignis mit mehreren Pumpzyklen beobachtet werden (siehe Abbildung 5.1-5). Durch das Verdrängen des abgestandenen Wassers im Probentopf durch das Flusswasser verringerten sich die Temperatur sowie die Leitfähigkeit, zudem kam es zur Einspülung von Trübstoffen. Die Sauerstoff-Gehalte im Gewässer bewegten sich im Sättigungsbereich. Ammonium konnte nicht verzeichnet werden, wobei allerdings nicht gesagt werden kann, ob es sich bei diesem Ereignis um Einleitungen von wenig belastetem Regenwasser handelt oder die Sonde bereits ausgeblutet war (vgl. Kapitel 5.6).

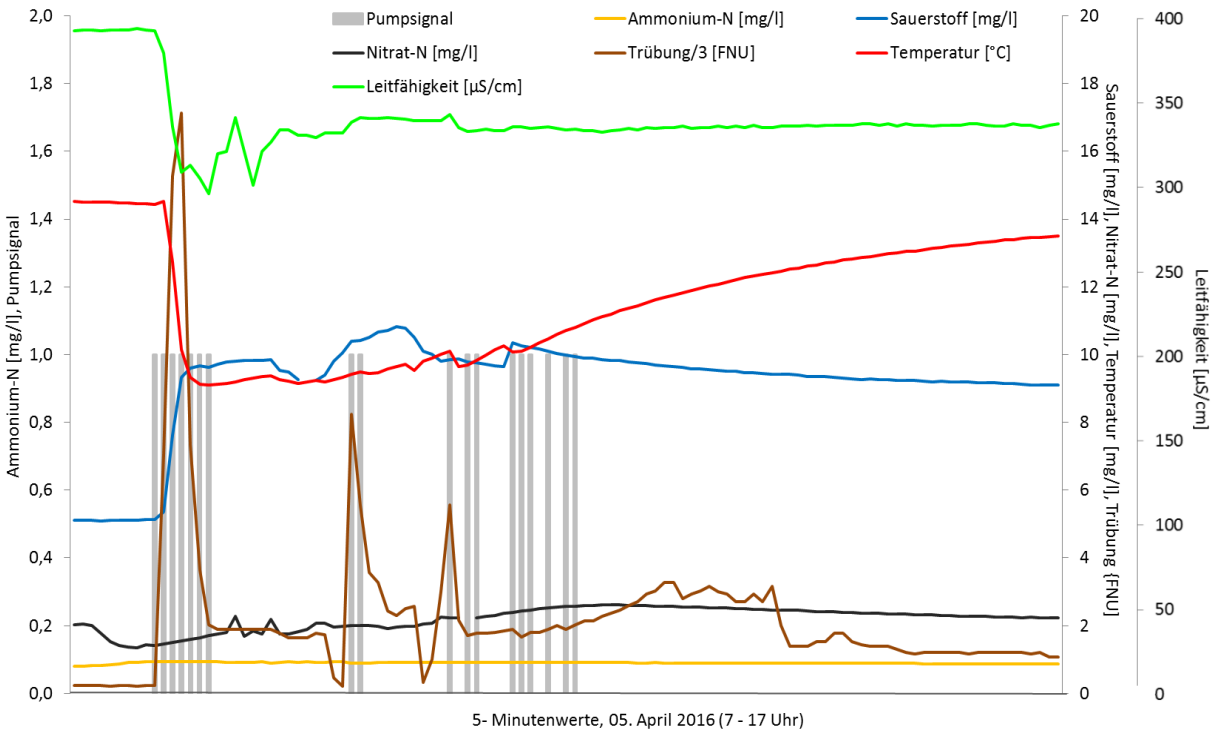


Abbildung 5.1-5: Gehalte von Ammonium, Nitrat und Sauerstoff sowie Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung und Pumpsignal am 05. April 2016

Allerdings können auch Daten, die außerhalb von Ereignissen aufgezeichnet wurden, Hinweise auf die Güte der Messwerte liefern. So konnte z.B. während einer Trockenphase ein gerätebedingtes Abdriften der Ammonium-Konzentrationen beachtet werden (vgl. Kapitel 5.6).
Als schwierig gestaltet sich auch die Plausibilisierung der Daten, da es, wenn die Pumpe angesteuert wird, zunächst zu extremen Sprüngen in den Messreihen kommt und graduelle Anstiege, wie sie bei kontinuierlichen Messungen als Hinweis auf ein reelles Ereignis und zum Ausschluss von Messfehlern herangezogen werden, nicht auftreten. Daher ist die Information, ob die Pumpe gelaufen ist oder nicht, absolut unabdingbar.
Ein Aggregieren der Daten, z.B. in Form von Stundenmittelwerten, ist in diesem speziellen Falle nicht ratsam, da kurze Ereignisse dann evtl. nicht mehr dargestellt werden.

Insgesamt konnten am Standort in *Tholey* nur fünf Abschlagsereignisse erfasst werden. Dabei konnten jeweils sehr kurzfristige Ammonium-Einträge von 2 bis 5 mg/l, jedoch zu keinem Zeitpunkt Sauerstoff-Defizite im Gewässer festgestellt werden. Am Standort in *Bergweiler* konnte kein Abschlagsereignis beobachtet werden (vgl. auch Kapitel 5.6).

5.2 Auswertung der Daten im Vergleich mit anderen Standorten

Im Gegensatz zu herkömmlichen Online-Daten, die gewonnen werden, um jederzeit einen lückenlosen Überblick über die Wasserqualität zu haben und jede wie auch immer geartete Gewässer-Situation zu erfassen, war es in diesem Fall das Ziel, nur bestimmte Ereignisse aufzuzeichnen. Da die Konzeption des Messwertumformers sowie der Sonden kein Abschalten der Messgeräte zu ereignisfreien Zeiten erlaubte (vgl. Kapitel 4.2), wurden zwar kontinuierlich Messwerte aufgezeichnet, diese stellten aber zum Großteil keine verwendbaren Informationen dar. Anhand der in der Datenübertragung parallel zu den Messwerten übermittelten Wasserstandsdaten und des Pumpsignal mussten die einzelnen Ereignisse erkannt, isoliert und anschließend interpretiert

werden. Dabei musste auch berücksichtigt werden, dass die vor und nach einem Abschlagsereignis aufgezeichneten Messwerte in keiner Weise den Zustand im Gewässer darstellen können, da es sich lediglich um Wasser handelt, welches nach dem letzten Pumpzyklus im Probentopf verblieben und gealtert ist.

Darüber hinaus gestaltet sich auch die Interpretation von Abschlägen aus Mischwasserentlastungen ohne Erfassung der Phosphor und TOC-Werte schwierig. Besonders der gelöste Phosphor-Anteil (ortho-Phosphat) ist ein weiterer wichtiger Indikator für Einleitungen von häuslichem Abwasser, da er außerhalb von industriellen Belastungspfaden relativ eindeutig häuslichem Abwasser zugeordnet werden kann. In diesem ist er in sehr hohen Konzentrationen vorhanden und wird zudem nicht wie bisweilen Ammonium weiter abgebaut. Zudem zeigte sich in Messkampagnen an anderen Fließgewässern, dass oftmals nicht primär die Gehalte an Ammonium, sondern diejenigen von TOC eine groß Auswirkung auf die Sauerstoff-Zehrung im Gewässer haben. Da es sich beim TOC um einen sog. Summenparameter handelt, also zahlreiche unterschiedliche Komponenten an Kohlenstoff erfasst werden, ist die Zusammensetzung des TOC für den Grad der Sauerstoff-Zehrung entscheidend. Abbildung 5.2-1 zeigt ein Beispiel für Einträge von Phosphor und TOC aus einem Regenüberlaufbauwerk in *Hassel* in ein kleines Gewässer. Obwohl neben Phosphor große Mengen an Ammonium und TOC eingetragen werden, stagniert der Sauerstoff-Gehalt dennoch auf relativ hohem Niveau. Grundsätzlich lagen die Sauerstoff-Gehalte in *Hassel* an beiden Standorten (in unmittelbarer Nähe zu zwei Mischwasserentlastungbauwerken) auch zu Zeiten von Abschlägen fast immer über 6 mg/l [MEYER ET AL. 2015].

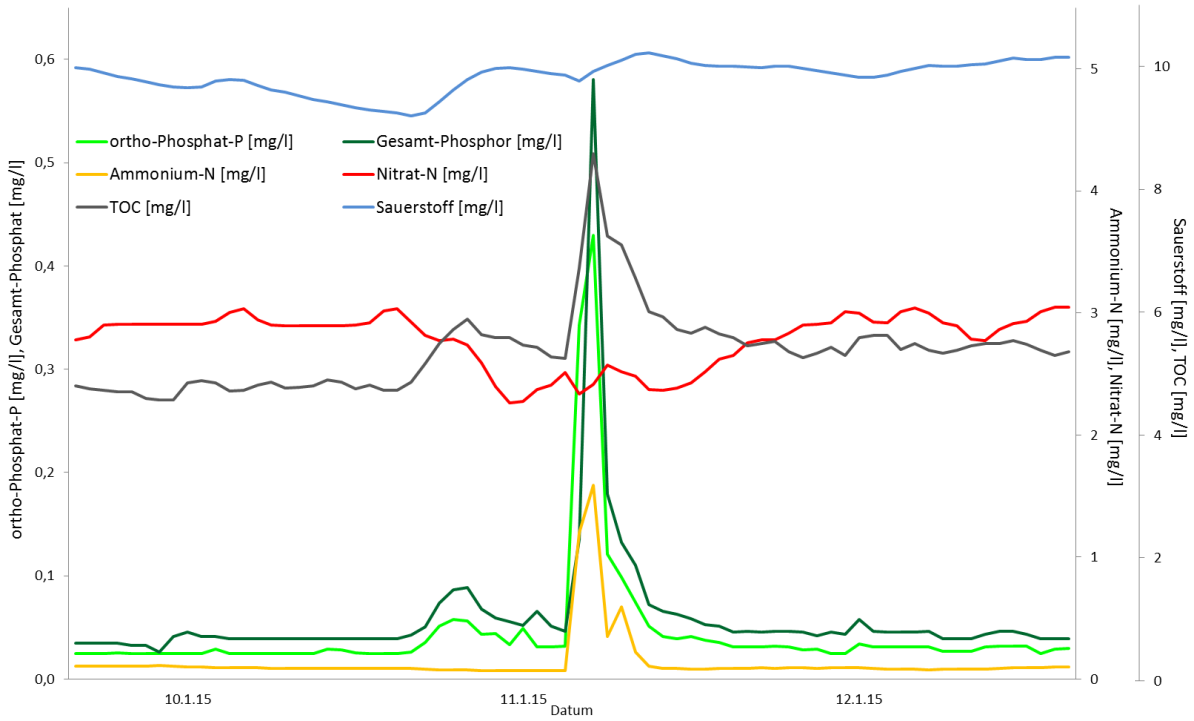


Abbildung 5.2-1: Konzentrationen von Sauerstoff, Ammonium, ortho-Phosphat, Gesamt-Phosphor und TOC im Stockweiherbach bei Einleitungen durch das RÜB1 Hassel (Stundenmittelwerte vom 10. bis 12. Januar 2015)

In den vorangegangenen Messkampagnen konnte bereits gezeigt werden, dass sich Einleitungen aus Mischwasserentlastungen nicht immer zwangsläufig negativ aus die Sauerstoff-Gehalte im Gewässer auswirken. Dies hängt, neben der Wassertemperatur, welche einen unmittelbaren Einfluss auf die Löslichkeit von Sauerstoff im Wasser hat, auch von der Art des Bauwerkes und somit des Abschlages, aber auch von der Entfernung der Einleitstelle zum Messort ab. Dennoch konnten auch im Winter bei niedrigen Wassertemperaturen zahlreiche Abschlagsereignisse beobachtet werden, welche zu

ausgeprägten und anhaltenden Sauerstoff-Defiziten führten, wie in Abbildung 5.2-2 am Beispiel der Bist im November 2012 dargestellt ist [MEYER ET AL. 2013].

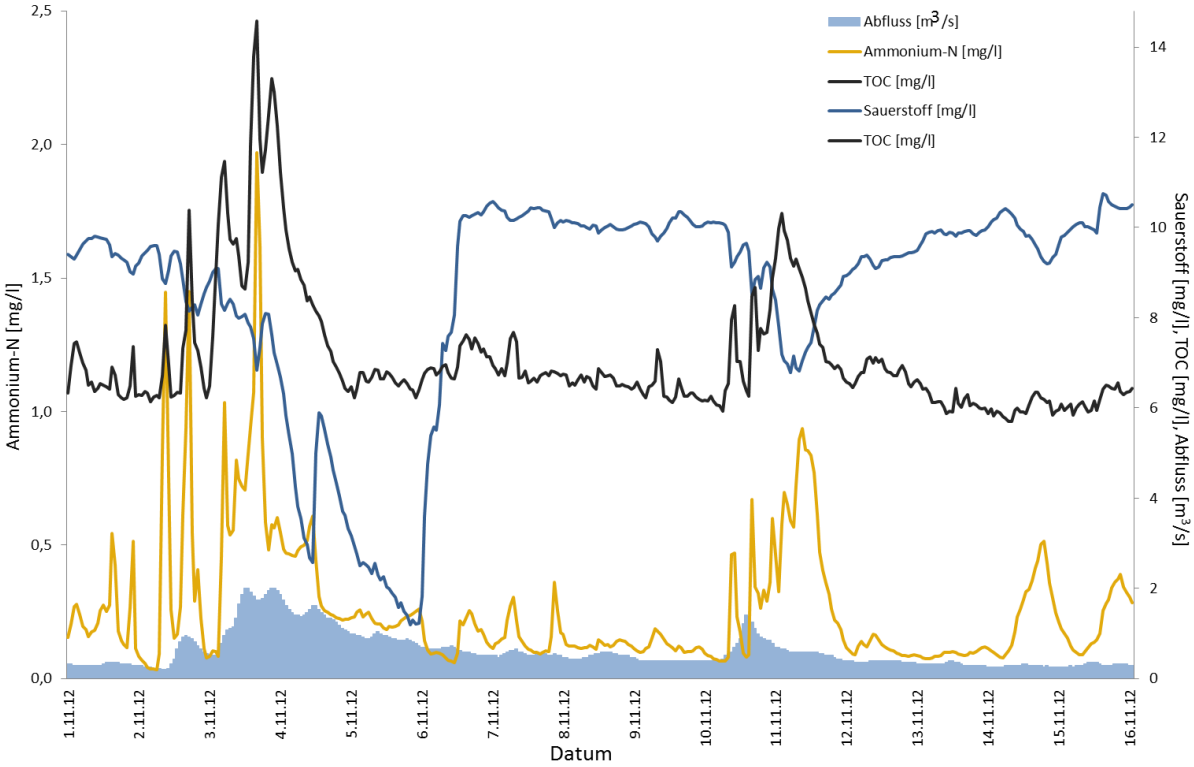


Abbildung 5.2-2: Sauerstoff-Defizite durch Abschläge von Ammonium- und TOC-haltigen Einträgen sowie Abfluss (Bist in *Wadgassen*; Stundenmittelwerte vom 1. bis 15. November 2012)

5.3 Auswertung der technischen Daten und Fallstudien basierend auf einem Simulationsmodell

Neben den Daten der Gewässergüte-Parameter wurden auch diejenigen Messgrößen ausgewertet, die zur Überwachung der technischen Ausstattung und vor allem zur Beurteilung von Energieproduktion und -bedarf aufgezeichnet wurden. Einen Auszug aus der Messdatenerfassung und den daraus errechneten Leistungen zeigt Abbildung 5.3-2 für den Zeitraum vom 06.08. 2016 bis 15.08.2016. Für den gleichen Zeitraum zeigt Abbildung 5.3-1 die solare spezifische Einstrahlung bezogen auf einen Quadratmeter Kollektorfläche, welche mit den installierten Pyranometern gemessen wurde.

