

# Entscheidungsunterstützung bei der Nutzung von Kläranlagen für Agrarsysteme

Markus Junker<sup>1</sup>, Ansgar Bernardi<sup>2</sup>

## Abstract:

Absehbare Entwicklungen wie wachsende Bevölkerung in Städten, knappe Rohstoffe und Düngemittel, oder der Wunsch nach kurzen Transportwegen und regionalen Nahrungsmitteln motivieren neue Visionen für Agrarsysteme und Nahrungsproduktion der Zukunft. Ein innovativer Ansatz zur Nahrungsmittelproduktion besteht in der direkten Nutzung der bei einer Kläranlage anfallenden Ressourcen in einem baulich angegliederten Agrarsystem. Die Nutzung von Nährstoffen in den Stoffströmen der Kläranlage geht mit einigen Herausforderungen einher. Im Projekt SUSKULT<sup>3</sup> wird untersucht, wie eine auf die Bedürfnisse solcher Agrarsysteme ausgerichtete Kläranlage gestaltet sein muss. In unserer Arbeit haben wir den Einsatz von Entscheidungsunterstützung in Form Maschinellem Lernverfahren für die Vorhersage von Stoffkonzentrationen sowie Optimierungsverfahren für die Zusammenstellung von Nährlösungen aus verschiedenen Stoffströmen qualitativ untersucht. Es hat sich gezeigt, dass die entsprechenden Verfahren zumindest theoretisch an verschiedenen Stellen einen Beitrag liefern können.

**Keywords:** Kläranlagen; Agrarsysteme; Nahrungsproduktion; Entscheidungsunterstützung; LSTM; SVM; Interior Point Algorithmus

## 1 Motivation

Absehbare Entwicklungen wie wachsende Bevölkerung in Städten, knappe Rohstoffe und Düngemittel, oder der Wunsch nach kurzen Transportwegen und regionalen Nahrungsmitteln motivieren neue Visionen für Agrarsysteme und Nahrungsproduktion der Zukunft. Das Projekt SUSKULT untersucht einen innovativen Ansatz zur stadtnahen Nahrungsmittelproduktion durch Einsatz von Hydroponik, bei dem die Pflanzen im Rahmen einer Indoor-Kultivierung boden- bzw. erdelos unter Einsatz mineralischer Nährlösungen wachsen und gedeihen. Abbildung 1 zeigt das in SUSKULT geplante Zusammenspiel von Abwassertechnik und Agrarsystemen im Schaubild: Die Abwassertechnik versorgt das

---

<sup>1</sup> Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Trippstadter Str. 122, 67663 Kaiserslautern, Germany markus.junker@dfki.de

<sup>2</sup> Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Trippstadter Str. 122, 67663 Kaiserslautern, Germany ansgar.bernardi@dfki.de

<sup>3</sup> Das Projekt „SUSKULT – Entwicklung eines nachhaltigen Kultivierungssystems für Nahrungsmittel resilienter Metropolregionen“ (FKZ 031B0728) wird im Rahmen der Fördermaßnahme „Agrarsysteme der Zukunft“ im Rahmen der »Nationalen Forschungsstrategie „BioÖkonomie 2030“ der deutschen Bundesregierung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Agrarsystem mit Wärme, Wasser, Kohlendioxid sowie zum Pflanzenwachstum notwendigen Nährstoffen.

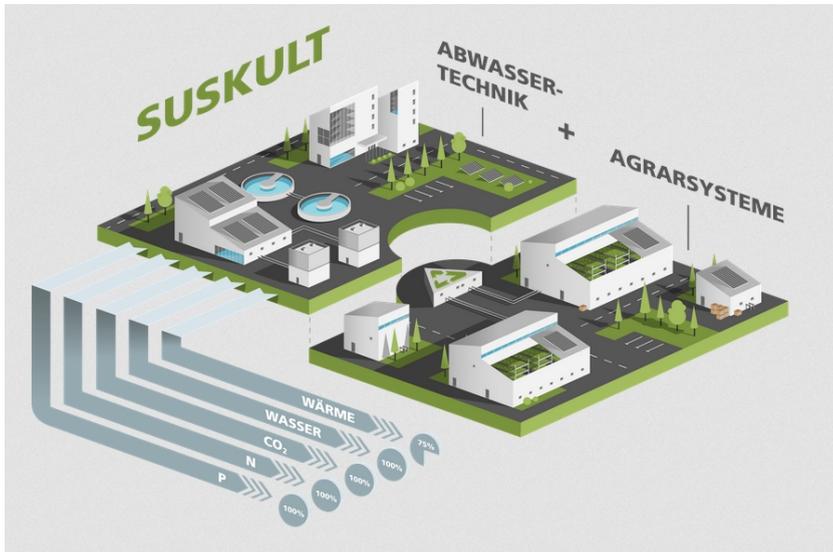


Abb. 1: Nutzung von Abwasser für Agrarsysteme in SUSKULT (© Fraunhofer UMSICHT)

