

ifak system GmbH

**Entwicklung von energiesparenden und umweltschonenden
Belüftungsstrategien für längsdurchströmte Belebungsbecken
unter Berücksichtigung von Industrieabwässern**

Abschlussbericht über ein FuE-Projekt,
gefördert unter dem AZ: 21499 - 23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Ralf Tschepetzki und Dipl.-Ing. (FH) Ingolf Seick

Februar 2008

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



| | | | | | |
|------------------------------|--------------|---|-----------|---|--------------------|
| Az | 21499 | Referat | 23 | Fördersumme | 76.849,00 € |
| Antragstitel | | Entwicklung von energiesparenden und umweltschonenden Belüftungsstrategien für längsdurchströmte Belebungsbecken unter Berücksichtigung von Industrieabwässern | | | |
| Stichworte | | | | | |
| Laufzeit | | Projektbeginn | | Projektende | |
| 24 Monate | | 01.10.2005 | | 30.09.2007 | |
| Zwischenberichte | | | | | |
| Bewilligungsempfänger | | ifak system GmbH Oststraße 18 39114 Magdeburg | | Tel 0391-544563-80 Fax 0391-544563-99 Projektleitung Dr. Ing. Ralf Tschepetzki Bearbeiter | |
| Kooperationspartner | | Hochschule Magdeburg-Stendal (FH) Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft Breitscheidstraße 2 39114 Magdeburg | | | |

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die Belüftung längsdurchströmter Belebungsbecken beeinflusst direkt das lastabhängig zeitlich und räumlich ausgeprägte O₂-Profil und bestimmt die biologischen Abwasserreinigungsprozesse, insbesondere in Kaskaden mit Denitrifikation/Nitrifikation und wahlweise belüfteten Abschnitten (Steuerstufen). Um das O₂-Profil ökologisch und ökonomisch sinnvoll einzustellen, muss die Luftzufuhr in den Beckenabschnitten flexibel dem Bedarf angepasst werden. Das mit der vorhandenen Technik gegebene Potenzial soll energiesparend und umweltschonend genutzt werden, wobei die Betriebssicherheit und die Einhaltung der Ablaufwerte Priorität haben. Die Belüftung ist der Ansatzpunkt zur Verfahrensoptimierung sowie zur gezielten dauerhaften Einsparung von Energie und damit zur Umweltentlastung durch Verringerung der CO₂-Emission.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Am detaillierten Simulationsmodell werden geeignete Kombinationen von Betriebseinstellungen (statische Konzepte) für typische Abwasserzulaufsituationen untersucht und darauf aufbauende Regelungen entwickelt, um ein optimales O₂-Profil zu finden und einzustellen. Die Ergebnisse werden unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten in Abgrenzung zum Stand der Technik bilanziert. Ausgewählte Einstellungen werden auf einer Kaskadenanlage großtechnisch erprobt. Die Übertragbarkeit der entwickelten energiesparenden und umweltschonenden Belüftungsstrategien auf vergleichbare kommunale und industrielle Kläranlagen mit Druckbelüftung und längs durchströmten Belebungsbecken wird am Beispiel einer Benchmarkanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

Deutliche ökologische und ökonomische Effekte werden mit statischen Konzepten erzielt:

- eine kontinuierliche aber gedrosselte Belüftung von ausgewählten Steuerstufen bei gleichzeitiger Senkung der O₂-Sollwerte der Nitrifikationszonen reduziert den Luftverbrauch der Beispielanlage wirksam um bis zu 15 % (Reduzierung der CO₂-Emission um ca. 1 Mio. kg CO₂-Äquivalent/Jahr)
- NH₄-N im Ablauf der Belebung wird außerdem gesenkt und durch Ausnutzung der simultanen Denitrifikation in den Steuerstufen kann die Denitrifikationsleistung beibehalten werden

Eine zusätzliche Reduzierung des Luftverbrauchs und von NH₄-N im Ablauf erzielt eine NH₄-Regelung zur lastflexiblen Führung der O₂-Sollwerte in Kombination mit gedrosselt belüfteten Steuerstufen:

- lastflexible Regelungen sind effektiv wenn sie auf den gefundenen statischen Konzepten aufsetzen
- eine automatische Umschaltung der Steuerstufen vermindert NO₃-N- und N_{ges}-Spitzen im Ablauf der Belebung; eine Kombination mit der NH₄-Regelung im Ablauf der Belebung ist sinnvoll

Die hergeleitete Kenngröße „Verlustluftmenge“ eignet sich zur Lokalisierung des Potenzials zur Reduzierung der Luftmengen für die einzelnen belüfteten Abschnitte von Belebungsbecken:

- eine effizientere Belüftung durch Reduzierung der Verlustluftmenge beeinträchtigt die N-Elimination nicht
- der Ansatz zur Einbindung der Kenngröße Verlustluftmenge in ein innovatives MSR-Konzept (Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen im Längsprofil) sollte weiter verfolgt werden

Über die Zielsetzung hinaus wurde auch ein aussichtsreiches Konzept zur lastflexiblen Zulaufaufteilung für Kaskadenanlagen zur Reduzierung von NH₄-N-Ablaufspitzen bei Frachtstößen untersucht.

Die Übertragung auf das weit verbreitete Abwasserreinigungsverfahren vorgeschaltete Denitrifikation durch dynamische Simulation einer Benchmarkanlage war erfolgreich, Grenzen wurden aufgezeigt:

- nur bedingt anwendbar bei sehr hoher Belastung und deutlich erhöhtem TKN : CSB-Verhältnis sowie bei industriell bzw. gewerblich beeinflusstem Zulauf mit überdurchschnittlicher TKN-Belastung
- anwendbar auf kommunalen Kläranlagen in Deutschland bei üblicher CSB- und TKN-Belastung
- und auch bei Abwasser mit relativ hohem CSB-Gehalt mit ausreichendem leicht abbaubaren Anteil (z. B. bei industriellem oder gewerblichem Einfluss)

Die großtechnische Erprobung ausgewählter Einstellungen auf einer Kaskadenanlage bestätigt, dass die Reduzierung der erforderlichen Luftmengen, die Anlagenstabilität sowie die Ablaufwerte sehr gut sind.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zielsetzung, Arbeitsschritte und erste Ergebnisse wurden im Mai 2006 auf dem 13. SIMBA-Anwender-treffen Siedlungswasserwirtschaftlern und Regelungstechnikern präsentiert. Auf der Gemeinschafts-tagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“ der DWA und der VDI/VDE-Ge-sellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) im November 2007 in Wuppertal wurden wesent-liche Ergebnisse in einem Vortrag, im Poster und im Tagungsband vorgestellt. Auch als Aussteller wichtiger Messen im In- und Ausland (z. B. IFAT 2008 in München) werden Ergebnisse präsentiert.