Zu erkennen ist:

- Die maximale solare Einstrahlungsleistung auf die Gesamtfläche von ca. 7,8m² liegt bei ca. 7000W in der Mittagszeit
- Die maximal entnommene elektrische PV-Leistung liegt im Durchschnitt bei ca. 450W in der Mittagszeit. Dies entspricht einem Wirkungsgrad von ca. 6,4%. Nach Herstellerangaben liegt der Wirkungsgrad der PV-Kollektoren bei 13,5%. Demzufolge werden weniger als 50% der möglichen elektrischen Leistung zur Deckung der Grundlast und zur Batterieladung verwendet.
- Die Grundlast des Systems liegt bei ca. 70W.
- Das Energiesystem ist im Sommer durchaus im Stande, autark zu arbeiten und die Grundlast durch die Solarenergie tagsüber und die in den Batterien gespeicherte Energie nachts zu decken.

- Die Funktionsweise der Netzkopplung wurde am 13.08.2016 erprobt. Erkennbar ist dies an der Verbraucherleistungsspitze. Hierbei wurde ein elektrischer Verbraucher mit annähernd der Maximalausgangsleistung des Wechselrichters kurzzeitig in Betrieb gesetzt, bis wegen des niedrigen Batterieladezustandes das Netzkopplungsrelais durch die SPS geschaltet wird. Die Zeitspanne, bis der Wechselrichter das System mit der Netzfrequenz synchronisiert hat, wird durch die Batterien kompensiert.

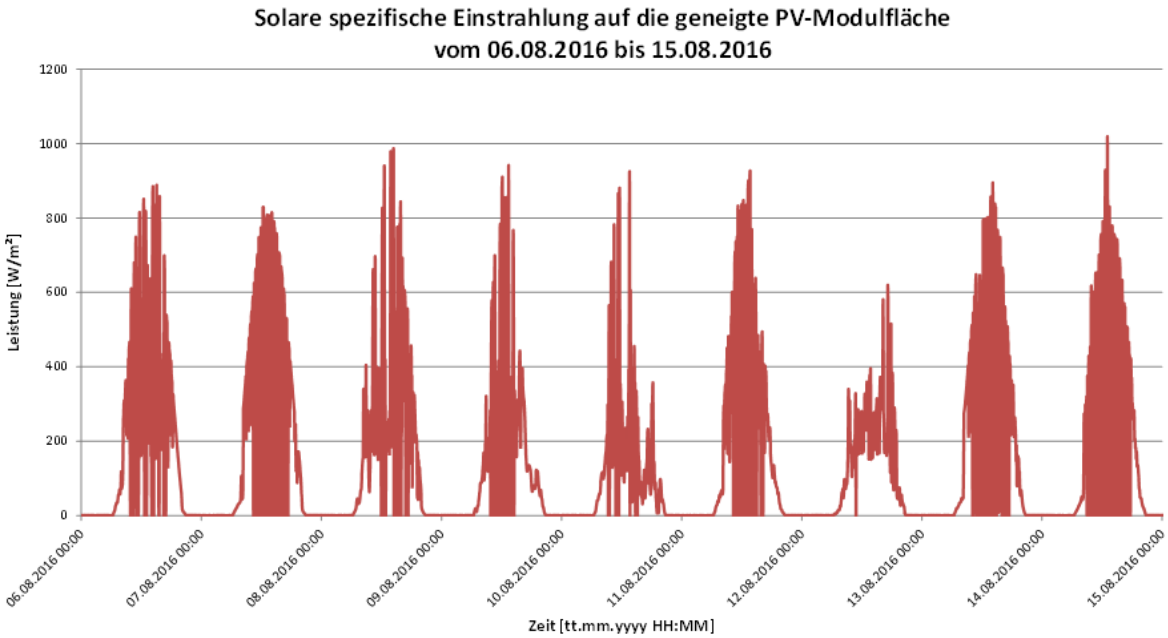


Abbildung 5.3-1: Solare spezifische Einstrahlung auf die geneigte PV-Modulfläche vom 06.08.2016 bis 15.08.2016

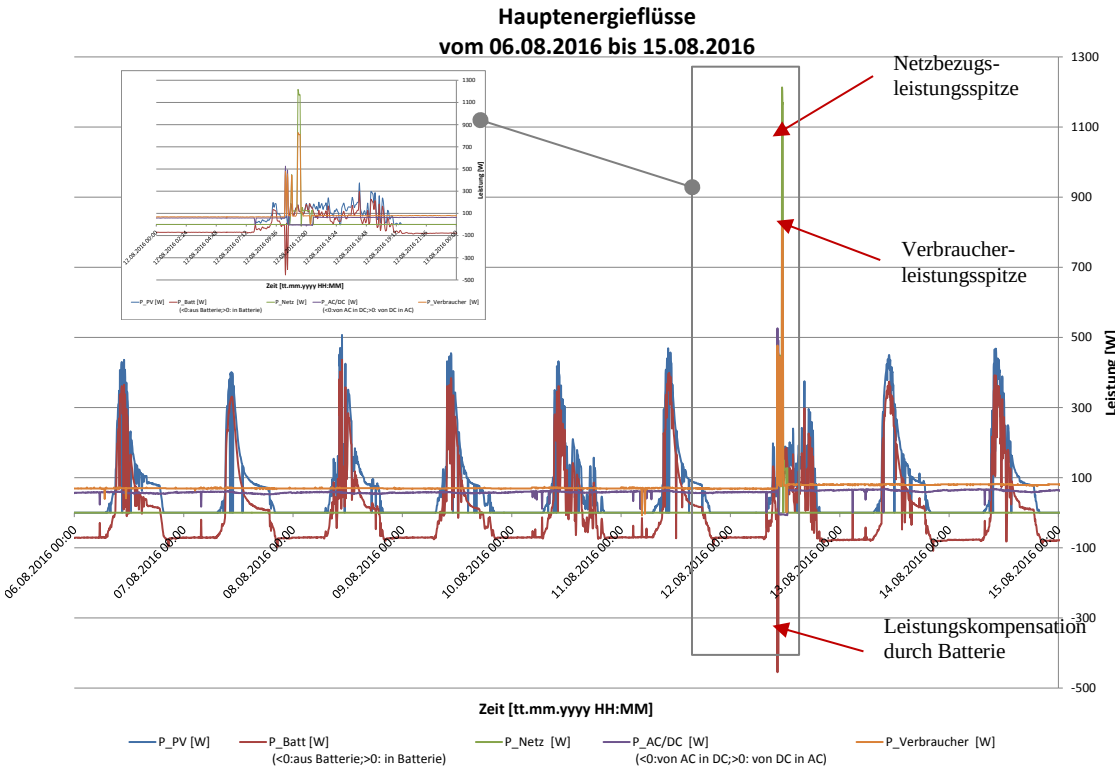


Abbildung 5.3-2: Hauptenergieflüsse vom 06.08.2016 bis 15.08.2016

Da im Rahmen der Machbarkeitsstudie keine langfristige Messperiode aufgrund der technischen Herausforderungen stattfinden konnte, wurde ein Simulationsmodell erstellt, anhand dessen eine Analyse der Systemenergiebilanz durchgeführt wird. Das Modell, dessen Zweck und Randbedingungen sowie die Simulationsergebnisse sollen in diesem Abschnitt diskutiert werden.

Eine allumfassende Richtigkeit eines Modells kann nicht überprüft werden. Daher ist es besser, wenn man von der Gültigkeit eines Modells für einen bestimmten Modellzweck spricht.
Der Zweck des hier vorgestellten Modells soll anhand der innersystemisch erzeugten und verbrauchten Energieflüsse eine Aussage für eine geeignete Systemauslegung für eine hohe Systemverfügbarkeit ermöglichen.
Folgende Anforderungen werden hieraus abgeleitet:

- Langfristige Beobachtbarkeit des Systemverhaltens
  Kein Jahr ist wie das andere! Bezogen auf das Wetter ist es daher sinnvoll einen Zeitraum von mehreren Jahren zu betrachten um auch etwaige aufgetretene Extremsituationen darzustellen. Aufgrund der benötigten Messdaten (bspw. Wetterdaten) für verschiedene Standorte ist es jedoch teilweise schwierig, dieser Anforderung nachzukommen.

- Kurze Simulationszeit
  Diese Anforderung führt weitergehend zu der Erstellung und Verwendung eines einfachen Modells, d.h. die mathematischen Gleichungssysteme dürfen nicht zu umfangreich werden und die Verwendung von Differentialgleichungen ist zu minimieren. Für eine Parameterstudie ist diese Forderung wichtig, will man die Bearbeitungszeit in einem überschaubaren zeitlichen Rahmen halten.

- Vorwiegende Betrachtung von Leistung und Energie der Systemkomponenten
  Diese Anforderung leitet sich direkt aus dem oben genannten Modellzweck ab. Alleine durch Bilanzierung der erzeugten und verbrauchten Leistung kann eine Nichtverfügbarkeit des Systems durch ein Leistungsdefizit festgestellt werden, unter der Nebenbedingung, dass keine Komponente durch einen Defekt oder Fehlfunktion ausfällt.

In Abbildung 5.3-3 wird das Modelldiagramm der wesentlichen Systemkomponenten dargestellt. Die hierfür verwendete Software ist Dymola (Dynamic Modeling Laboratory) / Modelica. Modelica ist eine freiverfügbare Modellierungssprache. Durch sie werden in mathematischen Gleichungen beschriebene physikalische Gesetzmäßigkeiten genutzt.

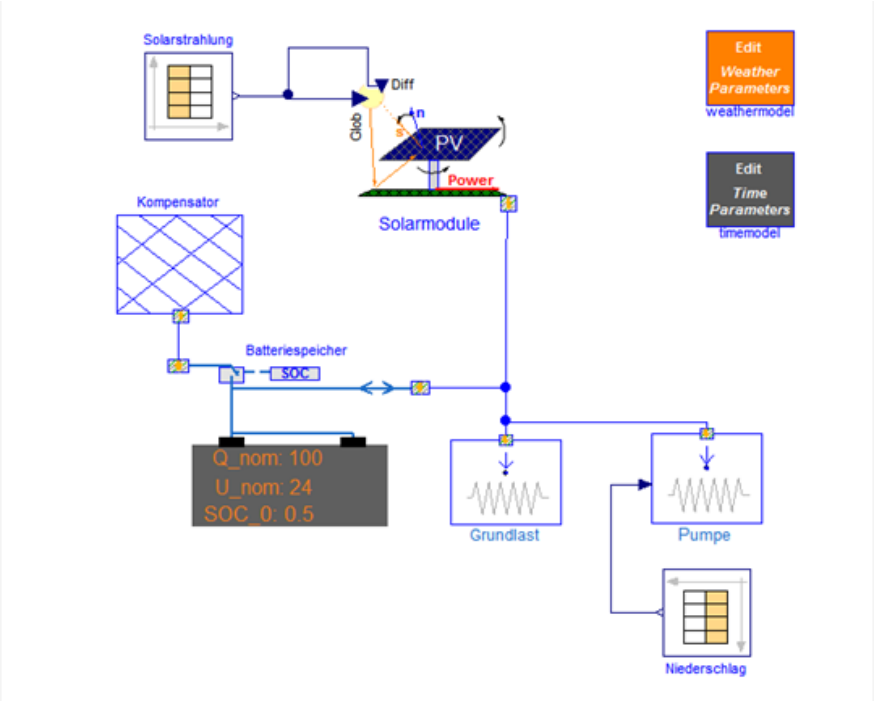


Abbildung 5.3-3: Diagramm des Simulationsmodells in Dymola/Modelica

Dymola hingegen ist die Bezeichnung der Simulationsumgebung, welche Modelica als Sprache nutzt.

Die von der PV-Anlage produzierte elektrische Leistung in Abhängigkeit der Einstrahlungsmessdaten und der berechneten Stellung von Sonne und Solarmodul zueinander wird den elektrischen Verbrauchern und dem Batteriespeicher bereitgestellt. Verschattungen der Solarmodule wird in diesem Modell nicht betrachtet.
Abbildung 5.3-4 zeigt die gemessene solare Global- und Diffusstrahlung auf eine horizontale Fläche. Diese Daten stellen eine Eingangsgröße für das Modell dar. Unter Angabe der PV-Anlagen-Orientierung (Azimut und Modulneigungswinkel gegen die Horizontale), dem Anlagenwirkungsgrad und der Modulfläche wird die erzeugte elektrische Leistung berechnet (Abbildung 5.3-5).

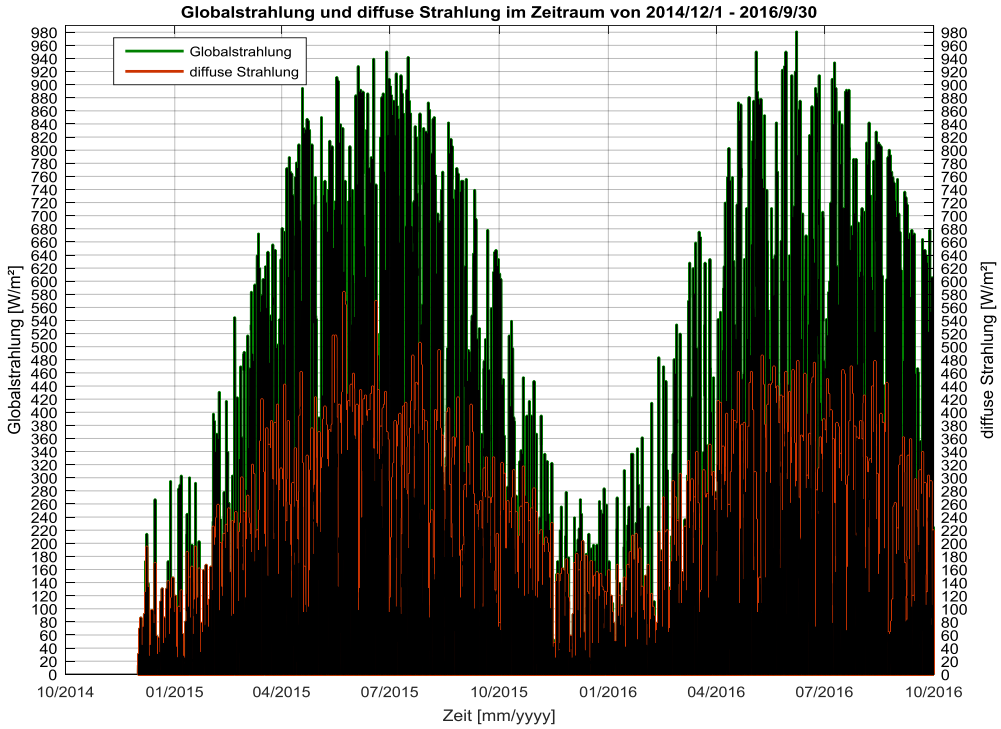


Abbildung 5.3-4 Messwerte zur Global- und Diffusstrahlung im Zeitraum vom 1. Dezember 2014 bis 30.September 2016 (DWD, Wetterstation in *Tholey*)