Zur Nutzung der Kläranlage für die Nahrungsmittelproduktion müssen ausgewählte Stoffströme bestmöglich für die Nutzung durch die Pflanzen ausgewählt, gesteuert und kombiniert werden. Die Stoffkonzentrationen in Strömen einer Kläranlage hängen von verschiedenen Faktoren ab. Entscheidend ist zunächst der Zufluss zu der Kläranlage, der in seinem Umfang und seiner Zusammensetzung nach nicht beeinflussbar ist. Er hängt von Tageszeiten, Wochentagen, der Jahreszeit, aber auch Wetterlagen und auch von Einzeleinleitungen durch Industrie und Landwirtschaft ab. Die Stoffkonzentrationen in einer Kläranlage können in gewissem Umfang durch Prozessparameter gesteuert werden. Die Seite der Nahrungsversorgung für die Pflanzen ist dadurch gekennzeichnet, dass verschiedene Pflanzenarten in verschiedenen Wachstumsstadien individuelle Anforderungen an die Nährlösung hinsichtlich Nährstoffbedarfen haben. Eine besondere Rolle spielen dabei auch in den Stoffströmen eventuell noch vorhandene Schadstoffe und die Toleranzgrenzen der Pflanzen bei diesen Schadstoffen (beispielsweise Streusalz im Winter).

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei Ansätze betrachtet, die einen Betrag zur Optimierung der Pflanzenversorgung mit Hilfe von Stoffströmen aus der Kläranlage leisten können:

- Die **Vorhersage von Stoffkonzentrationen** mit dem Ziel einer prädiktiven Steuerung der Kläranlage im Sinne der für die Pflanzenproduktion geeigneten Konzentrationen.

- Die **Mischung von verschiedenen Stoffströmen** mit jeweils individuellen Stoffkonzentrationen zur Erzeugung von für die Pflanzenproduktion geeigneten Konzentrationen unter Minimierung von Nährstoffzukäufen.

Der Einsatz von KI zur Steuerung einer Kläranlage ist kein sehr aktives Forschungsfeld. Der Einsatz von KI zur Nutzung von Stoffströmen einer Kläranlage für Agrarsysteme wurde unseres Wissens nach bisher nicht betrachtet. Einige bisherige Arbeiten im Kontext KI und Kläranlagen seien nachfolgend exemplarisch aufgelistet: In [Ha97] wurde der von Fuzzy-Logik zur Minimierung von Stickstoff, Phosphor und Betriebskosten adressiert. [Sc04] verfolgte ebenfalls die Minimierung von Stickstoff mit Fuzzy-Logik. [Gu15] entwickelte ein Warnsystem für die Stickstoffbelastung mit Hilfe von Support Vector Machines und Neuronalen Netzen. [Eb04] hatten die Vorhersage von  $\text{NH}_4\text{-N}$  am Ablauf des Belebungsbeckens zur Steuerung des Sauerstoffeintrags über ein Neuronales Netz und Fuzzy Regler zum Ziel. [Gr17] setzte Support Vector Machines und Entscheidungsbäume zur Vorhersage von Abwasserqualitätsindikatoren auf Basis der Beschreibung des Einzugsgebietes ein. In deutschen Verbundprojekt E-KLÄR [IfS] wurde unter anderem an Systemen zur Entscheidungsunterstützung bei der Auslegung von Kläranlagen durch in Bayesschen Netzen modellierte Kausalbeziehungen gearbeitet. [OI18] beschäftigte sich mit Kostenoptimierung einer Kläranlage mit Reinforcement Learning unter Einhaltung von gesetzlichen Reinigungsvorgaben.

Heutige Kläranlagen verfügen in der Regel weder über umfangreiche, kleinräumig und kurzfristig messende Sensorik, noch bieten sie detaillierte, auf einzelne Nähr- und Schadstoffe ausgerichtete Eingriffs- und Steuerungsmöglichkeiten. Andererseits sind die optimale Nährstoffversorgung zahlreicher Nutzpflanzen im hydroponischen Anbau in ihrem zeitlichen Profil sowie der Umgang mit unerwünschten Begleitstoffen noch aktuelle Forschungsgegenstände und in vielen Details noch unbekannt. Die hier beschriebenen Arbeiten nutzen bereits vorhandene Aufzeichnungen von kooperierenden Kläranlagen aus den letzten Jahren, die jedoch in Auflösung und erfassten Stoffkonzentrationen eingeschränkt waren. Die Arbeiten mussten sich daher darauf beschränken, das Potential von KI-Ansätzen in diesem Anwendungskontext initial und zunächst rein qualitativ zu erheben und anhand der wenigen verfügbaren Daten auf Machbarkeit zu prüfen. Daher wird auf die Angabe quantitativer Ergebnisse im folgenden bewusst verzichtet.