Fazit

Die Zielsetzung wurde erreicht. Mit optimierten Einstellungen an Kläranlagen kann dauerhaft Energie eingespart und ein Beitrag zur Umweltentlastung erbracht werden. Für Kaskadenanlagen hat sich die Kombination einer kontinuierlichen, gedrosselten Belüftung von Steuerstufen bei gleichzeitiger Senkung der O₂-Sollwerte in den Nitrifikationszonen als wirksam erwiesen. Die umfangreichen dynamischen Simulationsuntersuchungen zur Optimierung der Belüftung am detaillierten Modell und die anschließende Erprobung ausgewählter Einstellungen in der Praxis sind ein vernünftiger systematischer Weg, auch um Kosten und Risiken zu minimieren. Die Untersuchungen zeigen auch, dass eine sorgfältige Planung der Steuerung/Regelung auf Kläranlagen unter dynamischen Gesichtspunkten erfolgen muss. Die Ergebnisse sind auf andere Kläranlagen übertragbar, sie erfordern aber fundierte Untersuchungen zur genauen Ausprägung des optimalen O₂-Profils für jede einzelne Anlage. Um dieses Profil einzustellen und eine effiziente Belüftung zu gewährleisten, wird für das weitere Vorgehen empfohlen, ein allgemeingültiges Konzept zur lastabhängigen Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen zu entwickeln und zu testen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| PROJEKTKENNBLETT | 3 |
| INHALTSVERZEICHNIS | 5 |
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | 7 |
| TABELLENVERZEICHNIS | 9 |
| BEGRIFFS- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS | 10 |
| ZUSAMMENFASSUNG | 11 |
| EINLEITUNG | 13 |
| HAUPTTEIL | 15 |
| 1 DARSTELLUNG DER ARBEITSSCHRITTE | 15 |
| 1.1 Beispiel Kaskadenbelebung Klärwerk Magdeburg/Gerwisch | 15 |
| 1.1.1 Überblick zur Kaskadenbelebung..... | 15 |
| 1.1.2 Simulationsmodell des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch..... | 16 |
| 1.1.3 Zulauffraktionierung und Modellkalibrierung..... | 18 |
| 1.1.4 Definition von Lastfällen..... | 21 |
| 1.2 Konzepte zur Optimierung der Belüftung | 23 |
| 1.2.1 Herleitung von Kenngrößen | 23 |
| 1.2.2 Entwicklung und Simulation statischer Konzepte für die Beispielanlage | 25 |
| 1.2.3 Entwicklung und Simulation dynamischer Konzepte für die Beispielanlage..... | 34 |
| 1.2.4 Ansatz zur Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen im Längsprofil..... | 39 |
| 1.2.5 Untersuchungen zur lastflexiblen Zulaufaufteilung | 42 |
| 1.2.6 Ansätze für Regelungen mit Störgrößenaufschaltung | 49 |
| 1.3 Prüfung der Übertragbarkeit unter Berücksichtigung von Industrieabwässern | 51 |
| 1.3.1 Überblick entwickelte Konzepte | 51 |
| 1.3.2 Simulationsmodell zur Prüfung der Übertragbarkeit..... | 52 |
| 1.3.3 Simulationen mit Trockenwetterzulauf | 53 |
| 1.3.4 Berücksichtigung von Industrieabwasser | 57 |
| 1.3.5 Simulationen mit industriellem Abwasseranteil | 60 |
| 1.3.6 Auswertung zur Prüfung der Übertragbarkeit | 72 |
| 1.4 Großtechnische Erprobung ausgewählter Konzepte | 74 |
| 1.4.1 Sauerstoffprofilmessungen in Voruntersuchungen | 74 |
| 1.4.2 Erprobung auf dem Klärwerk Magdeburg/Gerwisch | 75 |
| 1.4.3 Empfehlungen zur praktischen Umsetzung geeigneter Konzepte | 76 |
| 2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE IM HINBLICK AUF DIE ZIELSETZUNG.... | 78 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | BEWERTUNG DER ERGEBNISSE..... | 80 |
| 3.1 | Technologische Bewertung..... | 80 |
| 3.2 | Ökologische und ökonomische Bewertung | 81 |
| 4 | MAßNAHMEN ZUR VERBREITUNG DER ERGEBNISSE | 82 |
| | FAZIT | 83 |
| | LITERATURVERZEICHNIS | 85 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1.1: Schema der Kaskadenanlage [SWM04] | 15 |
| Abbildung 1.2: Simulationsmodell Klärwerk Magdeburg/Gerwisch (obere Ebene) | 16 |
| Abbildung 1.3: Simulationsmodell Klärwerk Magdeburg/Gerwisch (zweite Ebene) | 17 |
| Abbildung 1.4: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)..... | 20 |
| Abbildung 1.5: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)..... | 20 |
| Abbildung 1.6: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)..... | 21 |
| Abbildung 1.7: Abwasserzufluss zur Belebung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1) | 21 |
| Abbildung 1.8: CSB im Zulauf zur Belebung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1) | 22 |
| Abbildung 1.9: TKN im Zulauf zur Belebung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1)..... | 22 |
| Abbildung 1.10: Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die erforderliche Luftmenge | 23 |
| Abbildung 1.11: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 26 |
| Abbildung 1.12: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 27 |
| Abbildung 1.13: N_{ges} Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 27 |
| Abbildung 1.14: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 27 |
| Abbildung 1.15: Mittleres Profil Denitrifikationsrate (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 28 |
| Abbildung 1.16: Mittleres Profil Nitrifikationsrate (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 28 |
| Abbildung 1.17: Mittleres Profil O_2 -Gehalt (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 29 |
| Abbildung 1.18: Mittleres Profil O_2 -Zehrung (MK1, Lastfall Qt2Qm1)..... | 29 |
| Abbildung 1.19: Mittleres Profil Luftmenge (MK1, Lastfall Qt2Qm1) | 29 |
| Abbildung 1.20: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1) | 30 |
| Abbildung 1.21: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1) | 31 |
| Abbildung 1.22: N_{ges} Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1) | 31 |
| Abbildung 1.23: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK2, Lastfall Qt2Qm1) | 31 |
| Abbildung 1.24: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1) | 32 |
| Abbildung 1.25: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1) | 32 |
| Abbildung 1.26: N_{ges} Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1) | 33 |
| Abbildung 1.27: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK3, Lastfall Qt2Qm1) | 33 |
| Abbildung 1.28: Kennlinie des $\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Reglers | 34 |
| Abbildung 1.29: Kennlinie automatische Umschaltung Steuerstufen | 35 |
| Abbildung 1.30: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1)..... | 35 |
| Abbildung 1.31: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung, ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1) | 36 |
| Abbildung 1.32: N_{ges} Ablauf Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1) | 36 |
| Abbildung 1.33: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1)..... | 36 |
| Abbildung 1.34: O_2 -Konzentration Kaskade 1 ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1) | 37 |
| Abbildung 1.35: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1) | 37 |
| Abbildung 1.36: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1) | 38 |
| Abbildung 1.37: N_{ges} Ablauf Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1) | 38 |
| Abbildung 1.38: O_2 -Konz. Steuerstufen Kaskade 2 ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler + Aut. Umsch., Lastfall Qt2Qm1) | 38 |
| Abbildung 1.39: Exemplarisches Schema zur möglichen Konfiguration einer Regelung | 41 |
| Abbildung 1.40: Kennlinien Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf Belebung | 43 |
| Abbildung 1.41: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) .. | 44 |
| Abbildung 1.42: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) .. | 44 |
| Abbildung 1.43: N_{ges} Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)..... | 44 |
| Abbildung 1.44: Zulaufauft. Kaskaden (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) | 45 |
| Abbildung 1.45: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) .. | 47 |
| Abbildung 1.46: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) .. | 48 |
| Abbildung 1.47: N_{ges} Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1) | 48 |
| Abbildung 1.48: Zulaufaufteilung Kask. (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)..... | 48 |
| Abbildung 1.49: Überblick zum Original-BSM1 (siehe http://www.benchmarkWWTP.org) | 52 |
| Abbildung 1.50: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf) | 54 |
| Abbildung 1.51: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf) | 54 |
| Abbildung 1.52: N_{ges} Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW- Zulauf) | 54 |
| Abbildung 1.53: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf) | 55 |
| Abbildung 1.54: Mittleres Profil $\text{NO}_3\text{-N}$ (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)..... | 55 |
| Abbildung 1.55: Mittleres Profil $\text{NH}_4\text{-N}$ (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)..... | 56 |
| Abbildung 1.56: Schema zur Fraktionierung des industriellen Abwasserzulaufs | 58 |
| Abbildung 1.57: VD-Modell zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil..... | 60 |
| Abbildung 1.58: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 61 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 1.59: NH ₄ -N Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 61 |
| Abbildung 1.60: N _{ges} Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 62 |
| Abbildung 1.61: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 62 |
| Abbildung 1.62: Mittleres Profil NO ₃ -N (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 63 |
| Abbildung 1.63: Mittleres Profil NH ₄ -N (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 63 |
| Abbildung 1.64: NO ₃ -N Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 64 |
| Abbildung 1.65: NH ₄ -N Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 64 |
| Abbildung 1.66: N _{ges} Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 64 |
| Abbildung 1.67: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 65 |
| Abbildung 1.68: Kennlinie des NH _{4,ab} -Reglers im VD-Modell | 66 |
| Abbildung 1.69: NO ₃ -N Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 66 |
| Abbildung 1.70: NH ₄ -N Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 66 |
| Abbildung 1.71: N _{ges} Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 67 |
| Abbildung 1.72: Gesamt-Luftverbrauch (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 67 |
| Abbildung 1.73: O ₂ -Gehalt Becken 5 (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 67 |
| Abbildung 1.74: Kennlinie automatische Umschaltung Steuerstufen im VD-Modell | 68 |
| Abbildung 1.75: O ₂ -Gehalt Becken 2 (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 69 |
| Abbildung 1.76: NO ₃ -N Denitrifikation (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 69 |
| Abbildung 1.77: NO ₃ -N Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 69 |
| Abbildung 1.78: NH ₄ -N Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 70 |
| Abbildung 1.79: N _{ges} Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 70 |
| Abbildung 1.80: Gesamt-Luftverbrauch (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 70 |
| Abbildung 1.81: O ₂ -Gehalt Becken 2 (modif. Dynam. Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf) | 72 |
| Abbildung 1.82: NO ₃ -N Ablauf Belebung (modif. Dynam. Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)... | 72 |
| Abbildung 1.83: Exemplarisches O ₂ -Profil der Nitrifikation einer Kaskade in der Draufsicht | 74 |
| Abbildung 1.84: Exemplarisches O ₂ -Profil der Nitrifikation einer Kaskade im Querschnitt | 75 |
| Abbildung 1.85: Während des Großversuches erfasste Sauerstofflängsprofile | 76 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1.1: Stellgrößen bzw. Parameter des Modells für Referenzsimulationen | 18 |
| Tabelle 1.2: Mittlere Belastungswerte für Modellabgleich..... | 18 |
| Tabelle 1.3: Kurzauswertung MK1 (Lastfall Qt2m1) | 30 |
| Tabelle 1.4: Kurzauswertung MK2 (Lastfall Qt2m1) | 32 |
| Tabelle 1.5: Kurzauswertung MK3 (Lastfall Qt2m1) | 34 |
| Tabelle 1.6: Kurzauswertung Simulation NH _{4,ab} -Regler (Lastfall Qt2Qm1) | 37 |
| Tabelle 1.7: Kurzauswertung Simulation NH _{4,ab} -Regler + Automat. Umschaltung (Lastfall Qt2Qm1) . | 39 |
| Tabelle 1.8: Kurzauswertung lastflexible Zulaufaufteilung entsprechend NH ₄ -N (Lastfall Qt2m1)..... | 45 |
| Tabelle 1.9: Kurzauswertung lastflexible Zulaufaufteilung entsprechend NO ₃ -N (Lastfall Qt2m1) | 49 |
| Tabelle 1.10: Überblick Entwicklung und Übertragbarkeit statischer und dynamischer Konzepte..... | 51 |
| Tabelle 1.11: Änderung von Ausgangs-Einstellungen des BSM1 | 53 |
| Tabelle 1.12: Modelleinstellungen bei Prüfung der Übertragbarkeit statischer Konzepte | 53 |
| Tabelle 1.13: Kurzauswertung Statisches Konzept 1 (VD-Modell mit TW- Zulauf) | 56 |
| Tabelle 1.14: Mittlere Belastungswerte industrieller Abwasserzulauf..... | 57 |
| Tabelle 1.15: Änderungen am VD-Modell zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil | 59 |
| Tabelle 1.16: Modelleinstellungen bei Prüfung der Übertragbarkeit dynamischer Konzepte | 61 |
| Tabelle 1.17: Kurzauswertung Statisches Konzept 1 (VD-Modell mit indust. Zulauf) | 63 |
| Tabelle 1.18: Kurzauswertung Statisches Konzept 2 (VD-Modell mit indust. Zulauf) | 65 |
| Tabelle 1.19: Kurzauswertung Dynamisches Konzept 1 (VD-Modell mit indust. Zulauf) | 68 |
| Tabelle 1.20: Kurzauswertung Dynamisches Konzept 2 (VD-Modell mit indust. Zulauf) | 71 |
| Tabelle 1.21: Zusammenfassung Ergebnisse Groß- und Referenzversuch..... | 76 |