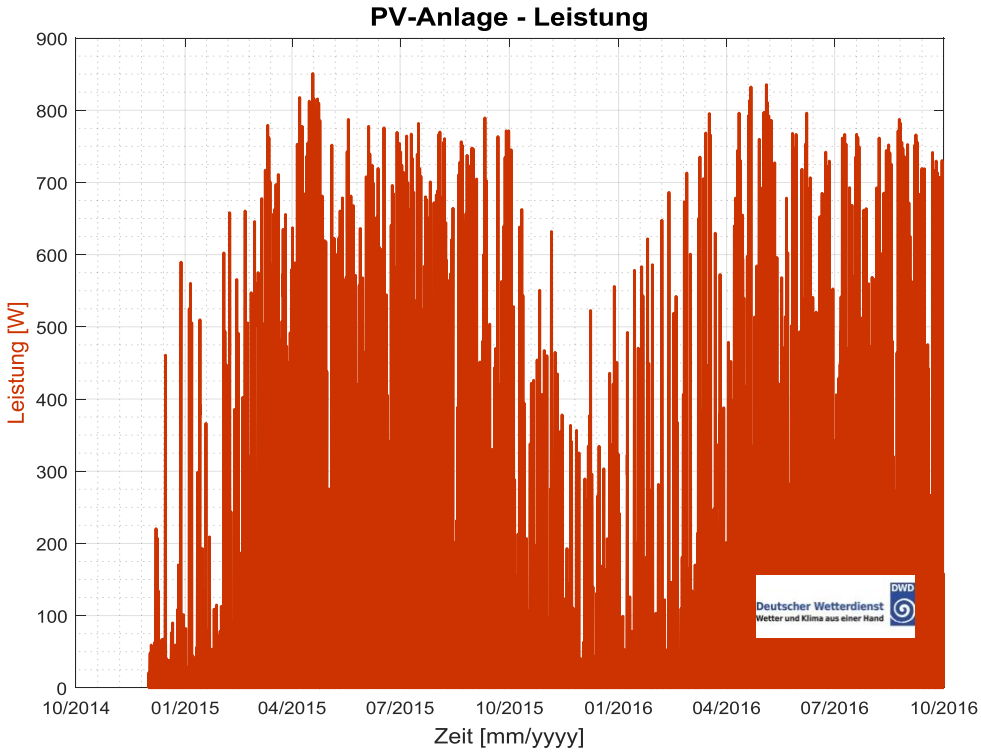


Abbildung 5.3-5: Simulierte elektrische Leistung der PV-Anlage (Modulazimut: 0° (Südausrichtung), Modulanstellwinkel: 45°, Anlagenwirkungsgrad: 10%, Modulfläche: 7,8m², Solarstrahlung (DWD, Wetterstation in *Tholey*)

Neben den Dauerverbrauchern, welche eine Grundlast von 70W darstellen, wird die Pumpe mit einer elektrischen Leistung von 400W versorgt. Während die Dauerverbraucher ununterbrochen diese Leistung beziehen, wird die Pumpe ereignisbasiert gesteuert. Im Feld wurde hierzu der Ultraschallsensor im Kanal oder am Kanalaustritt eines Regenüberlaufbauwerks angebracht, welcher das entsprechende Schaltsignal an die SPS weitergibt. Im Modell wird die Annahme einer Korrelation zwischen der Niederschlagsmenge und dem Auftreten eines Regenüberlaufereignisses getroffen. Die Existenz dieser Korrelation konnte wegen des kurzen Messzeitraums jedoch nicht bewiesen werden. Zudem muss eine Einzelfallbetrachtung für jedes Regenüberlaufbauwerk erfolgen. Der Niederschlagsschwellwert, oberhalb dessen die Pumpe aktiv ist, stellt einen einstellbaren Parameter im Modell dar.
Abbildung 5.3-6 zeigt die Niederschlagsmesswerte des saarländischen Landesamtes für Umwelt- und Arbeitsschutz (LUA) von der Wetterstation in *Sotzweiler* (in unmittelbarere Nähe des Messstandortes in *Bergweiler)*, welche als Eingangsgröße dient. Beispielhaft ist zudem ein Pumpenschalschwellwert von 1mm (= 1l/m²).

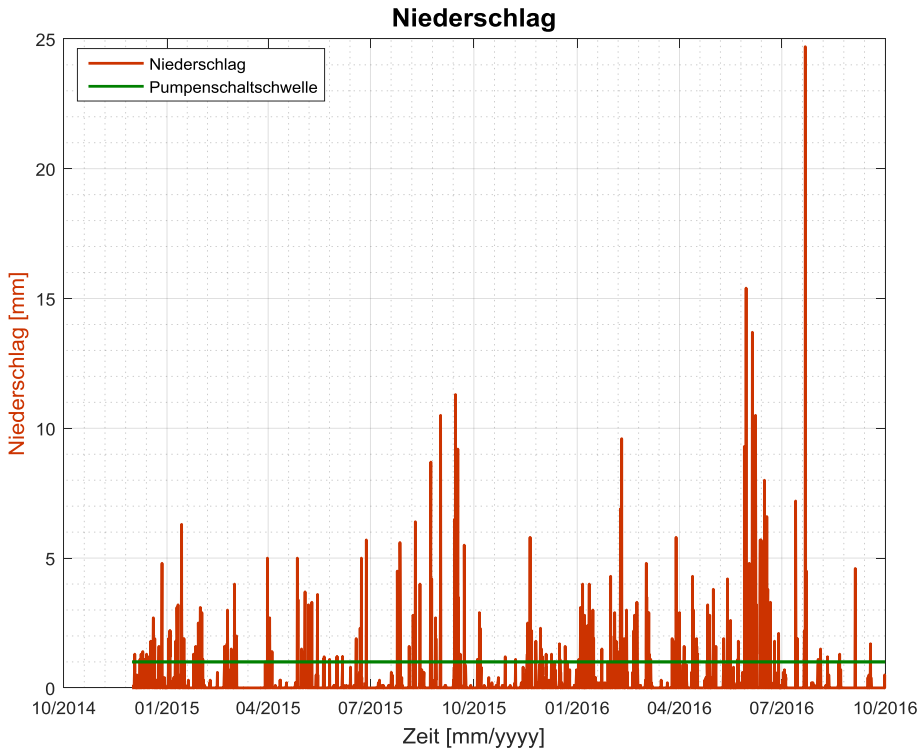


Abbildung 5.3-6: Niederschlagsmesswerte und beispielhafte Pumpenschaltschwelle (1mm) im Zeitraum vom 1. Dezember 2014 bis 30.September 2016 (LUA, Wetterstation in *Sotzweiler*)

Der Batteriespeicher nimmt überschüssige Energie von der PV-Anlage, welche nicht von den elektrischen Verbrauchern benötigt wird innerhalb der Speicherkapazitätsgrenzen auf. Umgekehrt speist sie die Verbraucher in Zeiten eines Leistungsdefizites der PV-Anlage, bis zur Entladung. Der Ladezustand SOC (engl. State-Of-Charge = Batterieladezustand) als eine Kenngröße stellt den Ladezustand des Speichers dar und stellt das Verhältnis von verfügbarer gespeicherter Energie zur Gesamtenergiespeichermenge dar. Technisch wird diese Kapazität nach unten (SOC_{min}) und oben (SOC_{max}) begrenzt, um der Gefahr einer schädlichen Tiefentladung bzw. Überladung vorzubeugen.
Erst wenn der Batteriespeicher erschöpft ist, der SOC also SOC_{min} unterschritten hat, wird die von den Verbrauchern benötigte elektrische Leistung vom Kompensator bereitgestellt. Ist der Batteriespeicher andererseits vollgeladen, der SOC hat SOC_{max} überschritten, dann wird die überschüssige Energie vom Kompensator konsumiert. Abbildung 5.3-7 zeigt beispielhaft den SOC eines Batteriespeichersystems mit Nennspannung 24V und einer Speicherkapazität von 100Ah. Zu erkennen ist, dass der Batteriespeicher in den Sommermonaten fast lückenlos vollständig durch die Solarenergie geladen werden kann

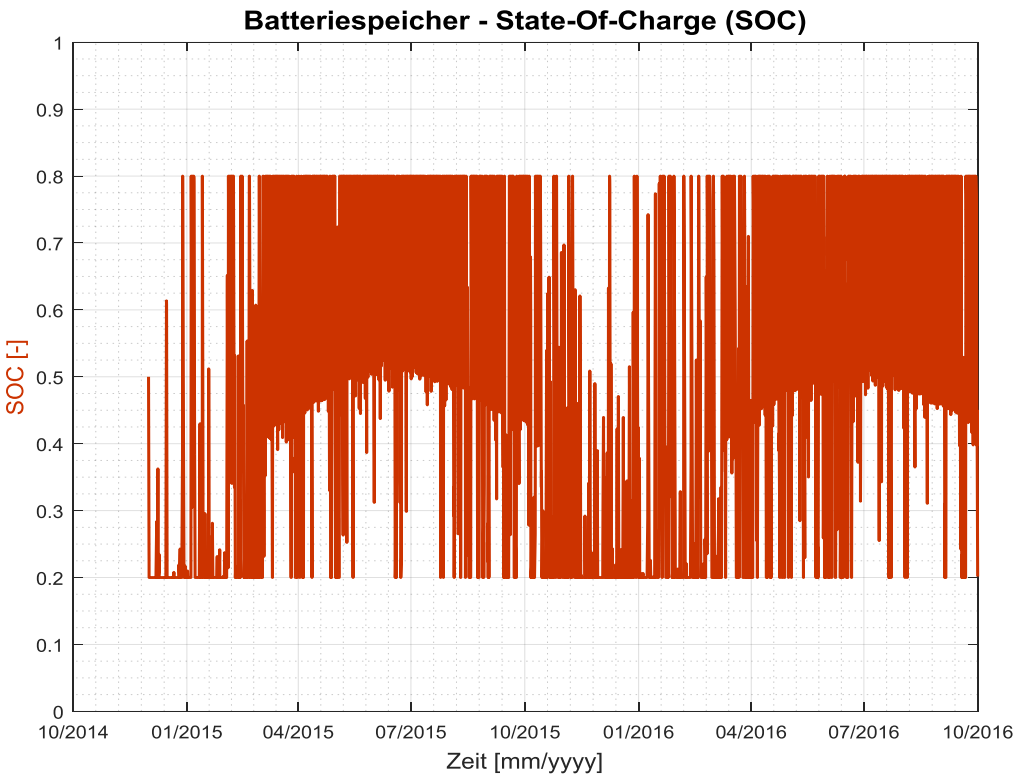


Abbildung 5.3-7: State-Of-Charge (SOC) des Batteriespeichers (beispielhaft) (Nennkapazität: 100Ah, Nennspannung: 24V, Anfangsladezustand (SOC0: 0,5)

Der Batteriespeicher stellt physikalisch ein komplexes elektrochemisches Systems dar. Eine detaillierte Nachbildung dieser Vorgänge kann für eine Systemauslegung nicht erfolgen, da dies den Anforderungen an das Modell für den Modellzweck widersprechen würde.

Wie bereits erwähnt, übernimmt der Kompensator die Funktionalität eines unendlich großen Speichers bzw. eines übergeordneten elektrischen Verbundnetzes dar. Dadurch ist die einfache Betrachtung des Gesamtleistungs- bzw. Energiedefizites bzw. -überschusses möglich.
Abbildung 5.3-8 zeigt beispielhaft das Leistungsprofil entsprechend dem Systemmodell mit den bis hier gezeigten Ergebnissen der übrigen Komponenten. Negative Leistung stellt einen Leistungsüberschuss im System dar. Gut zu erkennen ist, dass dies überwiegend in den Sommertagen der Fall hier. Hier wird an manchen Tagen nahezu die gesamte Energieproduktion als Überschuss dem System verloren. In den Wintermonaten hingegen ist das System bei dieser Auslegung nicht in der Lage den Leistungsbedarf mit der Energie aus der PV-Anlage und dem Batteriespeicher zu decken.
Abbildung 5.3-9 zeigt das aus dem Leistungsprofil berechnete Energieprofil. Ein Steigen der Kurve resultiert aus einem Leistungsdefizit, ein fallender Kurvenverlauf resultiert aus einem Leistungsmangel. Bei einem autarken Energiesystem treten keine fallenden Kurvenverläufe auf.

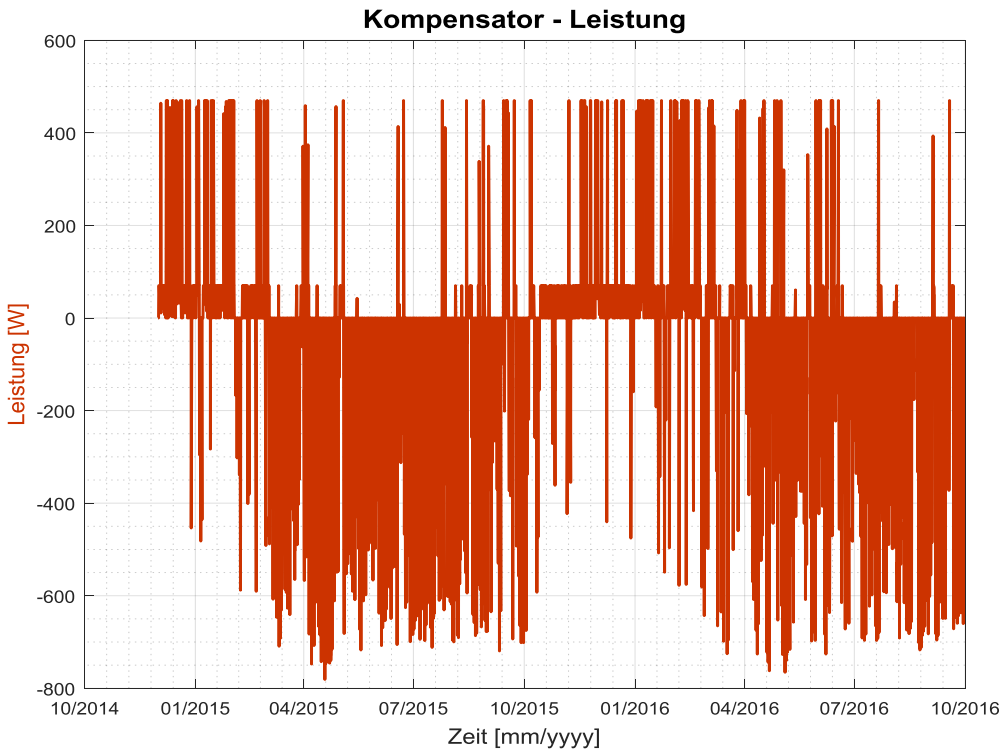


Abbildung 5.3-8: Leistungsprofil des Kompensators (beispielhaft)

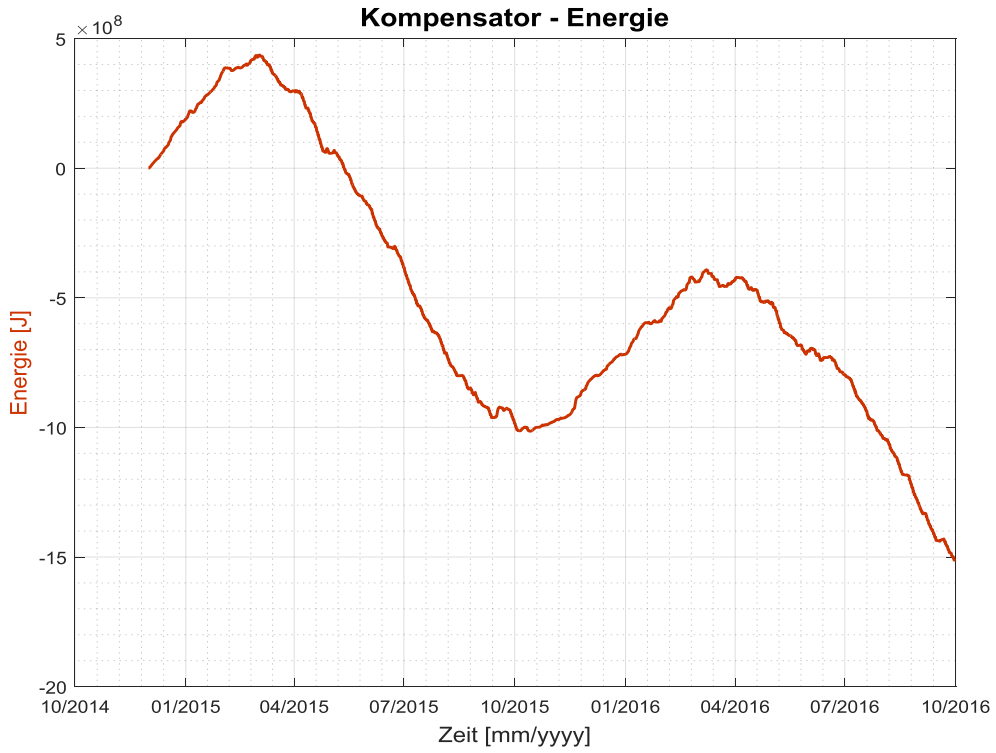
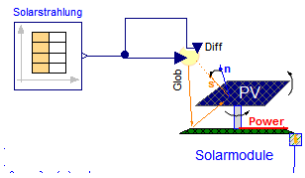
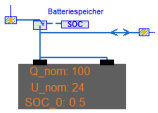
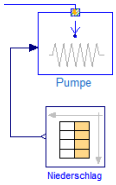


Abbildung 5.3-9: Energieprofil des Kompensators (beispielhaft)

Tabelle 5.3-1 listet die Modellkomponenten auf und gibt eine zusammenfassende Kurzbeschreibung der wesentlichen Merkmale wieder.