## 2 Vorhersage von Stoffkonzentrationen an der Kläranlage

Durch die Abschätzung zukünftig zu erwartender Konzentrationen bestimmter Stoffe kann die Kläranlage prädiktiv im Sinne einer optimalen Aufbereitung der Stoffströme für die Pflanzenproduktion gesteuert werden. An welchen Stellen die Kläranlage konkret und durch Voraussagen mit bestimmtem zeitlichen Horizont und bestimmten Genauigkeiten tatsächlich im Sinne der Pflanzenproduktion gesteuert werden kann, ist aktuell noch Gegenstand von Forschungsarbeiten weiterer Konsortialpartner in SUSKULT.

Ziel der in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeiten war es zunächst, Stoffkonzentrationen in einem Zeitfenster von wenigen Stunden vorherzusagen sowie das Potential der zusätzlichen Kenntnis/Prognose von Zuflussmengen zu bewerten. In einem weiteren Teil der Arbeiten wurde versucht, das Über-/Unterschreiten vorgegebener Schwellwerte für Stoffkonzentrationen am Folgetag vorherzusagen.

## **2.1 Vorhersage im Stundenbereich**

Die ersten Machbarkeitsanalyse hatten den Einsatz eines Lernverfahrens zur Vorhersage von Stoffkonzentrationen im Bereich von einigen Stunden zum Ziel. Grundlage war ein an der Kläranlage Bochum-Ölbachtal erhobener Datensatz, welcher über den Zeitraum 1.1.2015 bis 31.12.2018 stundengenau die Messwerte für Stickstoff (N) und Phosphor (P) enthielt. Insgesamt erhielt der Datensatz 11.736 Messzeitpunkte für die entsprechenden Werte. Aufgrund des ausreichend erscheinenden Umfangs des Datensatzes entschieden wir uns für den Einsatz eines neuronalen Netzes zur Vorhersage von Messwerten in einigen Stunden, basierend auf der Historie der Messwerte. Konkret wurde ein LSTM Netz (Long Short-Term Memory, [HS97]) mit in Summe 4x200 Zellen eingesetzt. Besonders attraktiv an diesen Netzen erschien, dass sie theoretisch in der Lage sind, Zyklen beliebiger Länge in den Daten zu erkennen und nutzbar zu machen (insbesondere Tagesläufe, Wochenläufe, jahreszeitliche Regelmäßigkeiten). Weiterhin sind sie theoretisch in der Lage, besondere Zulaufereignisse (z.B. Regenereignisse, unregelmäßig auftretende Industriezuläufe) frühzeitig anhand von zeitlichen Mustern zu erkennen. Es wurde davon ausgegangen, dass die durch LSTM Netze mögliche Erkennung von Zyklen und Zulaufereignissen zur Erhöhung der Vorhersagegenauigkeit beitragen kann. Um die mögliche Vorhersagegenauigkeit weiter zu erhöhen, wurden dem LSTM Netz auch Informationen zum Wochentag und Monat der Messung zur Verfügung gestellt.

### **2.1.1 Initiale Erkenntnisse**

In initialen Experimenten zeigte sich, dass das LSTM-Netz im Bereich bis zu 3 Stunden relativ genaue Vorhersagen leisten kann (vgl. Abbildung 2). Die Vorhersage der Messwerte über 3 Stunden hinaus zeigte zunehmend größere Abweichungen von der Realität. Besonders große Abweichungen von den tatsächlich gemessenen Werten wurde zu Zeiten beobachtet, in denen der Zufluss zur Kläranlage erhöht war, vermutlich in vielen Fällen durch Regenereignisse.

### **2.1.2 Berücksichtigung von Zuflussmengen**

Es stellte sich damit die Frage, ob die Genauigkeit der Vorhersage einer erwarteten Stoffkonzentration (z.B. in drei Stunden) durch die Kenntnis der zukünftigen Durchflussmenge (z.B. der Durchflussmengen in einer, zwei und in drei Stunden) erhöht werden kann. In einer