Begriffs- und Abkürzungsverzeichnis

Häufig verwendete Begriffe und Abkürzungen

| Abkürzung | Bedeutung |
|--------------------|---|
| AFS | Abfiltrierbare Stoffe im Abwasser |
| ASM1 | Activated Sludge Model No. 1 |
| BSB ₅ | Biologischer Sauerstoffbedarf des Abwassers (über 5 Tage bei 20°C) |
| BSM1 | Benchmark Simulation Model No. 1 |
| COST | Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique) => Europäische Zusammenarbeit auf dem Gebiet der wissenschaftlichen und technischen Forschung |
| CSB | Chemischer Sauerstoffbedarf des Abwassers |
| CSB _{fit} | Chemischer Sauerstoffbedarf des filtrierten Abwassers |
| CSB _x | Summe der partikulären CSB-Fractionen (~CSB - CSB _{fit}) |
| GWP | Global Warming Potential |
| KD | Kaskadendenitrifikation |
| MATLAB/SIMULINK | MATLAB und SIMULINK sind eingetragene Warenzeichen von The MathWorks, Inc., USA |
| MSR-Technik | Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik |
| MW | Mischwasser (bzgl. Belastungssituation Kläranlage) |
| NH ₄ -N | Ammonium-Stickstoff im Abwasser |
| NO ₃ -N | Nitrat-Stickstoff im Abwasser |
| N _{org} | organischer Stickstoff im Abwasser |
| N _{ges} | Summe anorganischer Stickstoff im Abwasser (NH ₄ -N+NO ₃ -N) |
| Q _d | Abwasserzulaufmenge pro Tag |
| PT1-Glied | Übertragungsglied mit proportionalem Übertragungsverhalten und Verzögerung 1. Ordnung |
| SIMBA | <i>S</i> imulation der <i>B</i> iologischen Abwasserreinigung, SIMBA ist ein eingetragenes Warenzeichen des ifak e.V. Magdeburg |
| TKN | Total Kjeldahl Nitrogen, Kjeldahl-Stickstoff (N _{org} + NH ₄ -N) |
| TS/ TS-Gehalt | Trockensubstanzgehalt |
| TW | Trockenwetter (bzgl. Belastungssituation Kläranlage) |
| UCT-Verfahren | an der Universität Capetown (Südafrika) entwickeltes Verfahren der Umlaufführung zur Minimierung des Nitratreintrages in Anaerobbecken |
| VD | Vorgeschaltete Denitrifikation |
| VD-Modell | Verwendetes Simulationsmodell zur Untersuchung der Übertragbarkeit auf Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation |

Zusammenfassung

Am Beispiel einer Kläranlage mit Kaskadenbelebung wurde gezielt nach Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung der Belüftung gesucht. Dabei hatte die Einsparung von Belüftungsenergie bei gleichzeitiger Erhöhung oder wenigstens Erhalt der Betriebssicherheit sowie der Reinigungsleistung der N-Elimination Priorität. Es wurden sowohl geeignete Kombinationen von Betriebseinstellungen (statische Konzepte) als auch darauf aufbauende Steuerungen und Regelungen der Sauerstoffzufuhr (lastflexible Konzepte) möglichst ohne zusätzliche Mess- und Stelleinrichtungen für typische Abwasserzulaufsituationen untersucht.

An der Beispielanlage konnte Belüftungsenergie bei geringeren O_2 -Konzentrationen in den vorderen und dafür höheren O_2 -Konzentrationen in den hinteren Beckenabschnitten gespart werden, ohne die N-Elimination zu beeinträchtigen. Die kontinuierliche, aber gedrosselte Belüftung von Steuerstufen bei gleichzeitiger Senkung der O_2 -Sollwerte in den Nitrifikationszonen hat sich als wirksam erwiesen. Der Luftverbrauch ging um bis zu 15 % zurück, was einer jährlichen Reduzierung der CO_2 -Emission um ca. 1 Mio. kg CO_2 -Äquivalent entspricht. Gleichzeitig wurden NH_4 -N-Spitzen im Ablauf gesenkt. Die genaue Ausprägung dieses sparsamen aber noch ausreichenden Sauerstoffprofils ist jedoch abhängig von verschiedenen Randbedingungen und unterliegt zeitlichen Schwankungen. Um das jeweils optimale Profil einzustellen und damit eine effiziente Belüftung zu gewährleisten, wird für das weitere Vorgehen empfohlen, ein allgemeingültiges Konzept zur lastabhängigen Steuerung der O_2 -Konzentrationen zu entwickeln und in der breiten Praxis zu testen. Auch eine überlagerte Regelung von NH_4 -N im Ablauf durch eine lastflexible Anpassung der O_2 -Sollwerte in den Kaskaden und das Umschalten der Steuerstufenbelüftung für bestimmte NO_3 -N-Konzentrationen haben sich als effektiv erwiesen. Damit ließen sich weitere 5 % der erforderlichen Luftmengen einsparen und auch die N_{ges} -Spitzen im Ablauf der Belebung senken.

Die gefundenen energiesparenden und umweltschonenden Belüftungsstrategien für längs durchströmte Belebungsbecken wurden auch auf eine hochbelastete Benchmarkanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation, auch unter Berücksichtigung von Industrieabwässern, übertragen und getestet. Die dargestellten Untersuchungen dazu illustrieren, dass trotz verfahrens- und belastungsbedingter Einschränkungen ein interessantes Verbesserungspotenzial durch optimierte Grundeinstellungen und durch steuerungs- und regelungstechnische Konzepte auch auf diesem Typ Kläranlagen vorhanden ist. Dieses Potenzial kann bei hoch belasteten Anlagen zur Reduktion von Ablaufspitzen und bei normal und schwach belasteten Anlagen insbesondere zur Verbesserung der mittleren Ablaufwerte und des Energieeinsatzes genutzt werden.

Mit optimierten, aufwandsarmen Grundeinstellungen sowie mit einfachen Regelungen, die auf häufig vorhandenen Ablaufmessungen basieren, kann für die vorherrschenden Lastsituationen der Energieverbrauch auf vielen Kläranlagen deutlich gesenkt werden. Zur Bekämpfung hochdynamischer Lastfälle, die zu extremen Spitzen der Ablaufkonzentrationen führen, sind entsprechende Störgrößenaufschaltungen (Vorsteuerungen) zu empfehlen.

Die Entwicklung, der Vergleich und die Optimierung der Konzepte erfolgte vorwiegend mit dynamischer Simulation am mathematischen Modell; ausgewählte Einstellungen wurden nach erfolgreicher Praxiserprobung inzwischen in den Betrieb der Kläranlage übernommen. Die Untersuchungen zeigen auch, dass eine sorgfältige Planung der Steuerung/Regelung der Stickstoffelimination auf Kläranlagen unter dynamischen Gesichtspunkten erfolgen muss, um das Verbesserungspotenzial in der Praxis auch nutzen zu können.

Die Kooperationspartner ifak system GmbH und die Hochschule Magdeburg-Stendal (FH) danken der Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (AZ: 21499-23).

Einleitung

Das Belebungsverfahren mit vorgeschalteter Denitrifikation und auch die Hintereinanderschaltung mehrerer Kaskaden mit Denitrifikation/Nitrifikation werden in Kläranlagen sehr häufig zur Stickstoffelimination angewandt. Es ist üblich, das Denitrifikationsvolumen durch Trennwände in mehrere hintereinander geschaltete, durchmischte Abschnitte zu unterteilen, wobei die letzten Volumenabschnitte auch wahlweise belüftet werden können. Das Nitrifikationsvolumen ist sehr oft als lang gestrecktes Becken mit Druckbelüftung ausgeführt.