Tabelle 5.3-1 Kurzbeschreibung der Modellkomponenten

Diagramm	Bezeichnung	Anmerkung
	PV-Anlage mit Messdaten der Solarstrahlung (Globalstrahlung, Diffusstrahlung) des Deutschen Wetterdienstes von der Messstation in *Tholey*	Anhand der Ausrichtung der PV-Anlage zur Sonne wird aus den Messdaten der Global- und Diffusstrahlung für die parametrierbare Solarmodulfläche und dem Gesamtwirkungsgrad die elektrische Leistung berechnet
	Batteriespeicher	Batterie wird zwischen den Speichergrenzen durch Energieüberschuss der PV-Anlage geladen oder bei einer Minderversorgung entladen. Der Ladezustand (SOC=State- Of.-Charge) wird dabei ausgehend von einem Anfangsladezustand SOC_O berechnet. Anfangsladezustand, die Speicherkapazität und Nennspannung sind parametrierbar.
	Grundlast durch elektrische Dauerverbraucher	Anhand der Messdatenauswertung in der Messperiode wurde eine Grundlast von 70W ermittelt. Sie beinhaltet u.a. das Messequipment und die Systemsteuerungskomponenten.
	Wasserpumpe als Spitzenverbraucher in Abhängigkeit der Niederschlagsmessdaten des saarländischen Landesamtes für Umwelt- und Arbeitsschutzes für *Bergweiler*	Basierend auf den Messdaten der Niederschlagsmenge wird die Pumpe bei Überschreiten eines parametrierbaren Schwellwertes eingeschaltet und bei Unterschreiten wieder ausgeschaltet. Auf diese Weise wird die hier installierte ereignisbasierte Pumpensteuerung nachgebildet. Anhand der Messdaten konnte eine Leistungsaufnahme der Verbraucher im Pumpenbetrieb von ca. 400W ermittelt werden.
	Kompensator gleicht Leistungsdefizit oder -Leistungsüberschuss aus.	Der Kompensator übernimmt die Funktionalität des Versorgungsnetzes. Er gleicht die fehlende oder überschüssige Leistung aus. Diese Funktionalität ermöglicht eine direkte Analyse der Systemverfügbarkeit.
	Wettermodell	In diesem Modell wird der standortabhängige Sonnenverlauf berechnet.
	Zeitmodell	In diesem Modell wird die Simulationszeit in Abhängigkeit des Startdatums wieder in einen kalendarischen Wert und Uhrzeit umgerechnet. Die Werte als Eingangsdaten für das Wettermodell.

Eine charakteristische Kenngröße ist die Verfügbarkeit V des Systems bezogen auf die Leistungsbilanz. Sie wurde bereits eingangs genannt und kann definiert werden als das Verhältnis der Zeit, in der kein Energiedefizit vorliegt, bezogen auf die betrachtete Gesamtzeit (Gleichung 4(4)).

$$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{t_{Gesamt}} - \mathrm{t_{Defizit}}}{\mathrm{t_{Gesamt}}} \tag{4}$$

mit V Verfügbarkeit in [-],
$\mathrm{t_{Gesamt}}$ Gesamtzeit in [s],
$\mathrm{t_{Defizit}}$ Gesamtzeit, in der Energiedefizit herrscht in [s]

Die benötigten Daten zur Berechnung können dem Leistungsprofil des Kompensators entnommen werden.
Im Folgenden werden Angaben zur energetischen Systemverfügbarkeit für verschiedene Kombinationen von Batterienennkapazität und Pumpenschaltschwellwert am Simulationsmodell untersucht mit dem Ziel ein energieautarkes System für die gegebenen Eingangsmesswerte auszulegen.

Neben den Leistungswerten der Grundlast von 70W und dem Pumpensystem im Betrieb von 400W liegen folgende Parameterwerte allen Simulationen zugrunde:

- Batterie
  - SOC_0=0.9 (zu Beginn vollständig geladene Batterien)
  - SOC_{min} = 0,1 (Tiefentladeschutz bei 10% der Ladekapazität)
  - SOC_{max} = 0,9 (Überladeschutz bei 90% der Ladekapazität)

- PV-Anlage
  - Modulanstellwinkel 45°
  - PV-Anlagen-Azimutwinkel 0° (Südausrichtung)
  - Wirkungsgrad 10%

Nachfolgende Tabelle 5.3-2 zeigt die Ergebnisse der untersuchten Systemkonfigurationen.

Tabelle 5.3-2: Ergebnisse der Fallstudien

Speicherkapazität des Batteriesystems [Ah] / [kWh]	**Schwellwert der Niederschlagsmenge zur Pumpensteuerung [mm]**	**Verfügbarkeit [%]**
100Ah / 2,4Wh	1mm	75,66%
	5mm	79,05%
	10mm	79,13%
500Ah / 12kWh	1mm	81,38%
	5mm	83,21%
	10mm	83,23%
3.000Ah / 72kWh	1mm	88,22%
	5mm	92,83%
	10mm	92,88%
5.000Ah / 120kWh	1mm	95,03%
	5mm	99,21%
	10mm	99,36%
6.000Ah / 144kWh	1mm	96,91%
	5mm	100%
	10mm	100%

Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass bei einer Speicherkapazität von 6.000Ah bzw. 144kWh und einer Pumpenschaltschwelle bei einer Niederschlagsmenge von 5mm durchaus ein energieautarkes System ausgelegt werden kann. Jedoch stehen die Kosten und der Platzbedarf für ein solches Speichersystem in keinem Verhältnis zum Nutzen. Abbildung 5.3-10 zeigt das entsprechende Leistungsprofil des Kompensators, Abbildung 5.3-11 das dazugehörige Energieprofil.

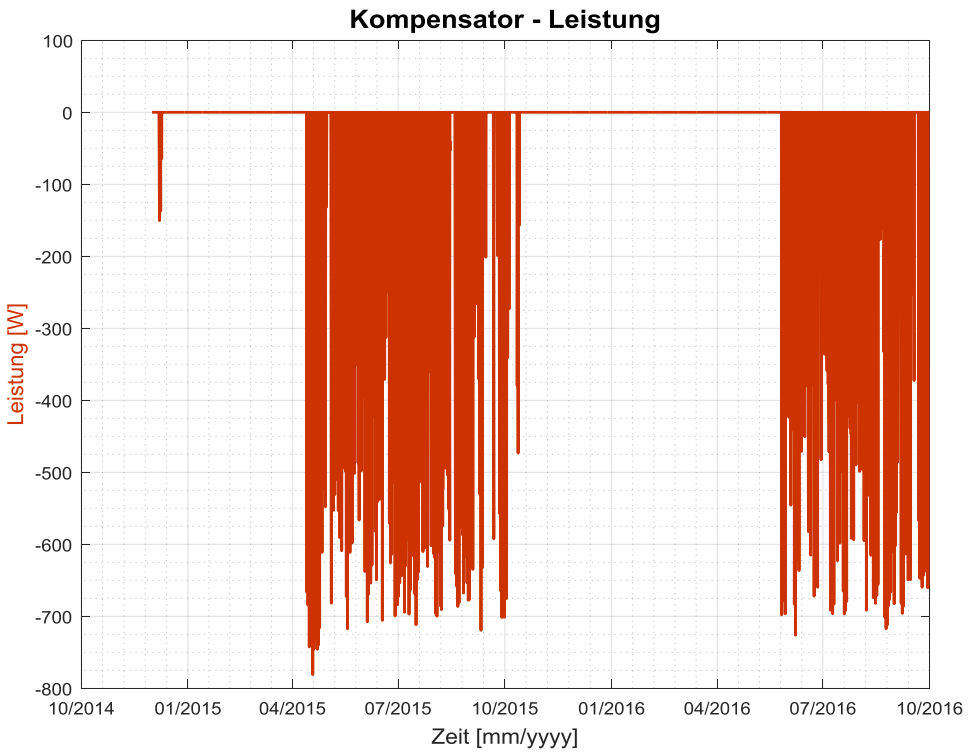


Abbildung 5.3-10: Leistungsprofil des Kompensators für die Systemkonfiguration mit Speicherkapazität von 6.000Ah und Pumpenschaltschwelle von 5mm Niederschlagsmenge.

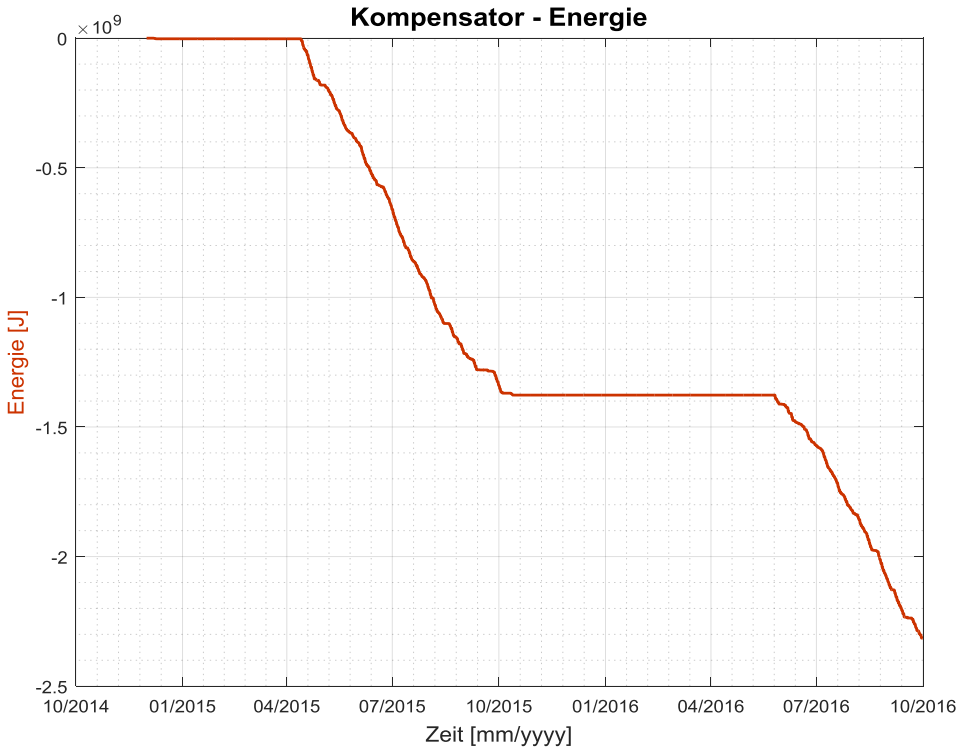


Abbildung 5.3-11: Energieprofil des Kompensators, für die Systemkonfiguration mit Speicherkapazität von 6.000Ah und Pumpenschaltschwelle von 5mm Niederschlagsmenge

Eine vergleichende Simulation zeigt, dass bei einer Verdopplung der PV-Modulfläche auf 15,6m² eine Speichergröße von 2.000Ah ausreichend ist, um eine energetische Systemverfügbarkeit von 100% zu erreichen.

Als problematisch stellt sich im betrachteten Zeitraum der durchgehende Leistungsbedarf in den sonnenstrahlungsarmen Wintertagen dar. Zur Senkung dieser Grundlast wäre ein Lösungsvorschlag daher eine mehrstufige Abschaltung der Grundverbraucher. Dies setzt jedoch entsprechende Hardware (Messausrüstung und Steuerung) voraus, die selbständig ohne Benutzereingriff bei Anschalten in einen betriebsbereiten Modus gelangen kann.

5.4 Entwicklung einer intelligenten, prädiktiven Steuerung

Durch die zentrale und kontrollierbare Energieproduktion mittels Kraftwerken (z.B. Kohle) und der Energieverteilung von diesen in die Umgebung ist man insbesondere in den Industrieländern eine hohe Verfügbarkeit der benötigten Energie und Zuverlässigkeit der Energieverteilung gewohnt. Aufgrund der minimalen Speicherfähigkeit der Verteilnetze muss zu jedem Zeitpunkt die Menge an erzeugter Energie gleich der Menge an verbrauchter Energie sein.
Mit dem derzeit andauernden Wandel der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energiequellen an der Gesamtenergieproduktion findet nicht nur eine Veränderung dieser bisherigen Struktur zu einer dezentralen Energieproduktion statt, es stellen sich auch erhöhte Anforderung an die Kontrollierbarkeit der Energieproduktion. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass der Mensch keinen Einfluss z.B. auf die Sonneneinstrahlung und Windbedingungen hat, welche teils mit hohen regionalen wie auch zeitlichen Schwankungen behaftet sind. Neben der Verwendung von Speichersystemen ist die Information über die Energieproduktion aus erneuerbaren Energiequellen zu einem Zeitpunkt in der Zukunft zusammen mit einer darauf angepassten Steuerung von Verbrauchern ein vielversprechender Ansatz.
Hinsichtlich der Vorhersagen können drei Methoden unterschieden werden, welche in Tabelle 5.4-1 gegenübergestellt sind.

Tabelle 5.4-1: Grundlegende Vorhersagemethoden

Methode	Vorhersagezeithorizont	Anmerkung
Zeitreihenanalyse	Mittelfristig (Stunden, Tage)	Von Messwerten unterschiedlicher Wettergrößen und deren Zusammenhang mit der Zielgröße werden Werte in der Zukunft vorhergesagt. Geeignet u.a. für PV- und Windkraftanlagen
Numerische Wettermodelle	Langfristig (Tage, Wochen)	Mit Hilfe komplexer mathematischer Wettermodellen werden zukünftige Wetterkarten berechnet. Geeignet u.a. für PV- und Windkraftanlagen
Himmelsbeobachtung	Kurzfristig (Minuten)	Mit Hilfe der Analyse von Wolken- und Sonnenbewegung kann die zukünftige Solareinstrahlung vorhergesagt werden. Geeignet nur für PV-Anlagen

Im Rahmen dieser Forschung sind zwei studentische Abschlussarbeiten entstanden, welche die mobile Solarstation zum Gegenstand hatten:

1. Development and Investigations on DC-Microgrid Power Management System with Renewable Energy Resources
2. Development of Sky Imaging Based Predictive Control of a Photovoltaic System

Die erste Abschlussarbeit nutzt die Methode der Zeitreihenanalyse zur Vorhersage und behandelt die Themenbereiche:

3. Modellierung des Energiesystems aus PV-Anlage, Batteriespeicher, SEA und schaltbarer elektrischer Pumpe als Last
4. Entwicklung eines Vorhersagemoduls für das zukünftige Energieangebot mit Hilfe von Zeitreihenanalysen
5. Steuerungsentwurf eines einfachen Lastmanagements für die Pumpe in Abhängigkeit des Energieangebotes
6. Steuerungsentwurf eines erweiterten Lastmanagements für die Pumpe in Abhängigkeit des vorhergesagten Energieangebotes

Die zweite Abschlussarbeit nutzt die Methode der Himmelsbeobachtung zur Vorhersage und behandelt die Themenbereiche:

1. Ansteuerung eines PV-Moduls mit einachsiger Nachführung
2. Entwicklung eines Cloud-Tracking-Algorithmus (CTA) zur Vorhersage der PV-Leistungsproduktion
3. Entwicklung einer Hardwareumgebung zur Einbindung des CTA
4. Entwicklung eines Power-Management-Systems unter Einbindung des CTA

Abschlussarbeit 1:

In Anlehnung an das in dieser Machbarkeitsstudie betrachtete mobile Solarmesssystem wurde im Rahmen der studentischen Abschlussarbeit ein Simulationsmodell erstellt, welches als Grundlage für die Untersuchung des Systemverhaltens unter Verwendung der entwickelten prädiktiven Steuerungsalgorithmen dient.