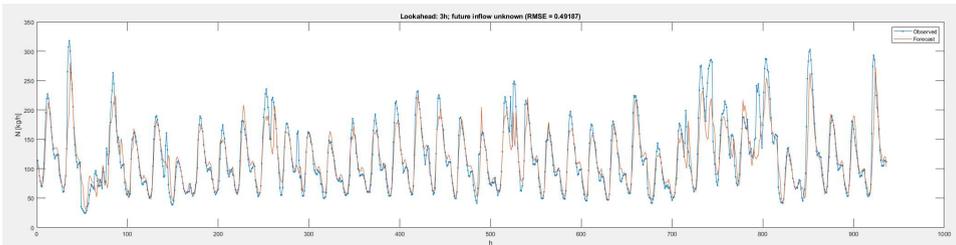


Abb. 2: Vorhersage der Stickstoffkonzentration in 3 Stunden (rot) im Vergleich zu Messwert in drei Stunden (blau)

echten Anwendung können die zukünftigen Durchflussmengen lediglich abgeschätzt werden. Die hier verwendeten, aufgezeichneten und retrospektiv betrachteten Datensätze enthielten jedoch zu jedem Messzeitpunkt auch die tatsächliche Durchflussmenge an der Kläranlage. Es war daher möglich, ausgehend von einem gewählten Startzeitpunkt den Einfluss der zukünftigen tatsächlichen Durchflussmengen auf die Vorhersagegenauigkeit zu überprüfen und so zu zeigen, was mit einer sehr guten Abschätzung zukünftiger Durchflussmengen an Verbesserung der Vorhersage von Stoffkonzentrationen erzielbar wäre.

Die entsprechenden Experimente zeigten, dass die Kenntnis der zukünftigen Durchflussmengen bis zum Vorhersagezeitpunkt die Genauigkeit in der Tat wesentlich erhöhen kann. Mit Kenntnis der stündlichen Durchflussmengen in den nächsten 6 Stunden war auch eine deutlich zuverlässigere Vorhersage der Messwerte in 6 Stunden möglich.

Im Datensatz waren zu jedem Zeitpunkt auch die Durchflussmengen angegeben. Insofern war es kein Problem, den exakten Zufluss zum Vorhersagezeitpunkt mit in die Vorhersage eingehen zu lassen. Unter realen Bedingungen ist der zukünftige Zufluss nicht bekannt. Ersatzweise besteht die Möglichkeit, vorgelagerte Messungen im verzweigten Zulauf der Kläranlage vorzunehmen (die sich dann erst mit einiger Verzögerung bei der Kläranlage manifestieren), Niederschläge im Einzugsgebiet zu messen oder Niederschlagsvorhersagen zu nutzen – mit zunehmendem Vorhersagehorizont und zunehmender Ungenauigkeit im Hinblick auf die tatsächlichen zukünftigen Zuläufe.

Für eine experimentelle Evaluierung wurden Niederschläge im Umfeld der Kläranlage herangezogen, genauer, Wetterdaten, die am etwa 40km von der Kläranlage Bochum-Ölbachtal des Ruhrverbandes entfernten Flughafen Düsseldorf erhoben wurden. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Arbeiten war die Verfügbarkeit näherer Wettermessstationen nicht bekannt. Eine erste Überprüfung zeigte, dass Niederschlagsereignisse am Flughafen mit etwa zwei Stunden Verzögerung im Zufluss der Kläranlage sichtbar werden. Die Ergebnisse aus den Experimenten zeigten weiter, dass die Genauigkeit durch die Kenntnis der verwendeten Wetterdaten statt der tatsächlichen zukünftigen Zuflüsse nur marginal im Vergleich zu den Vorhersagen ohne jegliche Zuflussinformationen erhöht wird. Mögliche Ursachen hierfür sind die Wahl des Standorts der Messung, die die tatsächlichen Regenereignisse im

Einzugsbereich der Kläranlage möglicherweise nur unzureichend wiedergeben, sowie der zu geringe Vorhersagezeitraum für die erhöhten Zuläufe von nur ca. zwei Stunden.

### **2.1.3 Lernrate**

In einem weiteren Schritt wurde untersucht, wie lange der Beobachtungszeitraum sein muss, um eine gute Vorhersagegenauigkeit der Messwerte in 3 Stunden zu erreichen. Es zeigte sich hierbei, dass erste „Lernerfolge“ bereits nach einer Woche sichtbar werden, dass das Verfahren aber deutlich von der Verfügbarkeit wesentlich längerer Beobachtungszeiträume profitiert. Auch bei der Verlängerung des Beobachtungszeitraums über ein Jahr hinaus wurden weitere Genauigkeitsverbesserungen beobachtet. Es ist davon auszugehen, dass bei Verfügbarkeit von noch längeren Messreihen noch größere Genauigkeiten erreicht werden können.

### **2.1.4 Schätzwerte für Sensordaten**

Es ist zu erwarten, dass viele für die Pflanzenproduktion voraussichtlich notwendige Messungen von Stoffkonzentrationen, insbesondere auch von Schadstoffen, aufwändig und teuer sind. Ein weitere interessante Anwendung für Lernverfahren besteht damit in der Abschätzung aktueller, nicht gemessenen / nicht kostengünstig messbarer Stoffkonzentrationen aus der Historie und aus dem Vorliegen aktueller anderer Messwerte. Entsprechende Experimente für die Vorhersage von Stickstoff und Phosphor zeigten vielversprechende Resultate. So war aus der Kenntnis der aktuellen Konzentrationen von Stickstoffhalt, dem chemische Sauerstoffbedarf (CSB) und der Zuflussmenge die aktuelle Konzentration von Phosphor sehr präzise vorhersagbar.