Für den Ablauf der biologischen Abwasserreinigungsprozesse ist die Sauerstoffkonzentration in jedem Beckenabschnitt, letztendlich also das Sauerstoffkonzentrationsprofil der Belebung insgesamt, verfahrensbestimmend. Die Nitrifikation und der CSB-Abbau benötigen ausreichend Sauerstoff, die Denitrifikation erfordert anoxische Zonen. Auch die Prozesse der biologischen P-Elimination sind direkt an die Substrat- und Sauerstoffkonzentrationen gekoppelt und benötigen extra eine anaerobe Zone. Die für kommunale Kläranlagen typische ständige Änderung der Zulauffrachten, aber auch Änderungen der Abwassercharakteristik sowie die örtliche Verfahrensführung und die Schlammbelastung beeinflussen nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Verteilung der Sauerstoffkonzentrationen in allen Belebungsbecken. Deshalb muss die Sauerstoffzufuhr durch Belüftung der Nitrifikationsvolumen laufend dem aktuellen Bedarf angepasst werden. Meistens wird nur eine gemessene Sauerstoffkonzentration oder der gewichtete Mittelwert der Messungen vom Anfang und Ende der lang gestreckten Nitrifikationsbecken, mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen und versucht, den Lufteintrag mit einer Stelleinrichtung und einem Regelalgorithmus dem Bedarf anzupassen. Trotz dieser vorhandenen Regelkreise werden sich bei den betrachteten Reaktorbauformen örtlich immer von den Sollwerten abweichende Sauerstoffgehalte einstellen, die auch noch belastungsabhängig sind.

Die Belüftung stellt damit einen der wichtigsten Ansatzpunkte zur Optimierung des Abwasserreinigungsverfahrens dar und hat direkt Auswirkung auf den Verbrauch von Energie. Gelingt hier eine Energieeinsparung gibt es indirekt eine Umweltentlastung durch Verringerung der CO₂-Emission.

Um eine Regelung der O₂-Konzentration auf wirtschaftliche und gleichzeitig für die aeroben Reinigungsprozesse ausreichende Werte zu ermöglichen, könnte versucht werden, das längs durchströmte, lang gestreckte Nitrifikationsbecken in viele separat geregelte Bereiche aufzuteilen. Das erfordert jedoch erhöhte Investitionskosten für die Umrüstung und zusätzliche MSR-Technik für jeden einzelnen Regelkreis und würde trotzdem keine ideale rückkopplungsfreie Struktur ergeben. Da dies nicht praktikabel ist, werden schon bei der Planung Kompromisse zwischen gesteigerten Betriebskosten durch u. U. örtlich sowie zeitlich zu hohe Sauerstoffkonzentrationen und größeren Investitionskosten durch zusätzliche Regelkreise geschlossen. Aber auch mit der auf modernen Anlagen meist vorhandenen MSR-Technik gibt es ein Einsparpotenzial durch Betriebsoptimierungen der Belüftung einschließlich lastflexibler Regelung der O₂-Konzentrationen. Man kann z. T. schon durch relativ einfache und kostengünstig umzusetzende Maßnahmen günstigere O₂-Konzentrationen im Längsprofil der Belebung einstellen und den Energieverbrauch deutlich senken. Unter besonderen Bedingungen kann dadurch sogar gleichzeitig noch eine merkliche Verbesserung ausgewählter Reinigungsprozesse gewonnen werden.

Am Beispiel einer Kaskadenbelebung wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes gezielt nach diesen praktikablen Möglichkeiten zur Betriebsoptimierung der Belüftung gesucht. Dabei hat die Einsparung von Belüftungsenergie bei gleichzeitiger Erhöhung oder wenigstens Erhalt der Betriebssicherheit sowie der Reinigungsleistung Priorität. Es werden sowohl geeignete Kombinationen dauerhafter Betriebseinstellungen (statische Konzepte) als auch darauf aufbauende MSR-Konzepte zur lastflexiblen Steuerung der Sauerstoffzufuhr (lastflexible Konzepte) untersucht. Bewertung, Vergleich und Optimierung der untersuchten

Varianten erfolgte durch dynamische Simulation. Dazu wird ein mit dem Programm SIMBA erstelltes Simulationsmodell der Kaskadenbelegung des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch im ersten Arbeitspaket aktualisiert und grob kalibriert.

Dieses detaillierte mathematische Modell, mit den relevanten Mess- und Stellgrößen, ist die Grundlage für die Untersuchungen der Konzepte zur optimierten Belüftung. Dabei stehen Konzepte und Parametrierungen für die Belüftung unter Ausnutzung von auf der Anlage gegebenen Möglichkeiten im Mittelpunkt. Deshalb wird versucht, mit geeigneten Kombinationen statischer Einstellungen mit der vorhandenen MSR-Technik Verbesserungen zu erzielen.

Neben der Untersuchung verschiedener Kombinationen statischer Konzepte werden auch verbesserte Strategien für die Belüftungsregelung, insbesondere für eine lastabhängige Luftaufteilung in Beckenlängsrichtung, gesucht. Angestrebt wird eine Reduzierung des Gradienten der O₂-Zehrung im Längsprofil, auch wenn dies nicht durch Online-Messungen erfasst wird. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Variation des belüfteten Volumens bzw. der Sauerstoffsollwerte der einzelnen Abschnitte und deren Auswirkung auf den Energieverbrauch und die Stickstoffelimination; das beinhaltet auch die gezielte Ausnutzung der simultanen Denitrifikation bei geringen O₂-Gehalten. Die mögliche Energieeinsparung durch geringeren Luftverbrauch und die Auswirkungen auf die Reinigungsleistung der Nitrifikation und Denitrifikation werden u. a. auch durch die veränderten Stickstoffablaufkonzentrationen verglichen.

Durch großtechnische Tests auf der Kaskadenanlage soll schließlich die Eignung ausgewählter Betriebsvarianten nachgewiesen werden.

Die Prüfung der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse (Modellcharakter) auf grundsätzlich vergleichbare kommunale und auch industrielle Kläranlagen mit Druckbelüftung und längs durchströmten Belebungsbecken und die Ableitung geeigneter Maßnahmen ist eine Teilaufgabe dieses Vorhabens. Hierzu wird das Modell einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation mit kommunalem und industriellem Abwasserzulauf gewählt, um das betrachtete Spektrum abzudecken und die erzielten Ergebnisse am Modell zu testen. Es wird ein von der COST-Arbeitsgruppe 624 erstelltes und international eingeführtes Benchmark-Modell einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation verwendet. Dieses Benchmark-System ist eine geeignete Plattform für den objektiven Vergleich von Regelungskonzepten für Kläranlagen.

Eine genauere Abschätzung der Folgen von Eingriffen auf die von vielen Wechselwirkungen geprägten Prozesse der Abwasserreinigung einer Kläranlage ist faktisch nur durch dynamische Simulation möglich. Jedoch ist gerade auch für die Anwendung der Simulation die Entwicklung einer systematischen Vorgehensweise erforderlich, die ein tieferes Verständnis der den Luftverbrauch beeinflussenden Prozesse voraussetzt. Deshalb sollen im Vorhaben möglichst allgemein anwendbare Methoden für den Vergleich und die Bewertung der untersuchten Konzepte hinsichtlich des Luftverbrauchs sowie zur Einschätzung des Einsparpotenzials in den einzelnen Beckenabschnitten entwickelt werden.

Hauptteil

1 Darstellung der Arbeitsschritte

1.1 Beispiel Kaskadenbelebung Klärwerk Magdeburg/Gerwisch

1.1.1 Überblick zur Kaskadenbelebung

Die biologische Abwasserreinigung des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch erfolgt nach dem Verfahren der Kaskadendenitrifikation mit integrierter biologischer Phosphorelimination (modifiziertes UCT-Verfahren). Die Kaskadenbelebung besteht aus zwei baugleichen Straßen mit jeweils drei Kaskaden. Jede Kaskade besitzt ein Nutzvolumen von 12 800 m³ und wird durch eine Längstrennwand in ein Nitrifikationsbecken sowie ein Denitrifikationsbecken unterteilt. Damit ergibt sich ein Gesamtreaktionsvolumen von 76 800 m³. Jedes Denitrifikationsbecken ist weiterhin durch überströmte Quertrennwände in fünf Mischzellen unterteilt. Die Aufteilung des Abwasserzulaufes zu den einzelnen Kaskaden erfolgt im Verteilerbauwerk über höhenverstellbare Überfallwehre und kann somit variiert werden. Um eine intensive Durchmischung zu ermöglichen, sind alle anoxischen und anaeroben Mischzellen sowie die sich den jeweiligen Nitrifikationsabschnitten anschließenden Entgasungszonen mit einem Rührwerk ausgestattet. In Abbildung 1.1 ist die Struktur der Kaskadenanlage mit der Zulaufaufteilung (Aufteilungsfaktoren exemplarisch eingezeichnet) und den internen Strömen (mit interner Rezirkulation für Bio-P nach UCT-Verfahren) schematisch dargestellt.