Das Modell besteht aus den Hauptkomponenten (siehe Abbildung 5.4-1):

- PV-Anlage
- Schaltbare Last
- Stromerzeugeraggregat
- Batteriespeicher

Wie im Realsystem, der mobilen Solarstation als Gegenstand dieser Machbarkeitsstudie, dient die Pumpe dazu, Wasser zum Zweck der Wasseranalyse umzupumpen.

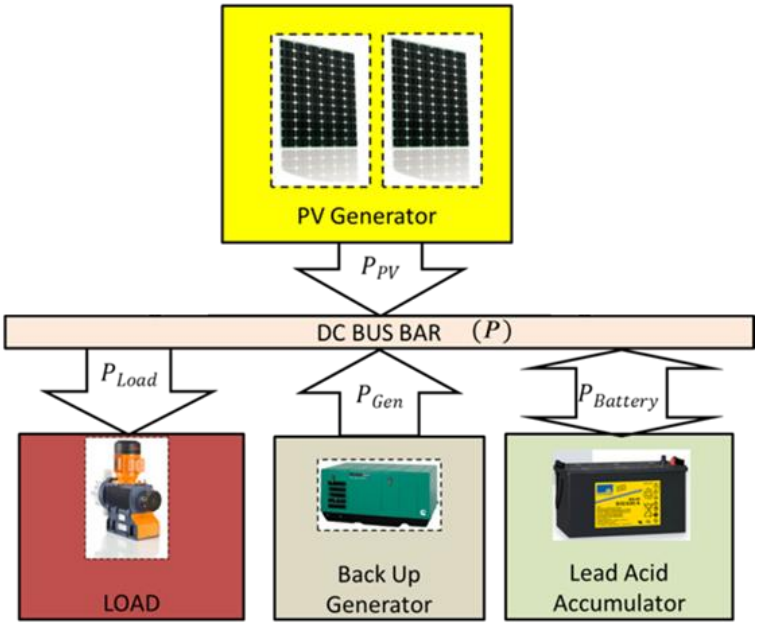


Abbildung 5.4-1: Systemmodell mit PV-Anlage, schaltbarer Last, SEA und Batteriespeicher

Für die Analyse von Zeitreihen zur Prädiktion der Zielgröße stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Aufgrund der möglichen Komplexität der Mustererkennung innerhalb der Daten werden auch hier rechenstarke Computer verwendet, weshalb oftmals der Fachbegriff *Machine Learning* verwendet wird. Bekannte Methoden sind z.B. *Künstliche Neuronale Netze*, *Regression* oder *Support Vector Machine*.
Untersuchungsergebnisse in der Literatur zeigen, dass die letztgenannte Methode einen vielversprechenden Ansatz darstellt. Die Schwierigkeit bei allen Methoden ist einerseits die Auswahl der Trainingsdaten (Zeitraum, Messgrößen, usw.), da das gesamte Verhalten in diesem Zeitraum abgebildet sein sollte, als auch die Parameter der Methode. Daher herrscht hier ein großer „Spielraum“ für die Optimierung des Prädiktionsmodells.
Im Rahmen der Abschlussarbeit wurden folgende SVM-Parameter für die Lern- und Prädiktionsphase gewählt:

- Tageszeit
- Maximale Außenlufttemperatur
- Luftfeuchtigkeit
- Sonnenscheindauer
- Solare Einstrahlung

Abbildung 5.4-2 zeigt den Vergleich von Messdaten und Vorhersagewerten für die solare Einstrahlung basierend auf dem SVM-Vorhersagemodell. Zu erkennen ist eine gute Übereinstimmung mit einem mittleren absoluten prozentualen Fehler von 13%.

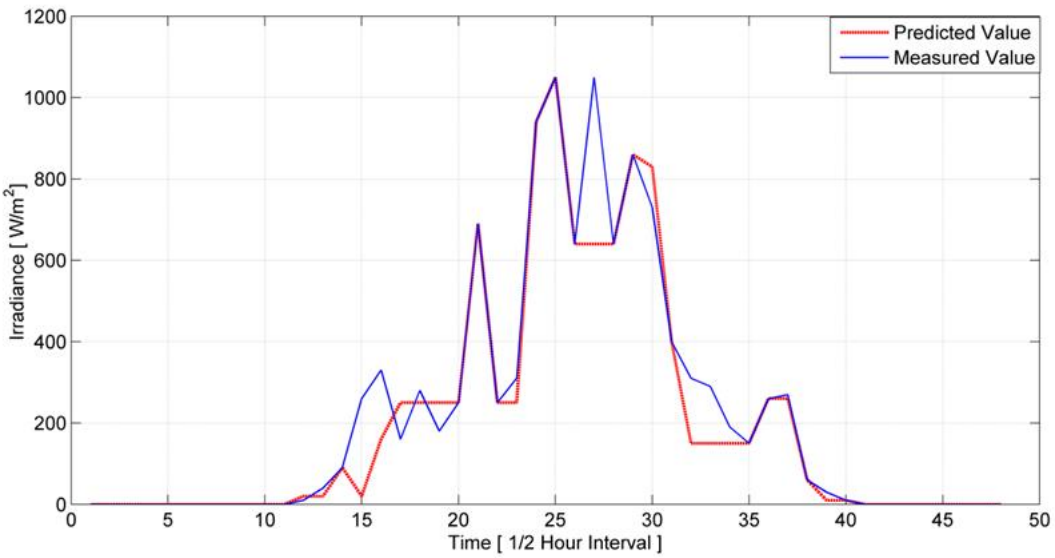


Abbildung 5.4-2: Vergleich zwischen Messdaten und vorhergesagten Werten für die solare Einstrahlung im halbstündlichen Zeitintervall

Im dritten Arbeitspaket wurden zwei Algorithmen zur Steuerung der Pumpe als schaltbare Last entwickelt und erprobt.
Algorithmus 1 (einfache Steuerung) verwendet lediglich die Information über die momentane Energieproduktion aus PV-Anlage und dem Ladezustand (*State-of-Charge, SOC*) der Batterie und schaltet das SEA erst ab einem bestimmten SOC zur Ladung der Batterie zu.
Algorithmus 2 (prädiktive Steuerung) verwendet zusätzlich die Information über die vorhergesagte PV-Leistung und schaltet die Pumpe auch dann an, wenn der momentane Ladezustand der Batterie oder die momentane PV-Produktion gering ist, jedoch die vorhergesagte PV-Leistung für den Pumpenbetrieb ausreichend ist.
Abbildung 5.4-3 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der Studie. Für verschiedene Batteriespeichergrößen wurde die Anzahl der möglichen Pumpzyklen, in denen eine Messung der Wasserqualität erfolgt, ermittelt. Hierbei ist gerade bei kleinen Speichergrößen der Vorteil der prädiktiv arbeitenden Steuerung zu erkennen.
Im Ergebnis kann gesagt werden, dass eine Laststeuerung unter Einbeziehung von Vorhersagewerten zu einer erhöhten Verfügbarkeit führt und auch Kosten für Energiespeicher minimieren kann.

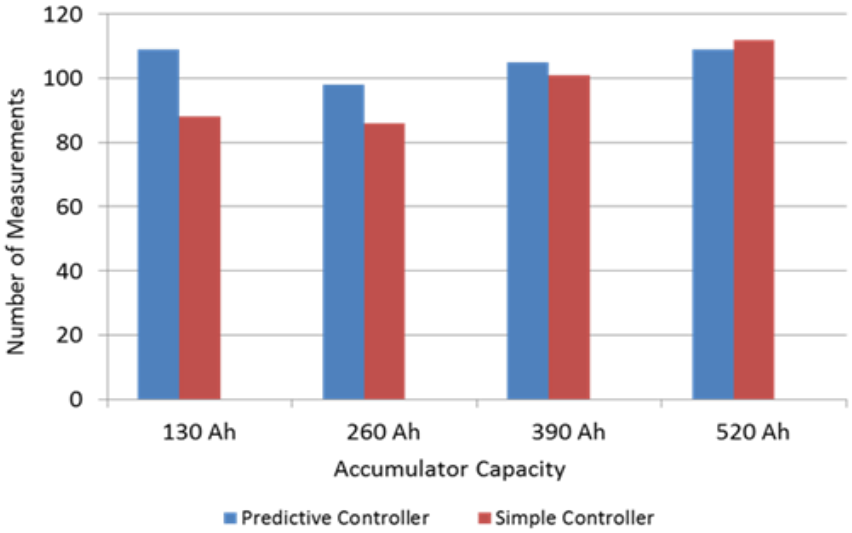


Abbildung 5.4-3: Vergleich zwischen einfacher Steuerung und Steuerung mit Nutzung von Vorhersagewerten anhand der Anzahl von Schaltsequenzen der Wasserpumpe zur Probenmessung für verschiedene Speicherkapazitäten von Batteriespeichern

Abschlussarbeit 2:
Eine weitere Verbesserung neben dem in der ersten Abschlussarbeit verfolgten Ansatz zur prädiktiven Steuerung auf der Seite der elektrischen Last (Lastmanagement) ist die Verbesserung der Energieausbeute aus der PV-Anlage (Power-Management).
Zu diesem Zweck wird im ersten Schritt die PV-Anlage mit einer Vorrichtung zur einachsigen Nachführung der Solarmodule erweitert, wodurch Ertragssteigerungen von 15-20% möglich sind. Hierzu wurde nach einem Konstruktionsmodell ein Demonstrator aufgebaut (siehe Abbildung 5.4-4), welcher in dieser Abschlussarbeit Verwendung findet.
In der Fachliteratur existieren Forschungsergebnisse, wonach die Energieausbeute einer nachgeführten PV-Anlage bei vollständiger Bewölkung bei einer horizontalen Stellung der Module größer ist als bei der Modulposition senkrecht zur Sonneneinstrahlung. Dies ist dadurch begründet, dass bei bewölktem Himmel der Anteil der diffusen hemisphärischen Himmelsstrahlung im Verhältnis zur direkten Sonnen größer ist.
In einem weiteren Schritt wird deshalb, ebenfalls im Rahmen dieser studentischen Arbeit, ein System entwickelt, welches dieses Steuerungsprinzip und darüber hinaus auch die Vorhersage des Bewölkungsgrades umfasst.

Abbildung 5.4-4: 3D-Konstruktionsmodell (links) und Demonstrator (rechts) einer einachsigen Nachführung für die PV-Anlage zur Erprobung des Cloud-Tracking-Systems

Die benötigte Hardwareumgebung zur Umsetzung der Steuerung des PV-Moduls und der Cloud-Tracking Methode sind mit sehr geringen Anschaffungskosten verbunden.
Die Hauptkomponenten sind in Abbildung 5.4-5 und Abbildung 5.4-6 dargestellt:

- statische Kameraeinheit: sie besteht aus einem digitalen Kameramodul mit einer Fish-Eye-Linse (siehe Abbildung 5.4-5)
- Einplatinen-Computer (Raspberry Pi): Dieser führt nach einer berechneten Sonnenlaufbahn das PV-Modul entsprechend der Sonnenposition nach, ermittelt aus den Himmelsaufnahmen die erforderlichen Parameter und errechnet hiermit den zukünftigen Bewölkungsgrad.
- PV-Modulkonstruktion: Diese Einheit beinhaltet den Elektromotor, den Sensor für den Modulanstellwinkel und das PV-Modul.

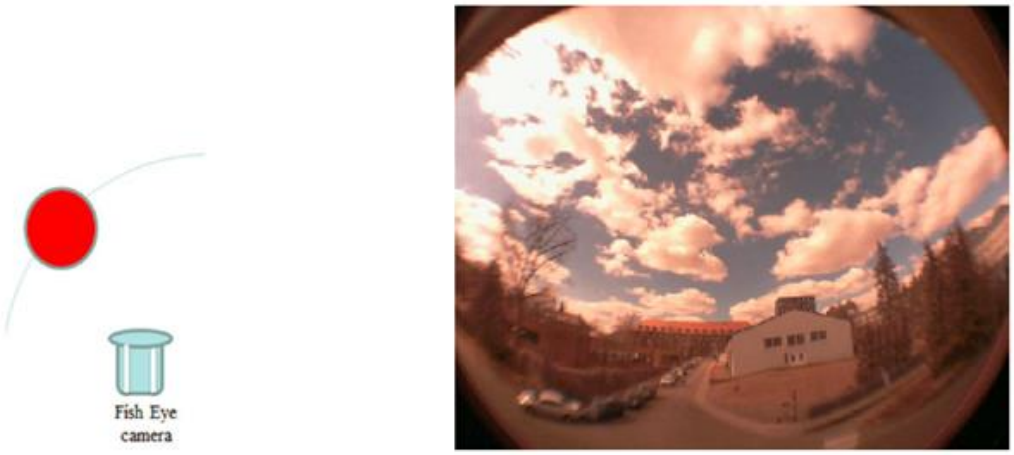


Abbildung 5.4-5: Beispiel des Kamerasystems mit Fish-Eye-Linse

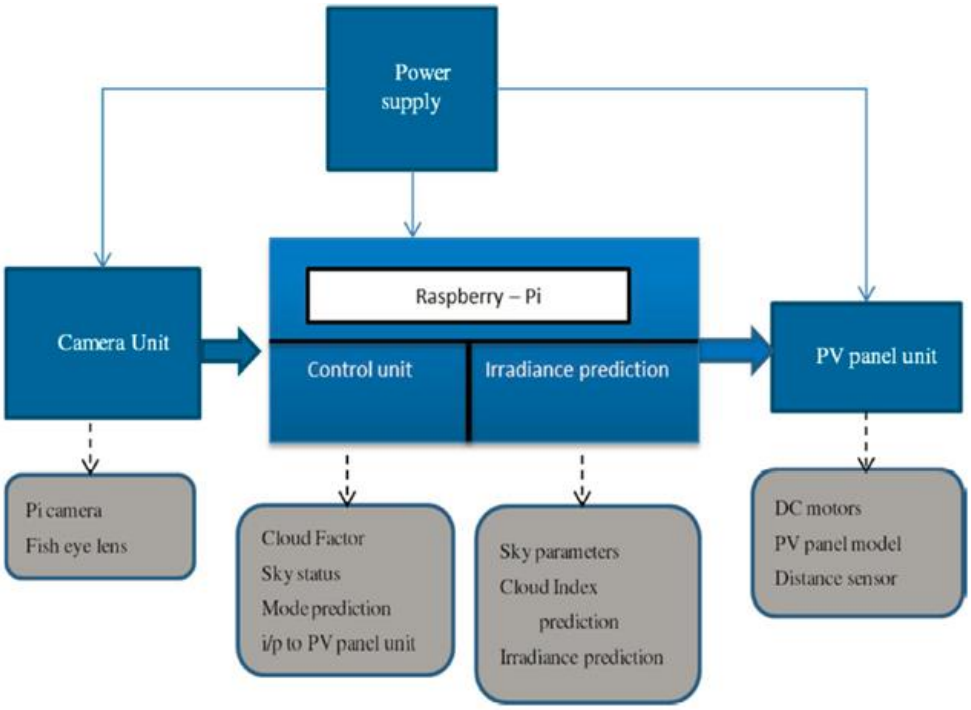


Abbildung 5.4-6: Gesamtsystem aus Kameraeinheit, Einplatinen-Computer (*Raspberry-Pi*) und PV-Anlage mit den entsprechenden Funktionen bzw. Komponenten