## **2.2 Vorhersage von Tagesdurchschnittswerten**

Auf Kläranlagen wird die Durchflussmenge zwar kontinuierlich aufgezeichnet, die Stoffkonzentrationen im Zulauf werden jedoch aktuell in der Regel nur in Tagesdurchschnitten und diskontinuierlich gemessen. Vor diesem Hintergrund hatte die zweite Machbarkeitsanalyse den Einsatz eines Lernverfahrens zur Vorhersage des Tagesdurchschnittes am Folgetag zum Ziel. Der den diesen Untersuchungen zu Grunde liegende Datensatz enthielt in täglicher Auflösung für den Zeitraum 10.01.2016 bis 21.12.2019 jeweils von Montag bis Donnerstag Tagesdurchschnittswerte für den Belebungsbeckeneingang. Daten an den fehlenden Tagen (Freitag bis Sonntag) wurden testweise auf 0 gesetzt bzw. linear interpoliert. Auch wurden wieder Tages- und Monatsinformationen hinzugefügt. Die experimentelle Evaluierung auf Basis dieses Datenbestands zeigte bei der Verwendung von LSTM Netzen keinen Lernerfolg.

Es war zu vermuten, dass der geringe Umfang des Datenbestandes in Verbindung mit der Diskontinuität (fehlende Tagesmesswerte) Ursache für die schlechten Ergebnisse mit LSTM-Netzen ist. In einem weiteren Schritt wurde daher der Einsatz einer Support Vector Machine (SVM) als klassisches Klassifikationsverfahren angestrebt. Zur Umsetzung der Vorhersage als Klassifikationsproblem wurde ein Zeitfenster vorgesehen, das dem Verfahren neben den aktuellen Tagesmesswerte auch die Messwerte am Vortag und vor zwei Tagen zur Vorhersage bereitstellt. Weiterhin wurden als Klassen Testergebnisse für Messwerte definiert. Diese hatten die Form: „Messwert am morgigen Tag ist im unteren Drittel/mittleren Drittel/oberen Drittel der üblicherweise gemessenen Werte“. Zeitfenster, die fehlende Messwerte enthielten, wurden komplett vom Datensatz ausgeschlossen. Insgesamt konnten so aus den verfügbaren 1.471 Messtagen lediglich 176 vollständige Datensets zum Lernen und für die Evaluierung verwendet werden.

Mit der entsprechenden Datengrundlage wurde geprüft, inwieweit sich mit der SVM „Detektoren“ für erhöhte bzw. verminderte Messwerte am Folgetag (d.h. Messwerte im unteren und oberen Drittel des üblichen Bereichs) entwickeln lassen. Mithilfe von Konfusionsmatrizen und Receiver Operating Characteristics (ROC) Diagrammen konnte gezeigt werden, dass sich ein Lernerfolg einstellt. Allerdings kommt es sowohl bei den False Positives als auch bei den False Negatives zu signifikanten Fehlerraten (siehe Abbildung 3). Ob und bei welchen Arbeitspunkten der ROC-Kurve der Einsatz eines Lernverfahrens gegebenenfalls sinnvoll möglich ist, lässt sich erst im Rahmen einer konkreten Steuerung nach Durchführung einer Kosten/Nutzen-Rechnung ermitteln.

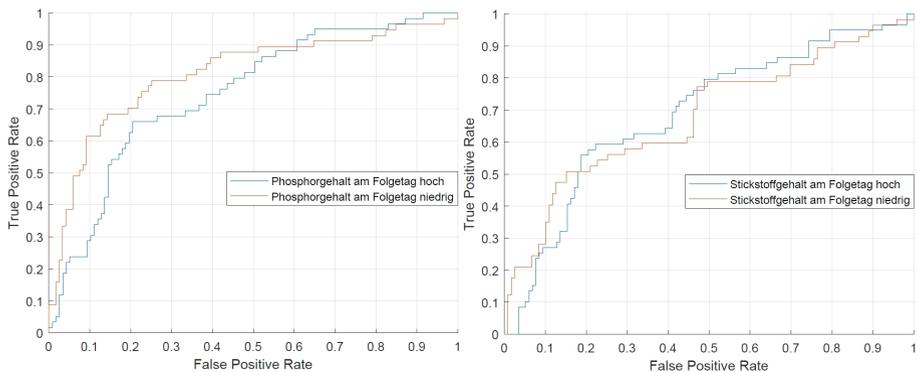


Abb. 3: Receiver Operating Characteristics zur Vorhersage von Schwellwertunterschreitungen und -überschreitungen für Phosphor und Stickstoff

### 3 Zusammenstellung von Nährlösungen für die Pflanzenproduktion

In einem zweiten Arbeitsschwerpunkt wurde direkt die Schnittstelle zwischen der Kläranlage und der Pflanzenproduktion adressiert. Ziel war es, als gegeben angenommene, verschiedene

Stoffströme der Kläranlage bestmöglichst zur Erzeugung von Nährstofflösungen zu verwenden und Zukäufe von Nährstoffen aus Kostengründen (Geld oder entstehende „ökologische Kosten“) zu minimieren.