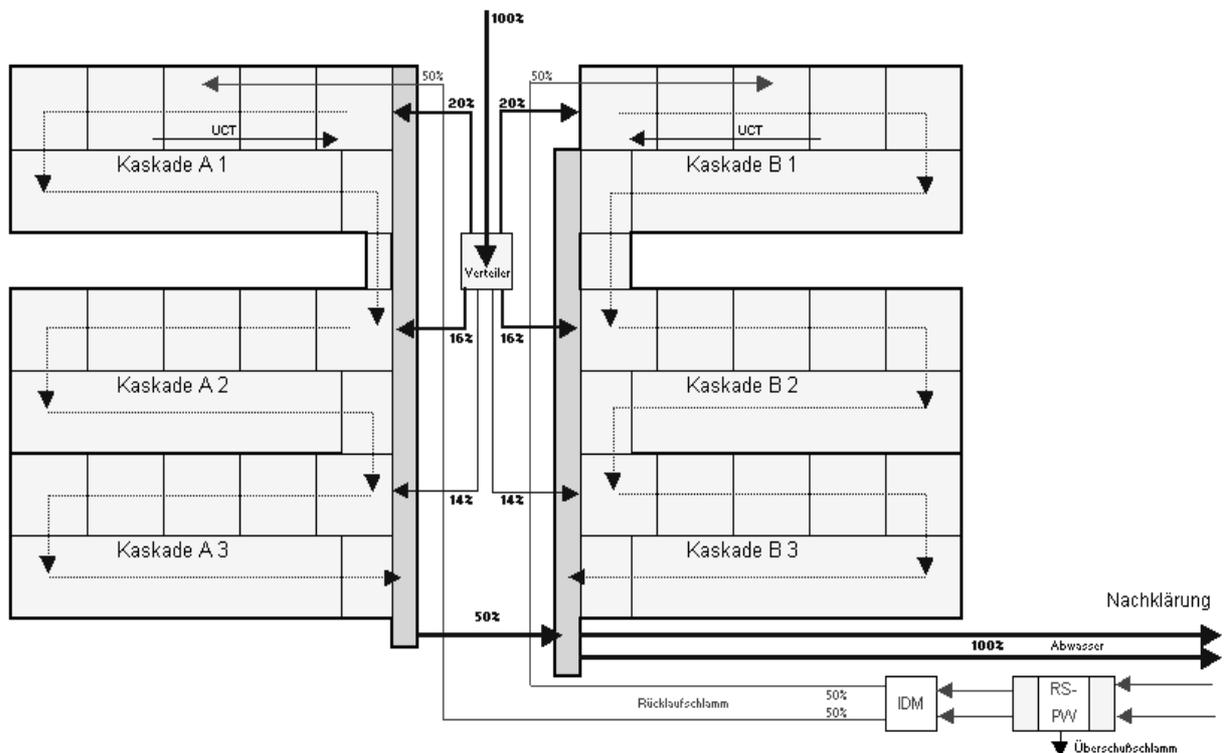


Abbildung 1.1: Schema der Kaskadenanlage [SWM04]

Die feinblasige Druckbelüftung der Nitrifikationszonen erfolgt flächenhaft durch Membranbelüfter. Bei ungünstigen Bedingungen für die Nitrifikation, insbesondere bei niedrigen Abwassertemperaturen, kann das Nitrifikationsvolumen durch die zusätzliche Belüftung von insgesamt zehn mit Belüfteraggregaten versehenen Mischzellen (Steuerstufen) vergrößert werden. Das Anaerobvolumen kann durch entsprechende Betriebsführung zur Denitrifikation genutzt werden.

1.1.2 Simulationsmodell des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch

Modellierung und Simulation erfolgten mit dem Programm SIMBA [SIM07]. Aufgrund der Baugleichheit der beiden Kaskadenstraßen A und B wird stellvertretend nur die Straße A modelliert. Für die Untersuchungen zur Optimierung der Belüftung ist diese Lösung angemessen. Bezüglich der anaeroben und anoxischen Zonen einer jeweiligen Kaskade deckt sich die Struktur des Belebungsmodells mit den durch Längs- und Querwände aufgeteilten Reaktionsvolumen der realen Anlage. Die pfropfenähnlich durchströmten, ungeteilten Nitrifikationszonen werden entsprechend der Belüfterdichte in drei voll durchmischte Abschnitte untergliedert. Eine eventuell vorhandene Rückvermischung entgegen der Strömungsrichtung wird vernachlässigt.

Abbildung 1.2 zeigt das SIMBA-Blockschaltbild der oberen Ebene des Simulationsmodells, mit den Zu- und Abläufen, der Nachklärung (SIMBA-Dreischichten-Nachklärmodell), der Rücklaufschlammführung sowie den relevanten Stellmöglichkeiten. Über diese Oberfläche kann das Modell hinsichtlich der veränderbaren Stellgrößen und Sollwerte parametrisiert werden. Das detaillierte Simulationsmodell der Kaskadenbelebung befindet sich in der zweiten Ebene (Abbildung 1.3) und ist über den Block „Akaskade“ zugänglich; vgl. auch [Sei06a].

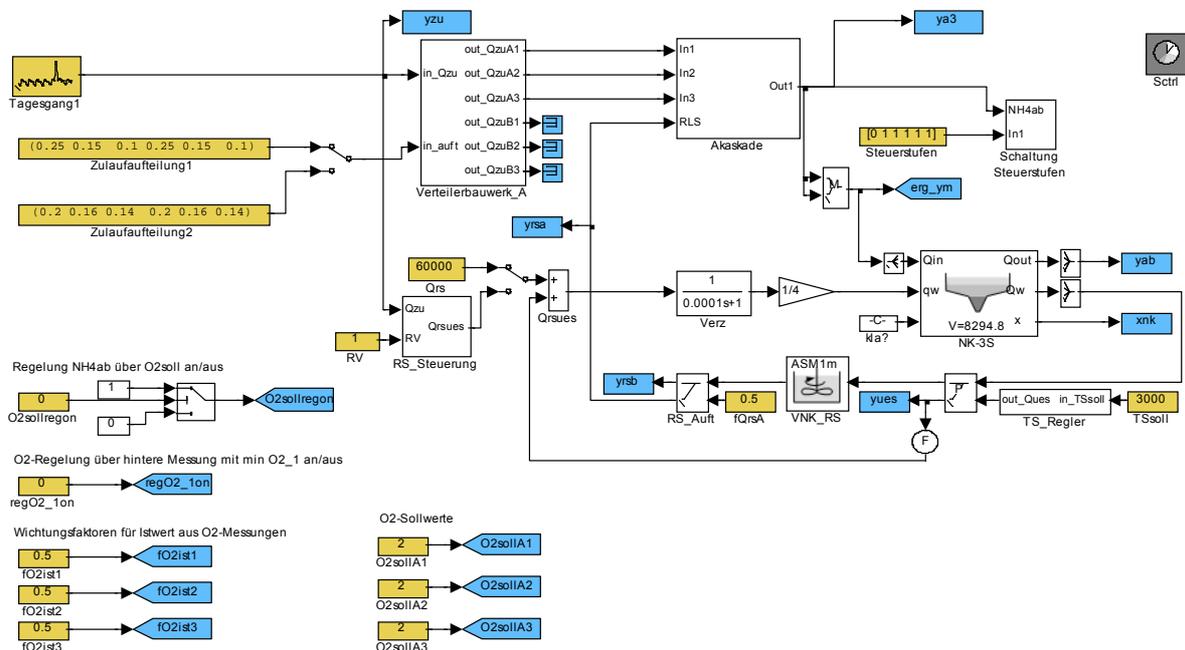


Abbildung 1.2: Simulationsmodell Klärwerk Magdeburg/Gerwisch (obere Ebene)