Der grundlegende Mechanismus zur Ermittlung des Bewölkungsgrades (*Cloud-Factor*) basiert auf folgenden Einzelschritten:

1. Ermittlung der Wolkenpixel aus der Himmelsaufnahme anhand eines Schwellwertes im Verhältnis des roten und blauen Farbkanals (siehe Abbildung 5.4-7). Das Verhältnis von Wolkenpixel zu Himmelspixel ergibt den Bewölkungsgrad (siehe Abbildung 5.4-8).
2. Einteilung des Himmels in die drei Kategorien: freier Himmel, teilweise bewölkter Himmel, vollständig bewölkter Himmel.
3. Trainieren eines Regressionsmodells anhand der Bewölkungsgrade und der Kategorien eines vergangenen Zeitintervalls zur Vorhersage der zukünftigen Bewölkungsgrade

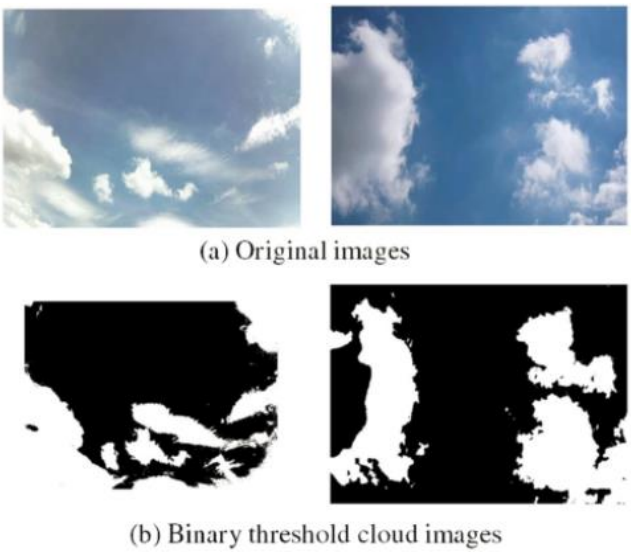


Abbildung 5.4-7: Ermittlung der Wolkenpixel (b) aus der Himmelsaufnahme (a)

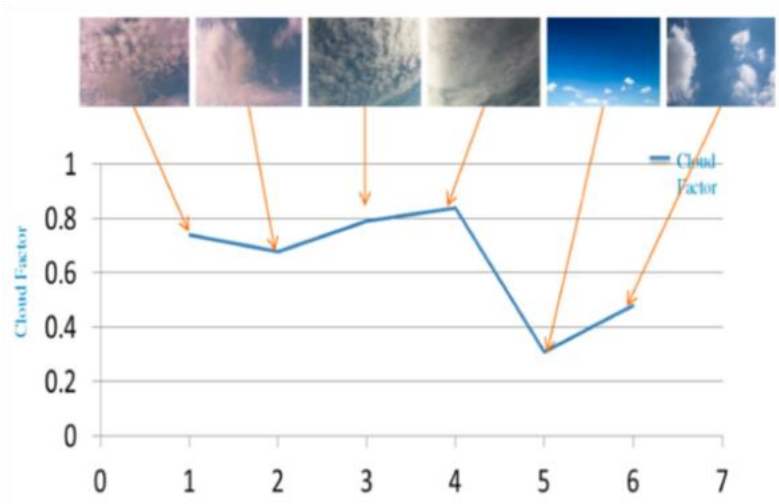


Abbildung 5.4-8: Beispielfotos mit jeweils berechneten Bewölkungsgraden

Durch den Vergleich von aktuellem zu einem zukünftigen berechneten Bewölkungsgrad wird entweder der Modus Sonnenstandsnachführung oder Horizontale PV-Modulstellung gewählt, wobei bei unterschiedlichen Modi zugunsten des zukünftigen Wertes priorisiert wird.
Abbildung 5.4-9 zeigt die Funktionsweise des Systems für unterschiedliche Bewölkungsgrade.
In der Abschlussarbeit konnte aufgrund ausstehender Messwerte zum Energieverbrauch der Motoren und der PV-Energieproduktion keine abschließende Energiebilanz ermittelt werden.
Der positive Effekt wird sich mit steigender PV-Modulfläche, welche mit einem Motor bewegt wird verstärken.

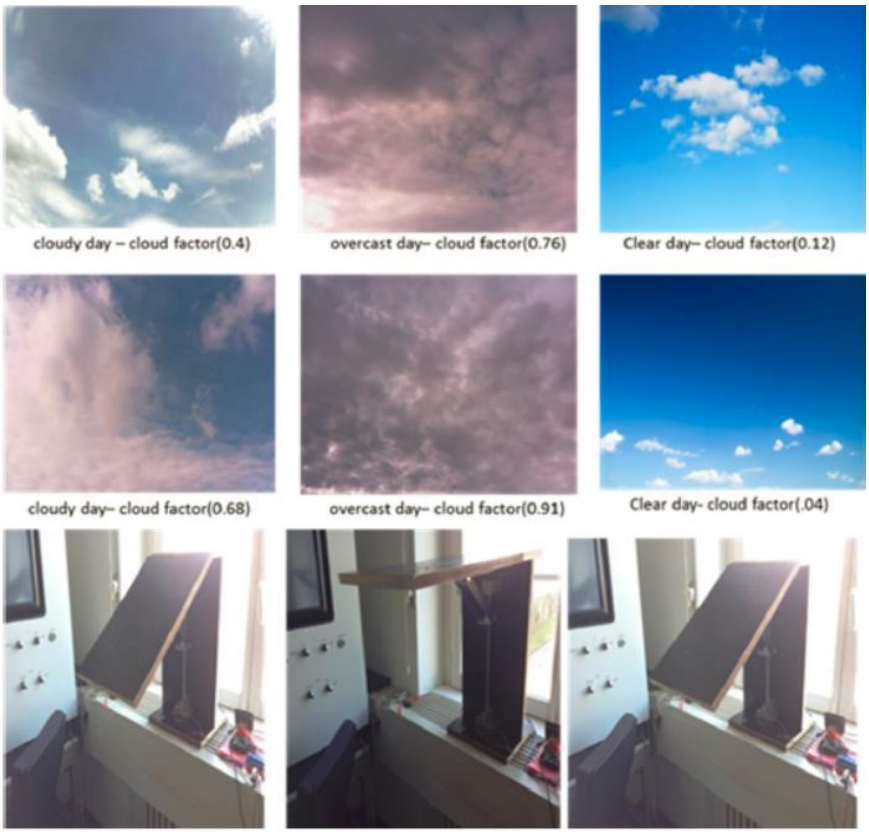


Abbildung 5.4-9: Demonstration der Funktionsweise des Systems bei unterschiedlichen Bewölkungsgraden

5.5 Herausforderungen beim Versuchsaufbau und -ablauf

Am ersten Standort in *Tholey* traten beim Abschlag aus dem Regenüberlauf so große Mengen an Papier u.ä. aus, dass sich die Pumpe bei einem Abschlagsereignis sofort zusetzte und kein Wasser mehr gefördert werden konnte. Um dies zu vermeiden, wurde die Pumpe in einem perforierten Plastikrohr im Gewässer eingebracht und mit Drahtseil befestigt (siehe Abbildung 5.5-1).

Abbildung 5.5-1 Installation der Pumpe im Gewässer

Obwohl die Schläuche mit starkem Gefälle verlegt waren und daher beim Stoppen des Pumpbetriebes leerlaufen sollten, blieb dennoch ein kleiner Rest im Zulaufschlauch direkt oberhalb der Pumpe zurück. Bei Minustemperaturen im Januar gefror dieses Wasser zu Eis, so dass bei Betrieb der Pumpe kein Flusswasser mehr in die Solarstation gefördert werden konnte. Dieses Problem wurde durch Abringen eines Frostschutzheizkabels (Rohrbegleitheizung) behoben. Allerdings schlagen solche Installation mit einem zusätzlichen Stromverbrauch zu Buche. Im Gegensatz dazu war das Wasser im Probentopf zu keinem Zeitpunkt gefroren. Dennoch soll eine automatisierte, leichte Temperierung des Probentopfes vorgesehen werden (vgl. Kapitel).

Unter realen Bedingungen im Gelände traten technische Probleme zutage, die zuvor im Testbetrieb nicht festgestellt werden konnten. Da diese Defizite nicht im Gelände behoben werden konnte, wurde die Solarstation Mitte Mai wieder an die Universität gebracht. Die Arbeiten konnten Ende Juni abgeschlossen werden. Allerdings konnte die Station nicht an ihrem ursprünglichen Standort in *Tholey* aufgebaut werden, da der Theelbach im Sommer trockenfällt und somit kein Vorfluter für die Messungen vorhanden ist. Daher wurde ein Alternativ-Standort gesucht und die Station dann in *Bergweiler* installiert (vgl. Kapitel 4.7).
Der Zeitpunkt zur technischen Überholung der Solarstation wurde bewusst gewählt in der Annahme, dass im Juni wenig Regen fällt und somit kaum Abschlagsereignisse zu erwarten wären. Allerdings traten die Niederschläge im Jahr 2016 eher unvorhersehbar auf. In der letzten Maidekade und Anfang Juni verursachten im Westen und Süden Deutschlands heftige Gewitter mit Sturm, Starkregen und Hagel örtlich schwere Schäden und der Sommer begann „mit gebietsweise katastrophalen Regenmengen“ [DWD 2016]. Doch bereits im Juli ging die Gewitterhäufigkeit deutlich zurück, und diese blieben im August meist aus, so dass im August und September eine Hitzewelle mit ungewöhnlicher Trockenheit verzeichnet wurde. Aus diesem Grund erfolgte am Standort in Bergweiler kein Abschlag am gewählten Bauwerk, so dass keine Messungen durchgeführt werden konnten. Lediglich ein einziges Mal wurde beobachtet, dass ein wenig Wasser aus dem Abfluss herauslief, allerdings war die Menge so gering, dass sie vom Ultraschallsensor nicht detektiert werden konnte und die Pumpe nicht aktiviert wurde. Auf Grund der sehr geringen Abwassermenge ist davon auszugehen, dass diese auch kaum im Gewässer messbar gewesen wäre.

5.6 Schwierigkeiten der chemischen Messungen

Während sich die Sonden für Sauerstoff, Leitfähigkeit und Trübung als sehr zuverlässig und robust erwiesen und auch Phasen ohne Wasser problemlos überstanden, stellte sich die inonensensitive Sonde als problematisch heraus.
Inonensensitive Sonden finden v.a. für die Detektion von Ammonium hauptsächlich in Belebungsbecken von Kläranlagen Einsatz. Hier sind die Ammonium-Konzentrationen sehr viel höher als in Fließgewässern und die Sonden laufen sehr viel stabiler. In Medien mit geringerer Konzentration bluten sie hingingen in kurzer Zeit quasi aus und reagieren nicht mehr auf Konzentrationsveränderungen. Um dieses Ausbluten zu verhindern, wurde ab Mitte April bei jeder Wartung (wöchentlich oder häufiger) eine Lösung mit hohen Konzentrationen an Ammonium- und Nitrat in das im Probentopf verbliebene Rest-Wasser gegeben, um Ammonium-Gehalte von 1 mg/l und mehr im „Aufbewahrungsmedium“ zu garantieren. Aber auch dieses Procedere blieb erfolglos, lediglich durch einen Austausch der Sensorkartusche (Probenkopf) konnte die Sonde wieder messfähig gemacht werden.
Außerdem wiesen die Ammonium- und Nitrat-Werte trotz werksseitig eingestellter Temperaturkompensation Beeinflussungen durch die Wassertemperatur auf. Dieses Phänomen konnte in Phasen ohne Abschlagsereignisse beobachtet werden und war während der Sommerzeit, wenn sich die Solarstation und somit das im Probentopf verbliebene Wasser im Tagesgang aufheizte und abkühlte, besonders ausgeprägt (siehe Abbildung 5.6-1). Die Tatsache, dass die Kurve von Nitrat

als Anion parallel zur Temperaturkurve verläuft, die Kurve von Ammonium als Kation hingegen jedoch genau entgegengesetzt, untermauert diese Theorie, da in den definierenden Nernst-Gleichungen für die ionensensitiven Elektroden das Vorzeichen[5]. vor dem temperaturabhängigen zweiten Term verschieden ist.

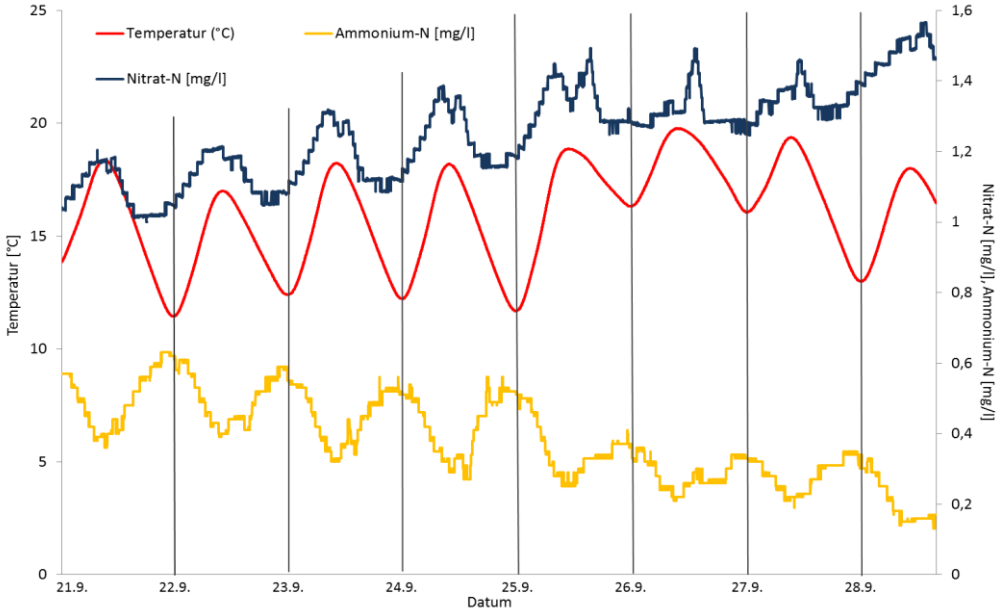


Abbildung 5.6-1: Ammonium- und Nitrat-Werte im Vergleich zur Temperatur (21. bis 28.09.216)

Zudem zeigte sich des Öfteren bereits einige Wochen nach Austausch der Sensorkartusche eine Drift der Ammonium-Werte, welche innerhalb etwa eines Tages zur Anzeige sehr hoher Ammonium-Werte führte (siehe Abbildung 5.6-2).