### 3.1 Modellbildung

Im ersten Schritt der Arbeiten wurden die wesentlichen Abläufe/Zusammenhänge an der Schnittstelle zwischen Kläranlage und Pflanzenproduktion modelliert (siehe Abbildung 4).

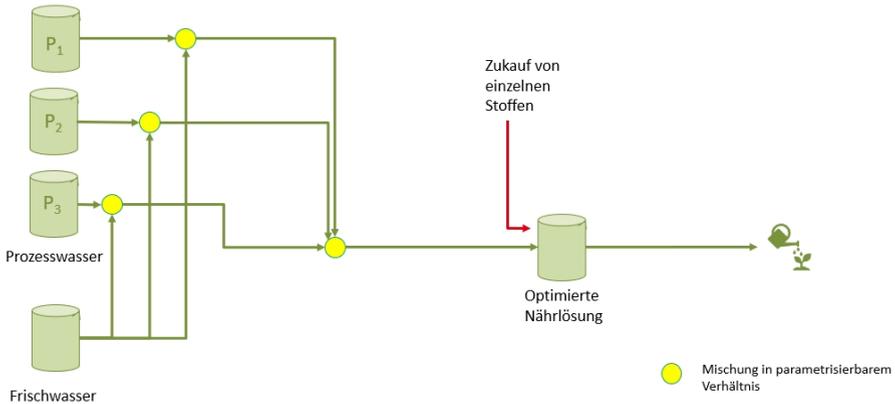


Abb. 4: Modell zur Erzeugung von Nährlösungen aus Prozesswasserchargen

Auf der Seite der Kläranlage wurde aus Vereinfachungsgründen davon ausgegangen, dass verschiedene (Prozess-)wasserchargen („Tanks“) mit verschiedenen Zusammensetzungen hinsichtlich Nähr- und Schadstoffen gegeben sind. Dem liegt die Idee zu Grunde, dass diese unterschiedlichen Wasserchargen zu verschiedenen Betriebszeiten der Kläranlage in Tanks zwischengespeichert werden für eine spätere, möglichst optimale Verwendung. Auf der Seite der Pflanzenproduktion sollte unter Verwendung der Wasserchargen eine optimale Nährlösung generiert werden. Diese zeichnet sich aus durch (i) das Bereitstellen exakt vorgegebener Nährstoffkonzentrationen in der Nährlösung sowie (ii) das Nichtüberschreiten von vorgegebenen spezifischer Grenzwerten für verschiedener Schadstoffe. Zur Erzeugung einer optimalen Nährlösung aus den gegebenen Wasserchargen wurden folgende Verarbeitungsschritte modelliert:

- Für jede Wassercharge ist eine beliebige spezifische Verdünnung mit Wasser möglich.
- Die (verdünnten) Wasserchargen können in beliebigen Verhältnissen gemischt werden.
- Gekaufte Nährstoffe können in beliebigen Konzentrationen zugegeben werden. Der Zukauf von Nährstoffen ist mit für den Nährstoff spezifischen Kosten verbunden. Diese Kosten können einem Geldbetrag entsprechen oder einem Maß für die ökologischen Kosten.

Es wäre auch möglich gewesen, das Entfernen von Schadstoffen für die Pflanze oder die Transformation von Stoffen als zulässige, möglicherweise mit weiteren Kosten verbundenen Verarbeitungsschritte vorzusehen. Da zumindest heutige Kläranlagen hierzu noch keine Möglichkeiten haben, wurde auf diese Option verzichtet.

Die Messung von Nähr- und Stoffkonzentrationen selbst ist ebenfalls mit spezifischen Kosten verbunden, die in einer praktischen Anwendung einbezogen werden müssen. Derartige Kosten sind allerdings mit der vorgestellten Modellierung nicht erfassbar und eine Erweiterung ist aktuell auch nicht geplant.