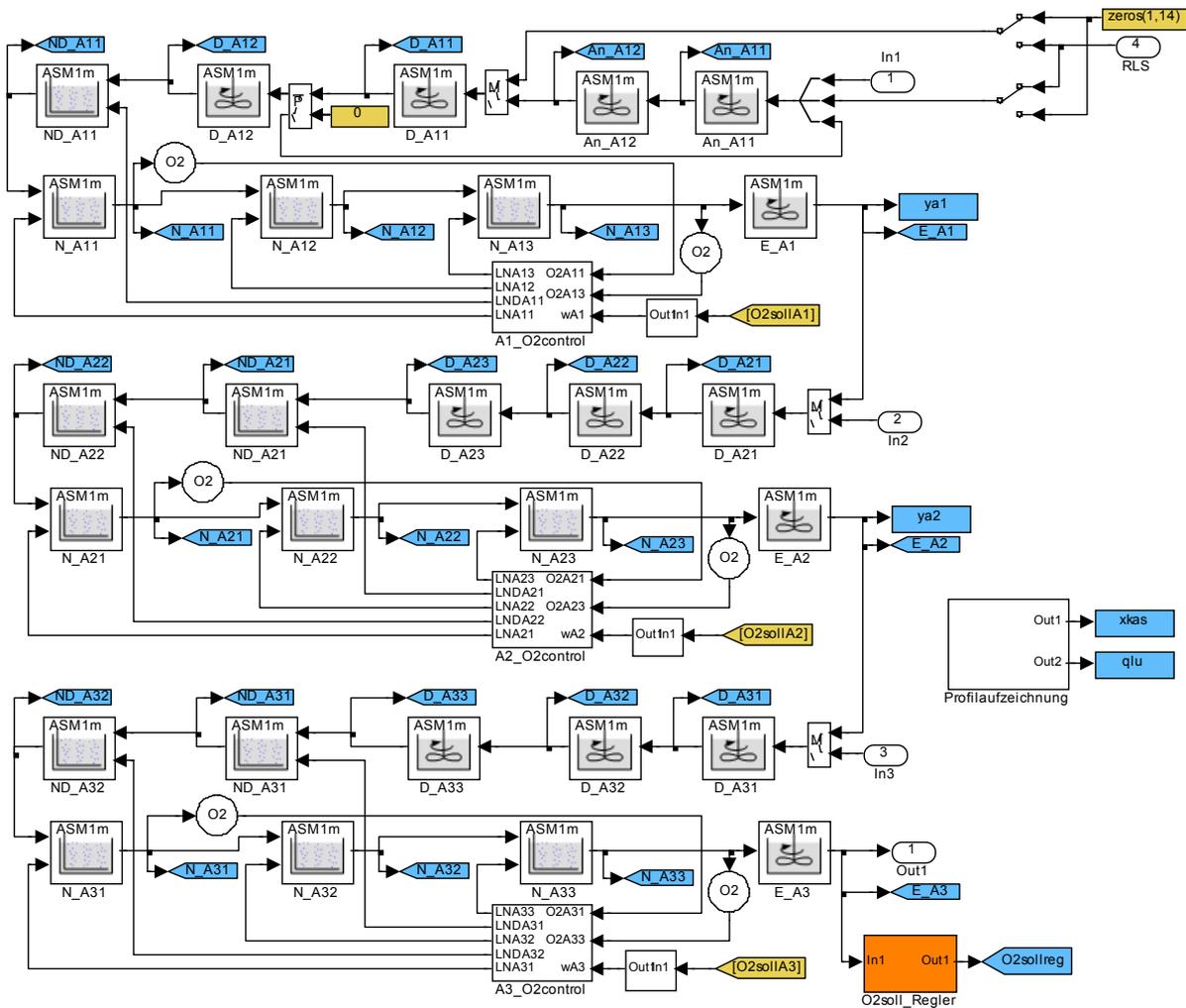


Abbildung 1.3: Simulationsmodell Klärwerk Magdeburg/Gerwisch (zweite Ebene)

Die Modellierung der Sauerstoffregelung und Belüftung berücksichtigt das auf dem Klärwerk vorhandene Konzept:

Jede Kaskade besitzt einen eigenen O₂-Regelkreis. Die Luft wird auf drei Abschnitte der Nitrifikationszone in jeder Kaskade, entsprechend der in Fließrichtung abnehmend gestaffelten Belüfterdichte verteilt. Innerhalb der Kaskade ist eine andere Luftaufteilung nur durch Handverstellung von Absperrklappen in den einzelnen Falleitungen zu den Belüftergittern möglich. Die Luftversorgungsleitungen aller Kaskaden werden von einer zentralen Druckluftbereitstellung gespeist. Die Verstellung der Luftzufuhr zu den einzelnen Kaskaden geschieht durch Blendenregulierschieber. Eine Belüftung der Steuerstufen erfolgt durch Öffnen von Dreieckschiebern in Stichleitungen, die nach dem Blendenregulierschieber von der Luftversorgungsleitung der jeweiligen Kaskade abzweigen. Eine manuelle Drosselung der Luftzufuhr zu den einzelnen Steuerstufen ist über Absperrklappen möglich. Die Sauerstoffkonzentrationen werden im jeweils ersten und letzten Nitrifikationsabschnitt jeder Kaskade online gemessen. Als Regelgröße dient der daraus je Kaskade mit einem Faktor gewichtete Mittelwert. Dieser Faktor beschreibt den Anteil der vorderen Sauerstoffmessung an der Berechnung der Regelgröße. Er wurde für diese Untersuchungen mit 0,5 eingestellt (d. h. gleiche Wichtung von vorderer und hinterer O₂-Messung). Die Öffnung des Blendenregulierschiebers wird durch einen Regler mit PI-Verhalten angesteuert. Als Stellgröße wirkt die in die Kaskade eingeblasene Luftmenge.

Die mit diesem modernen MRS-Konzept modellierte Kaskadenanlage bildet den Ausgangspunkt der Untersuchungen dieses Vorhabens. Für verschiedene Lastfälle (siehe Abschnitt 1.1.4) wurden jeweils **Referenzsimulationen** durchgeführt, welche einen Betrieb

der Anlage ohne die entwickelten Konzepte beschreiben sollen (siehe Tabelle 1.1). Der für den jeweiligen Lastfall durchgeführte Simulationslauf dient als Referenz für die Bewertung der entwickelten Konzepte. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick zu den wesentlichen Einstellungen des Simulationsmodells mit denen die Referenzsimulationen für jeden betrachteten Lastfall durchgeführt wurden:

| Stellgröße/Parameter | Einstellung | Einheit |
|--|-------------|-------------------|
| Aufteilung Zulauf (Anteil Kaskade 1) | 0,5 | - |
| Aufteilung Zulauf (Anteil Kaskade 2) | 0,3 | - |
| Aufteilung Zulauf (Anteil Kaskade 3) | 0,2 | - |
| Rücklaufschlammstrom in Belebung | 60 000 | m ³ /d |
| TS-Gehalt Kaskade 3 | 3 300 | g/m ³ |
| O ₂ -Sollwert Kaskade 1 | 2,75 | g/m ³ |
| O ₂ -Sollwert Kaskade 2 | 2,5 | g/m ³ |
| O ₂ -Sollwert Kaskade 3 | 2,25 | g/m ³ |
| Wichtungsfaktor zur Berechnung der Regelgröße aus den beiden O ₂ -Messungen Kaskade 1 | 0,5 | - |
| Wichtungsfaktor zur Berechnung der Regelgröße aus den beiden O ₂ -Messungen Kaskade 2 | 0,5 | - |
| Wichtungsfaktor zur Berechnung der Regelgröße aus den beiden O ₂ -Messungen Kaskade 3 | 0,5 | - |
| Belüftung Steuerstufen in allen Kaskaden | aus | - |

Tabelle 1.1: Stellgrößen bzw. Parameter des Modells für Referenzsimulationen

Zur Quantifizierung des theoretisch möglichen Potenzials mit grundlegenden Betriebseinstellungen hinsichtlich der Reinigungsleistung und des Luftverbrauches erfolgte darüber hinaus die Modellierung einer „idealen“ Belüftung. Es wird hierfür eine Sauerstoffversorgung angenommen, welche die O₂-Konzentration in allen Beckenabschnitten auf den eingestellten Sollwert regelt (vgl. Abschnitt 1.2.4).

1.1.3 Zulauffraktionierung und Modellkalibrierung

Die Simulationen erfolgen auf Basis des ASM1m [SIM07], einer allgemein anerkannten Modifikation des mathematischen Modellansatzes ASM1 [Hen87]. Die Zulaufmodellierung und der Abgleich (Kalibrierung) des Simulationsmodells erfolgten auf Grundlage einer auf dem Klärwerk durchgeführten Messkampagne. Die Ermittlung eines dynamischen Zulaufes für die Kalibrierung basiert auf diesem Zeitraum von 17 Tagen („Kalibrierungszeitraum“). Im Rahmen der Messkampagne wurden die maßgeblichen Konzentrationen (z. B. CSB, CSB_{filtr.}, BSB₅, N_{ges}, NH₄-N, NO₃-N) i. d. R. aus Tages-Mischproben und Online-Messungen bestimmt. Die maßgeblichen mittleren Belastungswerte sind in Tabelle 1.2 aufgeführt. Die mittleren Frachten entsprechen etwa den über die gesamte Messkampagne bestimmten Werten.

| Parameter | Mittlere Belastungswerte Kalibrierungszeitraum (Zulauf Belebung) | Konzentration (frachtgemittelt bei 44 000 m ³ /d) |
|--------------------|--|--|
| CSB | 32 500 kg CSB/d | ca. 740 g CSB/m ³ |
| BSB ₅ | 13 000 kg BSB ₅ /d | ca. 300 g BSB ₅ /m ³ |
| N _{ges} | 3 500 kg N/d | ca. 79 g N/m ³ |
| NO ₃ -N | 20 kg N/d | ca. 0,5 g N/m ³ |
| Q _d | 44 000 m ³ /d | - |

Tabelle 1.2: Mittlere Belastungswerte für Modellabgleich

Die Fraktionierung des Abwasserzulaufes in die o. g. Stoffgruppen des ASM1 basiert auf der von der DWA-Arbeitsgruppe 2.11.4 beschriebenen Aufteilung nach Erfahrungswerten [Bor98]. Darauf aufbauend wurden neben dem Parameter CSB aber auch die Messwerte von CSB_{fit} und BSB_5 im Zulauf genutzt, um den zufließenden CSB auf die Modell-Fractionen S_s , S_i , X_i , X_s und X_{BH} aufzuteilen. Entscheidend ist die Übereinstimmung des Summenparameters CSB im Modell mit der gemessenen Größe. Damit ist eine wichtige Voraussetzung für die Simulation des ASM1-Modells erfüllt. Unterschiede hinsichtlich anderer Zulauf-Messwerte werden hauptsächlich durch den Fraktionierungsansatz bzw. durch die gedankliche Zuordnung der einzelnen Fraktionen zu den Summenparametern BSB_5 und CSB_{fit} bedingt. Es kann keine völlige Übereinstimmung erreicht werden, da es für die Messwerte BSB_5 und AFS (abfiltrierbare Stoffe) im ASM-Modellansatz keine identischen Stoffgruppen gibt. Sie können nur qualitativ bzw. als Orientierung berücksichtigt werden. Bei der Fraktionierung wurden die Stoffgruppe S_s am BSB_5 gekoppelt. Die Alkalinität S_{ALK} wird mit konstant 8 mol/m^3 angesetzt.