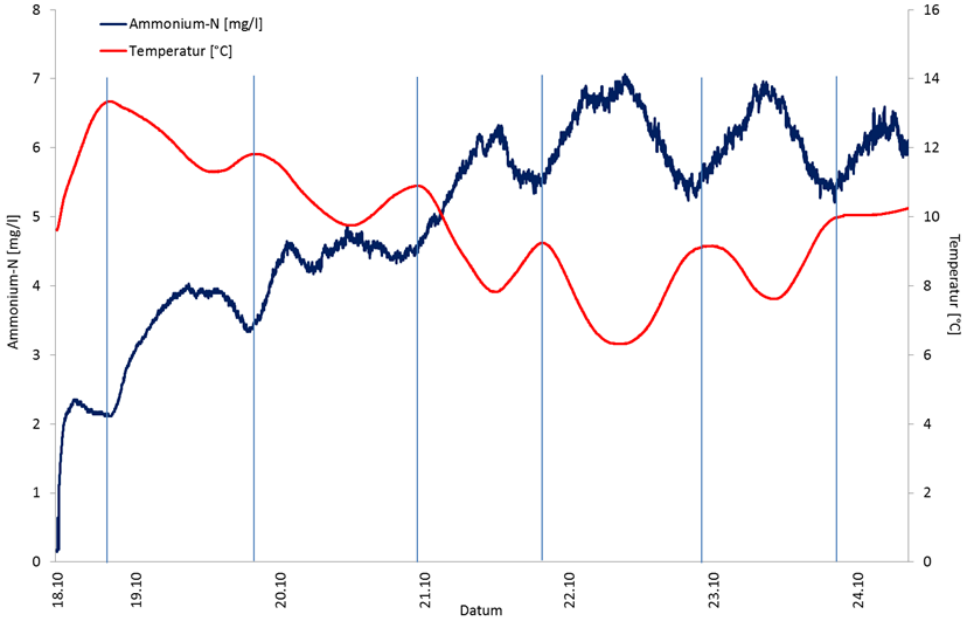


Abbildung 5.6-2: Drift in den Ammonium-Werten und Temperatur zum Vergleich (18. bis 24.10.2016)

Darüber hinaus bleibt zu erwähnen, dass inonensensitive Sonden grundsätzlich sehr wartungsintensiv sind, allerdings reichte selbst die vom Hersteller postulierte wöchentliche Mehrpunkt-Kalibrierungen nicht aus, um verlässliche Messwerte zu erhalten.

[5] Das Vorzeichen „+“ bei Kationen und das Vorzeichen „-“bei Anionen

5.7 Herausforderungen im Bereich Energie und Technik

In Kapitel 4.1 wurden bereits einige Herausforderungen bei der Inbetriebnahme der Solarstation erwähnt. Die Ursachen für die aufgetretenen Schwierigkeiten waren vielfältiger Natur und teilweise nicht nachvollziehbar.
Folgende Schwierigkeiten traten dabei auf:

- Komponentenausfall von Stromerzeugeraggregat (SEA) und PV-Laderegler
  Beide Komponenten standen von Beginn der Projektlaufzeit an nicht mehr zur Verfügung. Während das gasbetriebene SEA für die energetische Bilanzierung verzichtbar war, stellte der PV-Laderegler eine notwendige Komponente dar. Im PV-System als erneuerbare Energiequelle und Hauptenergiequelle des Systems kann ohne den Laderegler keine Energiebereitstellung erfolgen. Demgegenüber wurde als Ersatzenergiequelle für das SEA eine Anbindung an das Stromversorgungsnetz über die am gewählten Messstandort befindlichen Stromverteilerkästen genutzt. Für die Betrachtung des Energiebedarfs war diese Lösung akzeptabel, da die vom Versorgungsnetz bezogene Energie auch von einem SEA oder einer veränderten Dimensionierung des PV-Batteriesystems substituiert werden kann.

- Sporadische elektrische Kurzschlüsse
  Des Weiteren traten sporadische Kurzschlüsse in der elektrischen Verschaltung des ursprünglichen Systems auf. Da die Ursache auch nach längerer Untersuchung nicht gefunden werden konnte, musste der Schaltschrank komplett neu verdrahtet werden. Dazu wurde die Solarstation Ende Mai in Tholey abgebaut und zur Universität zurück gebracht.

- Ursprüngliche Hardwareausstattung genügt nicht den Ansprüchen der beabsichtigen Systemarchitektur (Steuerung und Messtechnik)
  Das ursprüngliche elektrische System bestand aus verteilten Einzelkomponenten zur Steuerung der Komponenten. Diese Konfiguration beschränkte die Erprobung von Steuerungskonzepten sehr. Deshalb wurde ein Großteil dieser Bauteile durch eine Siemens SPS und weitere Bauteile zur Systemsteuerung ersetzt und um elektrische Sensoren ergänzt.

- Zuverlässige Detektion eines Überlaufereignisses im Allgemeinen
  Der Wechsel zu einem diskontinuierlichen, ereignisbasierten Pumpenbetrieb machte die Erfassung von Regenüberlaufereignissen notwendig. An den gewählten Standorten standen jedoch keine entsprechenden Signale bauseits bereit, was auch auf viele weitere Einleitungsstellen zutrifft.

- Zuverlässige Detektion eines Überlaufereignisses mittels Ultraschall-Sensor (Kalibrierung in Regenüberlaufkanälen, Signalqualität am Kanalaustritt)
  Durch das vorgenannte Problem wurde als ein Lösungsansatz der Einsatz eines Ultraschall-Sensors gewählt. Im Betrieb kam es dabei einerseits zu falschen Signalen bei der Installation am Überlaufkanalaustritt. Vermutlich sind diese auf Reflektionen der Schallwellen an den Bauwerkswänden zurückzuführen. Bei der Installation in einem Überlaufkanal stellte andererseits die Ausrichtung und Kalibrierung des Sensors eine Herausforderung dar. Während der begrenzten Anzahl an Überlaufereignissen konnte keine zufriedenstellende technische Lösung gefunden werden.

- Vegetation /Tallage und Verschattung
  Das PV-System stellt die Hauptenergiequelle des Systems dar, jedoch bieten die Messstandorte nicht immer ideale Voraussetzung für eine optimale Energieausbeute. Da Binnenfließgewässer sich meist einerseits in Tallage befinden, andererseits oft eine üppige Vegetation in der Umgebung herrscht, treten Leistungseinbußen durch Verschattung der PV-Module insbesondere in den Zeiten von Sonnenauf- und –untergang auf.

6. Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie sollte eine Strategie entwickelt werden, um im Falle einer Mischwasserentlastung einen verlässlichen Messbetrieb der energieautarken Solarstation zu gewährleisten und so immissionsseitig Beeinträchtigungen des Gewässers zuverlässig zu erfassen.
Zwar konnte ein batch-Betrieb realisiert werden, dennoch erwies sich die Ultraschall-Messung, welche zur Detektion von Abschlagsereignissen am Auslauf des Bauwerkes installiert wurde, nicht als betriebsstabil genug, um alle Ereignisse korrekt zu erfassen. Dies könnte daran liegen, dass das Erfassungsraster, das wegen der Vermeidung von Störungen gewählt werden musste, zu grob war. Dennoch kann das Signal zur Erfassung eines Entlastungsereignisses wegen der zu erwartenden hohen Feststofffrachten nur durch eine berührungsfreie Messung generiert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass ein energieautarker Betrieb bei entsprechender Speichergröße möglich ist, jedoch sind andere Lösungsansätze weniger kostenintensiv. Es wäre daher sinnvoll, zum Einen ein System zur Nachführung der PV-Module zu errichten und zudem ein Energiemanagementsystem zu implementieren, welches die zeitweise Abschaltung einzelner Verbraucher, welche bisher ununterbrochen betrieben werden, ermöglicht.

Da die Energieausbeute nicht für den Einsatz von Online-Photometern oder gassensitiven Systemen ausreicht, musste auf einige neuralgische Parameter wie Phosphor und TOC sowie auch auf die Verwendung eines automatischen Probenehmers verzichtet werden. Die ionensensitiven Sonden zur Erfassung von Ammonium und Nitrat sind jedoch definitiv nicht für den Einsatz in weniger stark belasteten Medien geeignet, da sie über längere Zeit im Gewässer in geringen Konzentrationen quasi „ausbluten“. Darüber hinaus sind sie sehr wartungsintensiv, und selbst die von den Herstellern postulierte wöchentliche Mehrpunkt-Kalibrierungen reicht in der Regel nicht aus, um verlässliche Messwerte zu erhalten.
Es muss festgehalten werden, dass der Parameter-Kanon Sauerstoff, Temperatur, Leitfähigkeit und Trübung ohne gleichzeitige Erfassung der Nährstoffe nicht ausreicht, um Abschläge aus Mischwasserentlastung Ereignisse mit ausreichender Zuverlässigkeit bzw. Genauigkeit zu detektieren und zu bewerten. Zudem zeigte sich an anderen Fließgewässern, dass oftmals Einträge von TOC den größten Einfluss auf die Sauerstoff-Gehalte im Gewässer haben, dieser Parameter im Rahmen des vorgestellten Konzeptes aber nicht verlässlich erfasst werden kann.

Zu klären bleibt dabei die Frage, welche Rolle die Entfernung der Einleitstelle für die Sauerstoffgehalte spielt. Im Zuge der vorausgegangenen Messkampagnen zeigten sich selbst meist dann kaum Sauerstoff-Defizite im Gewässer, wenn die Messstation unmittelbar vor dem Mischwasserentlastungsbauwerk stand (z.B. in *Hassel* und *Tholey*). Im Gegensatz dazu konnten aber an vielen anderen Standorten gravierende, lang anhaltende Sauerstoff-Depressionen aufgezeichnet werden. Daher liegt die Vermutung nahe, dass, je nach Anteil des Regenwassers, Ausprägung des Regenereignisses etc., die Sauerstoff-Konzentrationen im Mischwasser nicht so gering sind, als dass es bei der Durchmischung mit dem Flusswasser zu einer Verdünnung der Sauerstoff-Konzentrationen im Gewässer kommt. Hingegen wird durch den Abbau der eingeleiteten Substanzen im Flussverlauf

zum Teil sehr viel Sauerstoff gezehrt, so dass erst flussabwärts lang anhaltende Sauerstoff-Depressionen auftreten und auch nur flussabwärts und nicht in unmittelbarer Nähe des Einleitpunktes detektiert werden könne.
Unter diesen Umständen scheint es sinnvoll, den Parameter Sauerstoff einige Flusskilometer unterhalb der zu bewertenden Einleitstelle zu erfassen und zu bewerten.

Darüber hinaus kann der durch Abschlagsereignisse auftretende hydraulische Stress, welcher ebenfalls große Auswirkungen auf die Biozönose im Gewässer hat, auch in direkter Nähe zum Einleitpunkt kaum annähernd abgeschätzt werden.

Eine weitergehende Plausibilisierung der im batch-Verfahren erhobenen Messdaten erwies sich grundsätzlich als schwierig, da auf Grund der durch den Pumpbetrieb entstehenden Daten-Sprünge keine Rückschlüsse mehr auf die Zuverlässigkeit der Messdaten gezogen werden können.
Auch die Interpretation der immissionsseitig gemessenen Daten ist problematisch. So kann zwar verfolgt werden, was im Gewässer geschieht, aber die Differenzierung, welcher Einfluss von dem zu überwachenden Bauwerk und welcher z.B. von Oberflächenabfluss oder aber von oberhalb liegenden Einleitungen ausgeht, kann nicht immer abschließend vorgenommen werden

Die Solarstation soll im kommenden Jahr vom Lehrstuhl für Automatisierungs- und Energiesysteme optimiert und erweitert werden. In diesem Zuge werden auch die zuvor beschriebenen geplanten Erweiterungsmodelle realisiert werden. Danach soll die Station weiterhin zur Überwachung der Gewässergüte eingesetzt werden. Es bleibt zu sehen, ob die Station dabei energieautark arbeiten wird oder beide Arten der Stromversorgung (Solarenergie und 220V-Stromanschluss) kombiniert werden müssen, um einen sicheren, effizienten Betrieb gewährleisten zu können. Des Weiteren können auch andere Strategien, wie z.B. ein zeitgesteuerter Pumpenbetrieb (z.B. jede Stunde für die Dauer von 5 Minuten) erprobt werden. So könnte die Solarstation z.B. auch mit einem automatischen Probenehmer gekoppelt werden. Auch wäre der Einsatz anderer Messverfahren, wie z.B. von Spektralsonden, zu prüfen. Allerdings sind diese kaum für Abwasserdetektion bzw. -charakterisierung geeignet, da diese Sonden relative Messwerte erzeugen und seitens der Hersteller keine entsprechenden Kalibrationen existieren. Daher müssten vor dem Einsatz dieser Sonden zunächst umfangreiche Vergleichsmessungen am entsprechenden Standort durchgeführt und diese Ergebnisse dann als Grundlage für eine spezifische Kalibration herangezogen werden (vgl. KOMPETENZZENTRUM WASSER 2009).

7. Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole

AC	AC: engl. Alternating Current (Wechselstrom)
Bzw.	beziehungsweise
CTA	Cloud-Tracking-Algorithmus
DAQ	engl. Data Aquisition (Datenerfassung)
DC	DC: engl. Direct Current (Gleichstrom)
EER	engl. Enhanced-Entity-Relationship (Objektbeziehung)
d.h.	das heißt
etc.	et cetera
ggfs.	gegebenenfalls
GSM	engl. Global System for Mobile Communications
HSDPA	engl.: High Speed Downlink Packet Access
LTE	engl.: Long Term Evolution
MPPT	Maximum-Power-Point-Tracker
PV	Photovoltaik
SEA	Stromerzeugeraggregat
sog.	sogenannt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
u.a.	unter Anderem
UTMS	engl.: Universal Mobile Telecommunications System
vgl.	vergleiche
WRRL	Wasserrahmenrichtlinie
z.B.	zum Beispiel

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1-1: Schema eines Regenüberlaufes (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Abbildung 3.1-2: Schema eines Regenüberlaufbeckens (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Abbildung 3.1.-3: Schema eines Stauraumkanals (Quelle: Stadtentwässerung und Umweltanalytik Nürnberg (SUN), www.nuernberg.de)

Abbildung 3.3.2-1: Energieumwandlungskette

Abbildung 3.3.2-2: Unterteilung der Energiebasis und Möglichkeiten zur Nutzung des Energieangebots

Abbildung 3.3.2-3: Globalstrahlung Jahressummen für Saarland (ARGE Solar, 2016)

Abbildung 3.3.2-4: Flächenfaktor f zur Bestimmung der Globalstrahlung auf geneigte Flächen im Jahresmittel (Energieagentur NRW, 1997)

Abbildung 4.1-1: Ursprüngliche und neue Systemkonfiguration nach Hardwareumbau

Abbildung 4.1-2: Umbau des Schaltschranks

Abbildung 4.2-1: Schematische Darstellung der Solarstation

Abbildung 4.3-1: Teilsystem Probennahme - Sensoren, Aktoren, SPS

Abbildung 4.3-2: SPS Steuerungsalgorithmus - Grundmodul und Erweiterungsmodule

Abbildung 4.3-3: Umsetzung des Grundmoduls in Funktionsblöcke zur Implementierung in die SPS

Abbildung 4.5-1: Messdatenerfassung und Steuersignale in der neuen Systemkonfiguration nach Hardwareumbau

Abbildung 4.6-1: Konzept des Messdatenverwaltungssystems mit Fernwirktechnik

Abbildung 4.6-2: Prototyp des Mess- uns Kommunikationssystems

Abbildung 4.6-3: Enhanced Entity Relationship - Modell der entwickelten Datenbank zur Messdatenspeicherung

Abbildung 4.6-4: Inhalt der einzelnen Datenbanktabellen am Beispiel der Messwerte des Energiesystems

Abbildung 4.7-1: Lage des Messstandortes in *Tholey* (Quelle: Zora, Maßstab ca. 1:9.000)

Abbildung 4.7-2: Standort in *Tholey* (Quelle der Karte: Zora, Maßstab ca. 1:6.000)

Abbildung 4.7-3: Lage des Messstandortes in *Bergweiler* (Quelle: Zora, Maßstab ca. 1:10.000)

Abbildung 4.7-4 Standort in Berg*weiler* (Quelle der Karte: Zora, Maßstab ca. 1:6.000)