Das Optimierungsproblem wurde wie folgt formuliert: sei  $n$  die Anzahl der Prozesswassertanks,  $k$  die Anzahl der zu betrachtenden Nährstoffe und  $l$  die Anzahl der zu betrachtenden Schadstoffe. Dann bezeichnet  $\vec{p}_{i,j}$  mit  $i = 1..n$  und  $j = 1..k+l$  die Konzentration des Stoffes  $j$  im Tank  $i$ . Weiter bezeichne  $c_{1..k}$  die Kosten für die Zugabe von Nährstoffe  $1..k$  und  $m$  die Menge der zu erzeugenden Nährlösung. Gesucht ist dann ein Vektor  $\vec{x}$  mit  $\sum_{i=1..k} x_{2n+i} c_i$  minimal, wobei  $x_1..x_n$  der Entnahme aus den Prozesswassertanks  $1..n$  entspricht,  $x_{n+1}..x_{2n}$  dem Verdünnungsfaktor für Entnahme  $1..n$  und  $x_{2n+1}..x_{2n+k}$  der Zugabe von Nährstoff  $1..k$ . Das Optimum muss unter den folgenden Nebenbedingungen gefunden werden:

- Die Konzentrationen der Nährstoffe  $1..k$  müssen den Vorgaben  $z_i$  entsprechen, d.h.  $\frac{\sum_{i=1..n} (x_i p_{i,1} x_{n+i}^{-1})}{\sum_{i=1..n} x_i x_{n+i}^{-1}} + x_{2n+1} = z_1, \dots, \frac{\sum_{i=1..n} (x_i p_{i,k} x_{n+i}^{-1})}{\sum_{i=1..n} x_i x_{n+i}^{-1}} + x_{2n+k} = z_k$
- Die Konzentrationen der Schadstoffe  $1..l$  müssen unterhalb der Grenzwerte  $z_{k+i}$  liegen, d.h.  $\frac{\sum_{i=1..n} (x_i * p_{i,1} * x_{n+i}^{-1})}{\sum_{i=1..n} x_i * x_{n+i}^{-1}} - x_{2n+k+1} < z_{k+1}, \dots, \frac{\sum_{i=1..n} (x_i * p_{i,l} * x_{n+i}^{-1})}{\sum_{i=1..n} x_i * x_{n+i}^{-1}} - x_{2n+k+l} < z_{k+l}$
- Es muss die vorgegebene Menge an Nährlösung erzeugt werden:  $\sum_{i=1..n} (x_i * x_{n+i}) = m$

Zur Lösung des Optimierungsproblems wurde ein Interior Point Algorithmus eingesetzt, welcher das Minimum einer beschränkten nichtlinearen multivariablen Funktion sucht [BGN00]. Ausgehend von einer (händisch) vorgegebener Startkonfiguration (z.B. der unverdünnten Verwendung des Inhalts eines Prozesswassertanks ohne Zukäufe) findet der Algorithmus ein lokales Optimum hinsichtlich der Kosten. Ein globales Optimum kann nicht garantiert werden. Allerdings ist durch die Vorgehensweise garantiert, dass die vom Algorithmus gefundene Lösung in jedem Fall mindestens so kostengünstig ist, wie die händisch vorgegebene Startkonfiguration.

### 3.2 Experimentelle Evaluierung

Die Modellierung wurde an einem vereinfachten Szenarien getestet anhand dreier Prozesswassertanks  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  mit einer Kombinationen dreier Nährstoffe (Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K)) und einem nicht näher definieren Schadstoff S. Die Kosten für die Zugabe von N, P oder K wurden als gleich angesehen. Die konkreten

Nährstoff- und Schadstoffkonzentrationen von  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  und die Anforderungen an die optimale Nährlösung wurden in den Beispielen künstlich gesetzt, um die Plausibilität der Optimierungsergebnisse in Grenzfällen untersuchen zu können. Beispielsweise wurden die Zusammensetzungen von  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  so gewählt, dass jeder der Tanks jeweils einen Nährstoff enthält, aber zusätzlich  $P_3$  noch einen Schadstoff in kritischer Konzentration. Als Startpunkt für die Optimierung wurde jeweils die Mischung von  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  in gleichen Verhältnissen, ohne Verdünnungen und ohne Zukauf von Rohstoffen gewählt. Ziel war jeweils die Erzeugung von 100 Litern Nährlösung. Anhand der Beispiele konnte das erwartungsgemäße Verhalten des Modells und Optimierungsverfahrens verifiziert werden.

Im nächsten Schritt wurden dann tatsächliche Stoffkonzentrationen aus Prozesswasserproben von Kläranlagen zu verschiedenen Zeitpunkten herangezogen in Kombination mit Vorgaben für die optimale Nährlösung von Tomaten. Es zeigte sich, dass die optimale Lösung des Algorithmus in der Regel lediglich eine der drei Wasserchargen heranzog und diese nach Verdünnung und Zukauf von Nährstoffen zur optimalen Nährlösung wurde. Insbesondere kam es in den Beispielen mit realen Stoffkombinationen nicht zu einer Mischung von Chargen aus verschiedenen Tanks.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit Hilfe des Algorithmus verschiedene Wasserchargen aus der Kläranlage kostenreduzierend verdünnt, kombiniert und nach Zukauf von Rohstoffen als Nährlösung in der Pflanzenproduktion eingesetzt werden können. Die sich in den gewählten realen Wasserchargen findenden Stoffkonzentrationen waren jedoch zu ähnlich, um durch ihre Kombination zu Einsparungen zu führen.