Die Stickstoffkonzentrationen TKN, $NH_4\text{-N}$ und $NO_3\text{-N}$ kennzeichnen die in anorganischer und organischer Form vorliegenden Stickstoffverbindungen. Die DWA-Arbeitsgruppe 2.11.4 sieht eine Übernahme der gemessenen $NH_4\text{-N}$ -Konzentration in das Zulaufmodell vor. Dabei wird die Einhaltung des TKN-Wertes durch Abgleich über die Fraktionen des biologisch abbaubaren organisch gebundenen Stickstoffes (S_{ND} und X_{ND}) und somit über deren Anteilfaktoren am zufließenden CSB gewährleistet. Bei der vorgenommenen Zulauffraktionierung werden die Faktoren für den Anteil organischen Stickstoffes (N_{org}) am CSB als konstant angesetzt und damit N_{org} im Zulauf bestimmt. Die Differenz zum TKN ergibt dann den Gehalt an zufließendem Ammonium-Stickstoff. Entscheidend ist die Übereinstimmung des Summenparameters TKN im Modell mit der gemessenen Größe, da im Verlauf der simulierten Prozesse organischer Stickstoff ammonifiziert wird. Vorteil dieser Vorgehensweise ist, dass Messreihen für Ammonium-Stickstoff im Zulauf nicht zwingend erforderlich sind.

Beim Start der Simulationen zum Modellabgleich wurde von einem stationären Zustand ausgegangen. Der dafür erforderliche konstante Zulauf entspricht den mittleren Belastungswerten des Kalibrierungszeitraumes. Mit diesen mittleren Belastungswerten wurde durch Simulation mehrerer hundert Tage ein stationärer Zustand eingefahren und gleichzeitig die Schlammproduktion abgeglichen. Anschließend werden mit dem modellierten dynamischen Zulauf 17 Tage simuliert. Die Simulationen zur Kalibrierung erfolgen mit einer konstanten Abwassertemperatur von $17,7 \text{ }^\circ\text{C}$, was dem Mittelwert der Temperaturmessungen in der Belebung während des Kalibrierungszeitraumes entspricht. Die Abwassertemperatur schwankt während der betrachteten Zeitspanne kaum und bleibt noch im Bereich eher sommerlicher Verhältnisse.

Das ASM1-Belebtschlammmodell sieht keine eigene Stoffgruppe zur Bilanzierung des Trockensubstanzgehaltes vor. Um den simulierten TS-Gehalt zu erfassen, kann er im Anlagenmodell an den entsprechenden Stellen mit einem Faktor aus der Summe der partikulären CSB-Fractionen (CSB_x) berechnet werden. Der Faktor beschreibt das Verhältnis zwischen dem totalen Trockensubstanzgehalt (incl. anorganischem Anteil) und dem partikulären CSB. Dieses Verhältnis hat großen Einfluss auf die Höhe der simulierten Schlammproduktion. Mit den aus den Messungen des Kalibrierungszeitraumes bestimmten Mittelwerten für den TS-Gehalt $3\ 300 \text{ g/m}^3$ und den partikulären CSB von $2\ 850 \text{ g/m}^3$ im Ablauf der Kaskadenstraße A wurde hier dieser Faktor bestimmt.

Für den Abgleich der Schlammproduktion wird im Modell ein konstanter Überschuss-schlammabzug, der dem Mittelwert der betrachteten Zeitspanne entspricht, vorgegeben. Anschließend wird der Faktor αX_i (Anteil inerte, partikulärer CSB X_i am gesamten CSB im Zulauf) so gewählt, dass sich ein mittlerer TS-Gehalt im Ablauf der Belebung wie auf der realen Anlage einstellt. Um die Schlammproduktion und damit das Schlammalter und die Schlammzusammensetzung im Vorfeld der Simulationen mit dynamischem Zulauf der Realität anzupassen, wird als Bezugszeitraum für die Ermittlung der Schlammproduktion

eine Zeitspanne mehrerer Wochen vor dem Kalibrierungszeitraum gewählt und zum Zustand einfahren genutzt. Hierfür wurde eine Schlammproduktion von ca. 15 000 kg TS/d ermittelt. Um diese Schlammproduktion unter den genannten Rahmenbedingungen auch mit dem Modell zu simulieren, wird der Anteil an inertem, partikulären CSB am gesamten CSB im Zulauf auf $\alpha X_1 = 0,15$ gesetzt. Diese dicht bei den Standard-Parametern nach [Bor98] liegende Einstellung wird für alle folgenden Simulationen beibehalten.

Nach dem vorangegangenen Abgleich der Schlammproduktion und des mittleren Schlammalters gelingt in der Simulation ohne Veränderung von biologischen Parametern gegenüber dem in Deutschland genutzten Standardparametersatz [Bor98] ein ausreichend genaues Nachfahren der mittleren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration bei Trockenwetter im Ablauf von ca. $0,2 \text{ g N/m}^3$ (weitestgehende Nitrifikation). Mit diesen Parametern werden nur die bei Regenereignissen auftretenden $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufspitzen zu gering simuliert. Würde man deshalb die i. d. R. für die Kalibrierung der Nitrifikation verwendete maximale Wachstumsrate der Nitrifikanten $\mu_{a,\text{max}}$ senken, könnten zwar die Spitzen besser abgebildet werden, jedoch würden sich dann bei einer Simulation mit stationärem (mittleren) Zulauf zu hohe Mittelwerte einstellen, was auf eine zu gering simulierte Nitrifikantenmenge und damit Nitrifikationsleistung schließen lässt. Abbildung 1.4 bis Abbildung 1.6 zeigen die im Ergebnis des Modellabgleichs simulierten Konzentrationen ($\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, N_{ges}) im Ablauf der Kaskadenstraße A, verglichen mit den entsprechenden Online-Messungen und den Tages-Mischproben der Messkampagne.

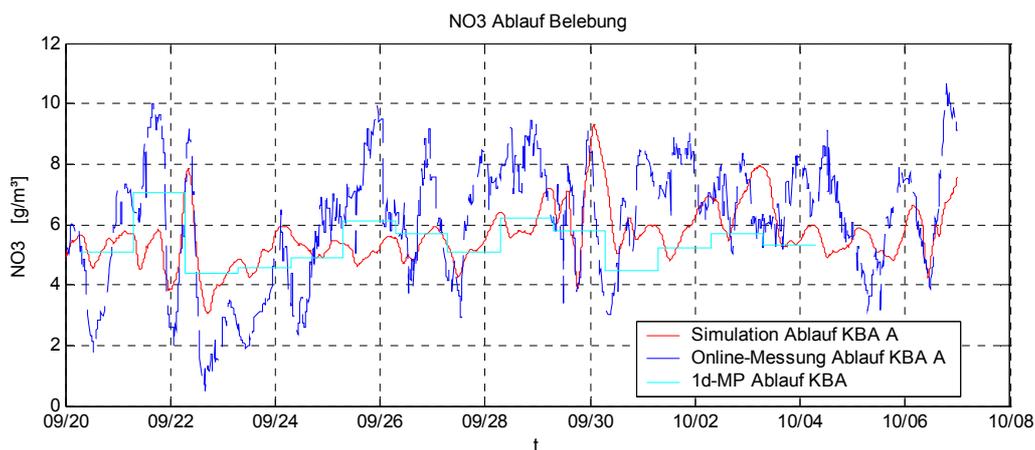


Abbildung 1.4: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)

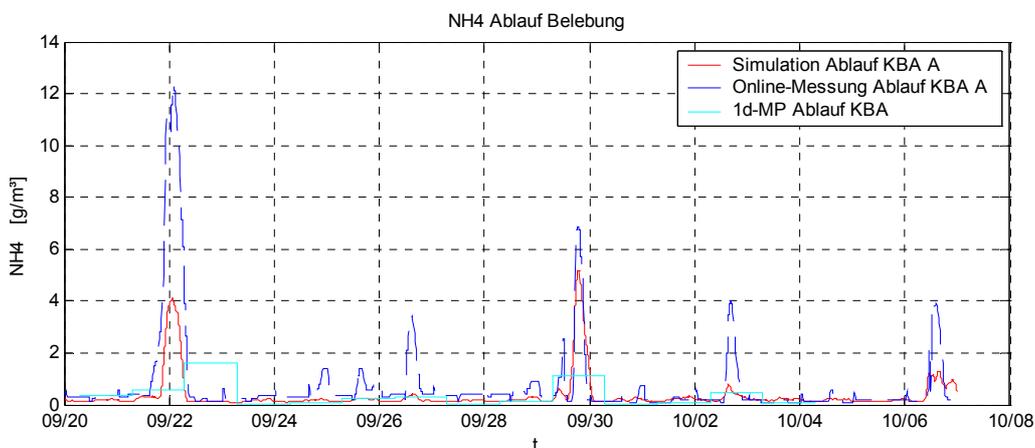


Abbildung 1.5: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)