Abbildung 4.8-1: Wasserstandssensor über dem Auslauf des Staukanales

Abbildung 4.8-2: Auslauf des Staukanales in *Bergweiler*

Abbildung 4.8-3: Wasserstandssensor unter dem Kanaldeckel in *Bergweiler*

Abbildung 5.1-1: Gehalte von Ammonium und Nitrat sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Abbildung 5.1-2: Temperatur, Sauerstoffgehalte, Leitfähigkeit und Trübung sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Abbildung 5.1-3: Konzentrationen von Ammonium und Nitrat, Leitfähigkeit und Trübung sowie Wasserstand am 08. Februar 2016

Abbildung 5.1-4: Ammonium- und Sauerstoff-Gehalte, Trübung und Leitfähigkeit sowie Wasserstand am 04. und 05. März 2016

Abbildung 5.1-5: Gehalte von Ammonium, Nitrat und Sauerstoff sowie Temperatur, Leitfähigkeit, Trübung und Pumpsignal am 05. April 2016

Abbildung 5.2-1: Konzentrationen von Sauerstoff, Ammonium, ortho-Phosphat, Gesamt-Phosphor und TOC im Stockweiherbach bei Einleitungen durch das RÜB1 *Hassel* (Stundenmittelwerte vom 10. bis 12. Januar 2015)

Abbildung 5.2-2: Sauerstoff-Defizite durch Abschläge von Ammonium- und TOC-haltigen Einträgen sowie Abfluss (Bist in *Wadgassen*; Stundenmittelwerte vom 1. bis 15. November 2012)

Abbildung 5.3-1: Solare spezifische Einstrahlung auf die geneigte PV-Modulfläche vom 06.08.2016 bis 15.08.2016

Abbildung 5.3-2: Hauptenergieflüsse vom 06.08.2016 bis 15.08.2016

Abbildung 5.3-3: Diagramm des Simulationsmodells in Dymola/Modelica

Abbildung 5.3-4 Messwerte zur Global- und Diffusstrahlung im Zeitraum vom 1. Dezember 2014 bis 30.September 2016 (DWD, Wetterstation *Tholey*)

Abbildung 5.3-5: Simulierte elektrische Leistung der PV-Anlage (Modulazimut: 0° (Südausrichtung), Modulanstellwinkel: 45°, Anlagenwirkungsgrad: 10%, Modulfläche: 7,8m², Solarstrahlung (DWD, Wetterstation *Tholey*)

Abbildung 5.3-6: Niederschlagsmesswerte und beispielhafte Pumpenschaltschwelle (1mm) im Zeitraum vom 1. Dezember 2014 bis 30.September 2016 (LUA, Wetterstation *Sotzweiler)*

Abbildung 5.3-7: State-Of-Charge (SOC) des Batteriespeichers (beispielhaft) (Nennkapazität: 100Ah, Nennspannung: 24V, Anfangsladezustand (SOC0: 0,5)

Abbildung 5.3-8: Leistungsprofil des Kompensators (beispielhaft)

Abbildung 5.3-9: Energieprofil des Kompensators (beispielhaft)

Abbildung 5.3-10: Leistungsprofil des Kompensators für die Systemkonfiguration mit Speicherkapazität von 6.000Ah und Pumpenschaltschwelle von 5mm Niederschlagsmenge.

Abbildung 5.3-11: Energieprofil des Kompensators, für die Systemkonfiguration mit Speicherkapazität von 6.000Ah und Pumpenschaltschwelle von 5mm Niederschlagsmenge

Abbildung 5.4-1: Systemmodell mit PV-Anlage, schaltbarer Last, SEA und Batteriespeicher

Abbildung 5.4-2: Vergleich zwischen Messdaten und vorhergesagten Werten für die solare Einstrahlung im halbstündlichen Zeitintervall

Abbildung 5.4-3: Vergleich zwischen einfacher Steuerung und Steuerung mit Nutzung von Vorhersagewerten anhand der Anzahl von Schaltsequenzen der Wasserpumpe zur Probenmessung für verschiedene Speicherkapazitäten von Batteriespeichern

Abbildung 5.4-4: 3D-Konstruktionsmodell (links) und Demonstrator (rechts) einer einachsigen Nachführung für die PV-Anlage zur Erprobung des Cloud-Tracking-Systems

Abbildung 5.4-5: Beispiel des Kamerasystems mit Fish-Eye-Linse

Abbildung 5.4-6: Gesamtsystem aus Kameraeinheit, Einplatinen-Computer (*Raspberry-Pi*) und PV-Anlage mit den entsprechenden Funktionen bzw. Komponenten

Abbildung 5.4-7: Ermittlung der Wolkenpixel aus der Himmelsaufnahme

Abbildung 5.4-8: Beispielfotos mit jeweils berechneten Bewölkungsgraden

Abbildung 5.4-9: Demonstration der Funktionsweise des Systems bei unterschiedlichen Bewölkungsgraden

Abbildung 5.5-1 Installation der Pumpe im Gewässer

Abbildung 5.6-1: Ammonium- und Nitrat-Werte im Vergleich zur Temperatur (21. bis 28.09.216)

Abbildung 5.6-2: Drift in den Ammonium-Werten und Temperatur zum Vergleich (18. bis 24.10.216)

Abbildung 11-1: Reliefkarte des Saarlandes mit Messstandorten

Abbildung 11-2: Innenansicht der Solarmessstation

Abbildung 11-3: Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung während der Messperiode an der Wetterstation in *Tholey* (1. Dezember bis 30. September 2016)

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.5-1: Installierte elektrische Sensoren zur Spannungs-, Strommessung und sonstige Signale

Tabelle 4.5-2: Hauptenergieflüsse im System mit zugehörigen elektrischen Messgrößen

Tabelle 4.7-1: Kenndaten des RÜB 19 in *Tholey*

Tabelle 4.7-2: Kenndaten des RÜB 18 in *Bergweiler*

Tabelle 5.3-1 Kurzbeschreibung der Modellkomponenten

Tabelle 5.3-2: Ergebnisse der Fallstudien

Tabelle 5.4-1: Grundlegende Vorhersagemethoden

Tabelle 11-1: Messparameter sowie Methoden und Messbereiche der verwendeten Messsonden

10. Literaturverzeichnis

ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (ATV) (Hrsg.): Richtlinien für die Bemessung und Gestaltung von Regenentlastungsanlagen in Mischwasserkanälen (ATV-A 128); Hennef; 1992

ABWASSERTECHNISCHE VEREINIGUNG E.V. (ATV) (Hrsg.): 2. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 2.1.1, „Beeinflussung der Gewässergüte durch Mischwassereinleitungen“: Weitergehende Anforderungen an Mischwasserbelastungen: Grundlagen und Vorprüfung (2.Teil) sowie Hinweise zur biologischen Beurteilung mischwasserbelasteter Gewässer. Korrespondenz Abwasser Nr. 44 (5), 922-927; Hennef; 1997

ARGE SOLAR: http://www.argesolar-saar.de/news.php?news_id=324&cat_id=1&rubr_id=3; 2016

DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V (DWA) (Hrsg.): Gewässermonitoring - Strategien und Methoden zur Erfassung der physikalisch-chemischen Beschaffenheit von Fließgewässern, Merkblatt (Entwurf); Hennef; 2016

DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD): https://www.dwd.de/DE/service; 2016

KOMPETENZZENTRUM WASSER BERLIN GMBH (HRSG.): Test und Bewertung von moderner Online-Sensorik zum Kanalnetz- und Gewässermonitoring (Project acronym: MONITOR-1); Berlin, 2009

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (LAU): Ermittlung des Schmutzfrachtpotentials befestigter Flächen am Beispiel des Entwässerungssystems Halberstadt; Vortrag beim Fachkolloquium „Qualifizierte Langzeitsimulation von Mischwassereinleitungen“ am 23.01.2014 in Halle

LANDESAMT FÜR UMWELTSCHUTZ SACHSEN-ANHALT (LAU): Fachinformation Nr. 04/2008 - Hinweise und Empfehlungen für die fachtechnische Prüfung von Anträgen auf Einleitung von Mischwasser in Gewässer; Halle; 2008

MINISTERIUM FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, LANDWIRTSCHAFT, NATUR- UND VERBRAUCHERSCHUTZ DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN (MKULNV): Analyse der Leistungsfähigkeit von Regenüberlaufbecken und Überwachung durch Online Messtechnik (Untersuchungs- und Entwicklungsvorhaben); Düsseldorf; 2015

MEYER, A; FÜNFROCKEN, E.; BECK, H.P. & HEGETSCHWEILER, K.: Überwachung von „at risk“-Gewässern im Saarland in einem online-Monitoring Programm – Bist - Oktober 2012 bis April 2013; Universität des Saarlandes im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz; Saarbrücken, 2013

MEYER, A; FÜNFROCKEN, E.; BECK, H.P. & HEGETSCHWEILER, K.: Studie zur Überwachung von Mischwasser-entlastungsbauwerken am Stockweiherbach in Sankt Ingbert-Hassel; Winter 2014/2015, Universität des Saarlandes im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz; Saarbrücken, 2015

11. Anhang

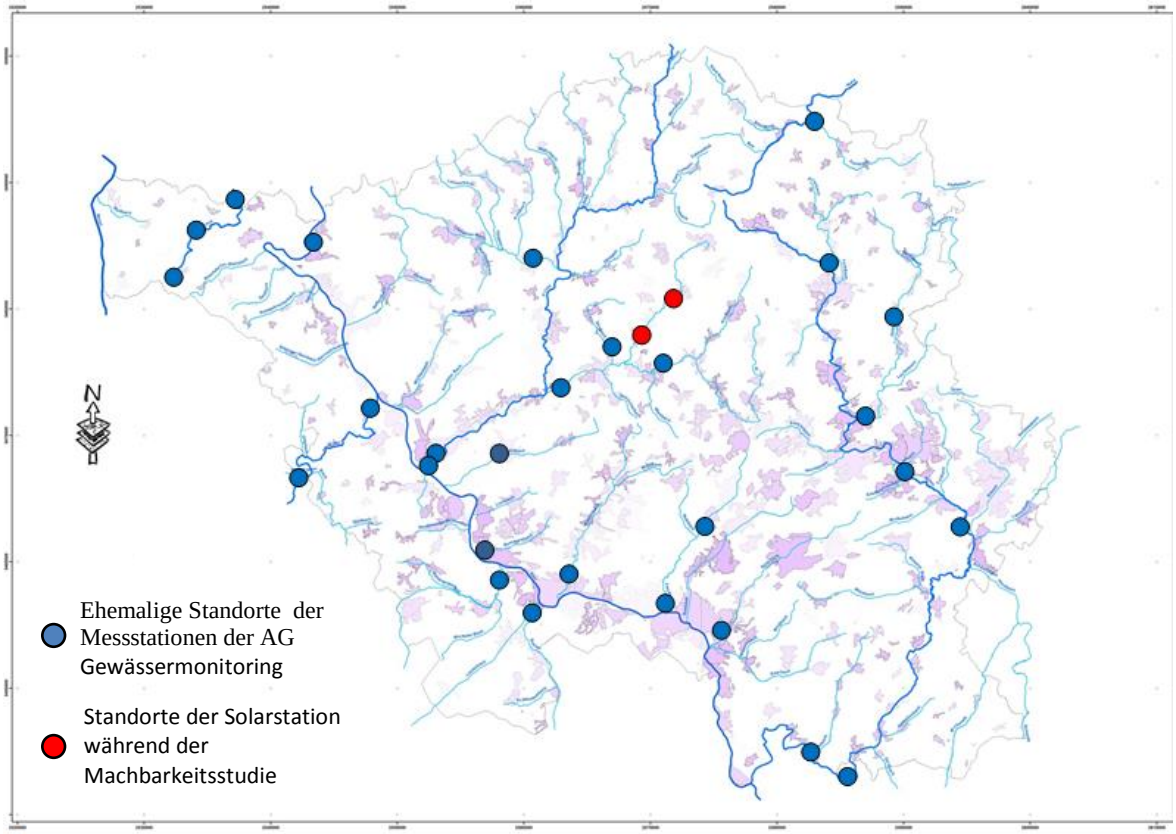


Abbildung 11-1: Reliefkarte des Saarlandes mit Messstandorten

Tabelle 11-1: Messparameter sowie Methoden und Messbereiche der verwendeten Messsonden

Parameter	**Messbereich und Einheit**	**Messprinzip**
Sauerstoff gelöst (O_2)	0 – 20 mg/l	optisch (Lumineszenz)
Leitfähigkeit	0 - 4000 µS/cm	elektrochem./konduktometrisch
Wassertemperatur	0 – 50°C	
Trübung	0 – 100 FNU	nephelometrisch
Ammonium als NH_4-N	0,2 – 1000 mg/l	Ionen-sensitiv
Nitrat als NO_3-N	0,2 – 1000 mg/l	
Kalium (K^+)	*0 – 1000 mg/l*	*(zur Kompensation von Störionen)*
Chlorid (Cl^-)	*0 – 1000 mg/l*	

Abbildung 11-2: Innenansicht der Solarmessstation

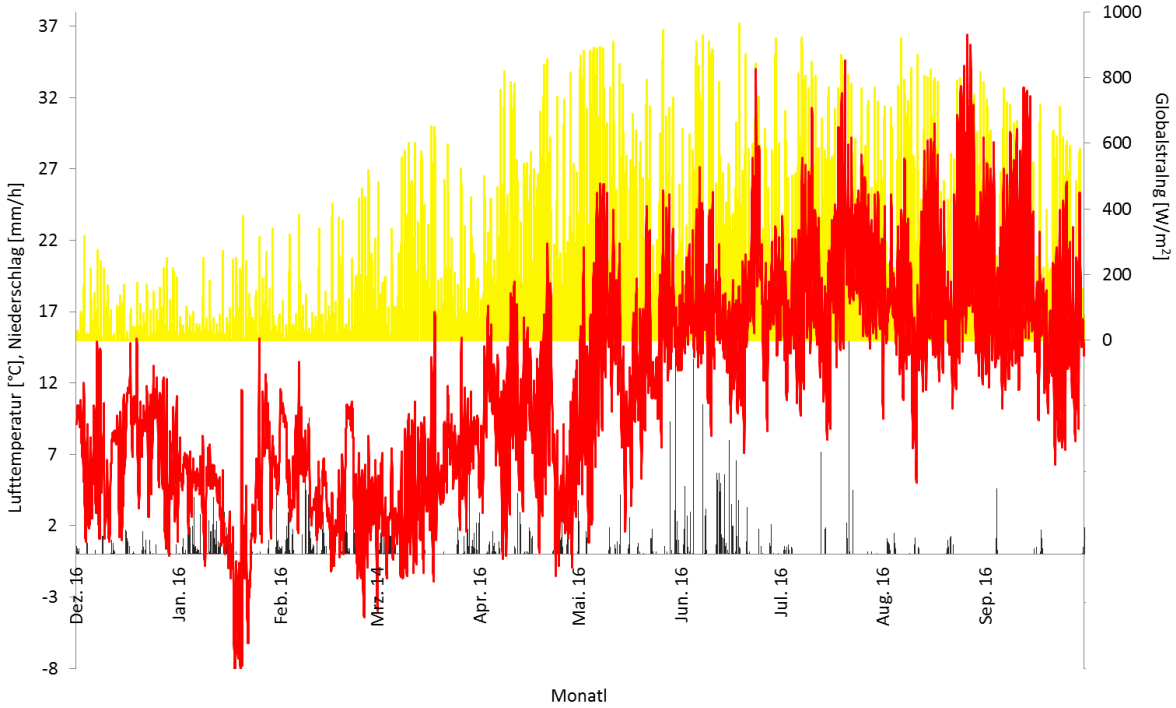


Abbildung 11-3: Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung während der Messperiode an der Wetterstation in Tholey (1. Dezember bis 30. September 2016)