## 4 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden die potenziellen Einsatzmöglichkeiten von Entscheidungsunterstützung bei der Nutzung von Prozessströmen einer Kläranlage für Agrarsysteme qualitativ untersucht. Die Analysen zeigten, dass Vorhersagen zu Stoffkonzentration, wie sie zur prädiktiven Steuerung der Kläranlage im Sinne der Agrarsystemen eingesetzt werden kann, prinzipiell möglich ist. Die entsprechenden experimentellen Evaluierungen konnten aus Mangel entsprechender Messwerte lediglich anhand der Vorhersage zukünftiger Stickstoff und Phosphorkonzentrationen erfolgen und zeigte die prinzipiellen Grenzen der Vorhersagehorizonte für die vorhandenen historischen Daten und speziell diese Stoffkonzentrationen. Die Analysen zeigten auch, dass zur Erhöhung von Genauigkeiten und Vorhersagehorizonte die Kenntnis von zukünftigen Zuflussmengen einen erheblichen Beitrag leisten kann. Dies muss gegebenenfalls noch genauer untersucht werden. Inwieweit bei anderen Nährstoffen und Schadstoffen bessere oder schlechter Genauigkeiten zu erzielen sind und in welchem Umfang die erzielbaren Vorhersagegenauigkeiten in SUSKULT zur Steuerung der Kläranlage tatsächlich genutzt werden können ist noch offen.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeiten betraf die optimale Auswahl und Kombination von Prozessströmen im Sinne der Agrarsysteme. Die Analysen zeigten, dass es über

Optimierungsansätze potenziell möglich ist, die monetären oder ökologischen Kosten bei gegebenen Prozessströmen weiter zu reduzieren. Entscheidend zur Ausschöpfung dieses Potentials wäre die Steuerung der Kläranlage, damit sie von ihrer Nähr- und Schadstoffkonzentrationen her komplementäre Prozesströme generiert.

Die hier beschriebenen Arbeiten wurden auf relativ eingeschränkten Datensätzen und konnten nur einen qualitativen Eindruck davon vermitteln, wo Entscheidungsunterstützung in SUSKULT möglicherweise eingesetzt werden kann. Zentral für weiterführende Arbeiten ist der Abgleich der Ergebnisse mit neuen Messdaten aus den Kläranlagen, die sowohl umfangreicher sind als auch bisher nicht erhobene und für den Pflanzenbau relevante Schadstoffkonzentrationen enthalten.

## Literaturverzeichnis

- [BGN00] Byrd, Richard; Gilbert, Jean Charles; Nocedal, Jorge: A Trust Region Method Based on Interior Point Techniques for Nonlinear Programming. *Mathematical Programming*, 89:149–185, 11 2000.
- [Eb04] Ebel, Alexander; Bongards, Michael; Westenberger, Hartmut; Graner, Martin: Prädiktive Regelung von Kläranlagen mit neuronalen Netzen. *Wasser und Abfall*, 51, 01 2004.
- [Gr17] Granata, Francesco; Papirio, Stefano; Esposito, Giovanni; Gargano, Rudy; De Marinis, Giovanni: Machine Learning Algorithms for the Forecasting of Wastewater Quality Indicators. *Water*, 9(2), 2017.
- [Gu15] Guo, Hong; Jeong, Kwanho; Lim, Ji Young; Jo, J.; Kim, Young Mo; Park, Jongkwan; Kim, Joon; Cho, Kyung Hwa: Prediction of effluent concentration in a wastewater treatment plant using machine learning models. *Journal of environmental sciences*, 32:90–101, 2015.
- [Ha97] Hansen, Joachim: Der Einsatz von Fuzzy Control für Regelungsaufgaben im Bereich der Nährstoffelimination in kommunalen Kläranlagen. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1997.
- [HS97] Hochreiter, Sepp; Schmidhuber, Jürgen: Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, 9(8):1735–1780, 11 1997.
- [IfS] Institut für Siedlungswasserwirtschaft, RWTH Aachen University: E-Klaer: Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien fuer den Transformationsprozess in Richtung Technikwende.
- [OI18] del Olmo, Félix Hernández; Gaudioso, Elena; Dormido, Raquel; Duro, Natividad: Tackling the start-up of a reinforcement learning agent for the control of wastewater treatment plants. *Knowledge-Based Systems*, 144:9–15, 2018.
- [Sc04] Schönberger, Dirk: Regelungstechnische und verfahrenstechnische Maßnahmen zur Leistungssteigerung kommunaler Abwasserreinigungsanlagen. Dissertation, Universität Siegen, 2004.