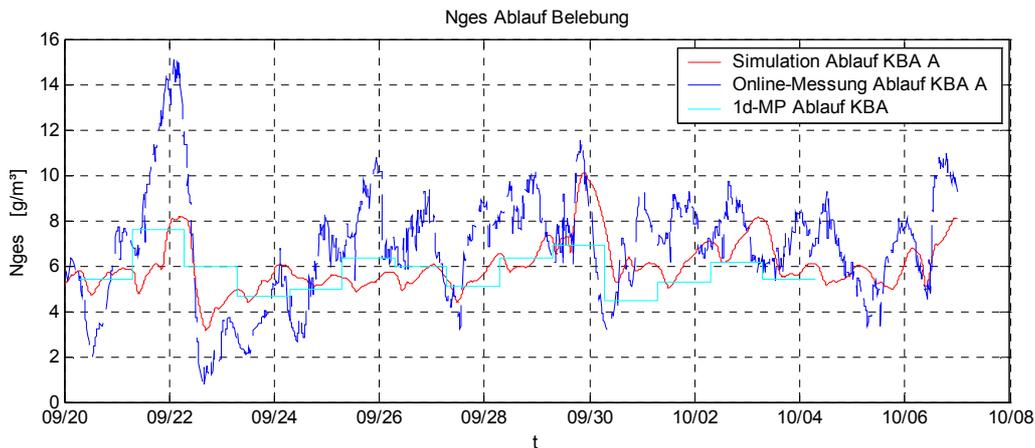


Abbildung 1.6: Vergleich $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf Belebung (Modellabgleich)

Das Ergebnis des Modellabgleichs ist hinreichend gut. Der Verlauf der Ammonium- und Nitratkonzentrationen wurde nicht in detaillierter Übereinstimmung zu den Online-Messungen simuliert. Hierzu wären zusätzliche Messreihen zur Erfassung der Tagesdynamik der Stickstoffbelastung im Zulauf über den gesamten Kalibrierungszeitraum erforderlich.

1.1.4 Definition von Lastfällen

Es werden drei relevante Lastfälle definiert, die sich hinsichtlich der Abwassertemperatur, dem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf zur Belebung - kommunales Abwasser weist nach einer Kurzvorklärung i. d. R. ein TKN : CSB-Verhältnis von 1 : 9 auf [ATV00b] - und dem Verlauf von Regenereignissen unterscheiden:

- **Qt2Qm1:** „Standardlastfall“ (17,7 °C, 4 Tage Trockenwetter bei mittlerem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf der Belebung von rd. 1 : 9, anschließender Frachtstoß infolge maximalen Mischwasserzuflusses und „Regenwetternachlauf“)
- **Qt1Qm1:** „Sommerlastfall“ (20 °C, 4 Tage Trockenwetter mit erhöhtem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf der Belebung von rd. 1 : 7 mit anschließendem Frachtstoß infolge maximalen Mischwasserzuflusses)
- **Qt2Qm2:** „Winterlastfall“ (12 °C, 4 Tage Trockenwetter bei mittlerem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf der Belebung von rd. 1 : 9, anschließend mittleres Regenereignis und maximaler Mischwasserzufluss am siebten Tag)

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die den Lastfällen Qt2Qm1 (Lauf 1) und Qt1Qm1 (Lauf 2) zugrunde gelegten Ganglinien von Menge, CSB und TKN des Abwasserzulaufes zur Belebung.

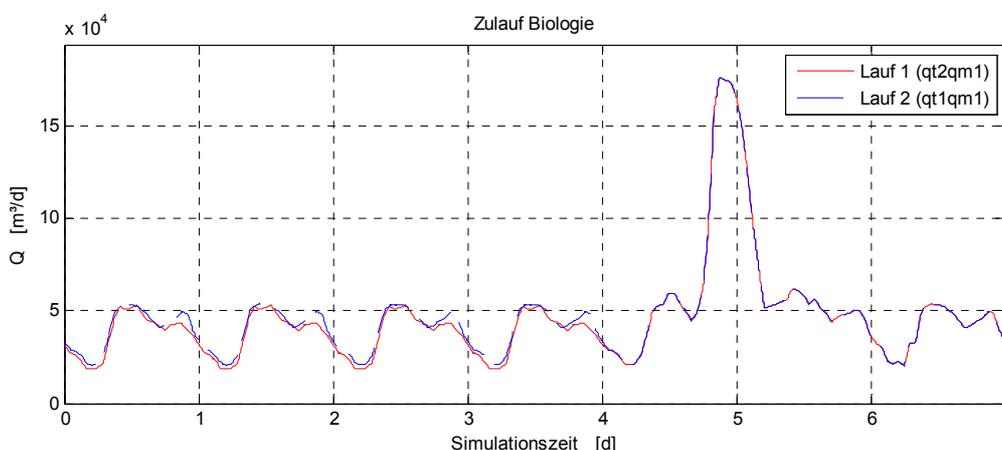


Abbildung 1.7: Abwasserzufluss zur Belebung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1)

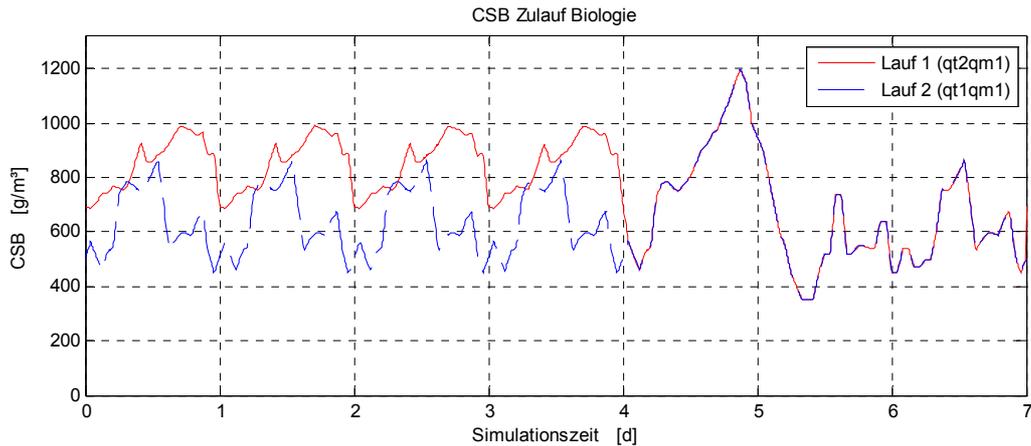


Abbildung 1.8: CSB im Zulauf zur Belegung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1)

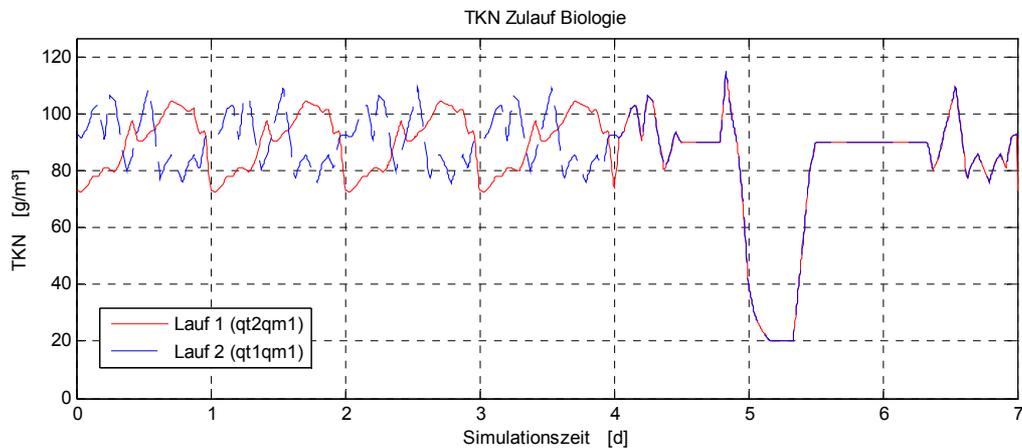


Abbildung 1.9: TKN im Zulauf zur Belegung (Lastfälle Qt2Qm1 und Qt1Qm1)

Weiterhin wurde für alle Konzepte und Lastfälle mit zwei verschiedenen Aufteilungsverhältnissen für den Zulauf auf die drei Kaskadenstufen gerechnet; vgl. [ATV97]:

- **„kopflastige“ Aufteilung:** 50 % in Kaskade 1, 30 % in Kaskade 2, 20 % in Kaskade 3
(Ziele: Steigerung Wirkungsgrad der Denitrifikation - bei ausreichender Denitrifikationskapazität in der letzten Kaskade; Dämpfung $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufspitzen)
- **Aufteilung für gleiche mittlere Schlammbelastung** in den drei Kaskadenstufen: 40 % in Kaskade 1, 32 % in Kaskade 2, 28 % in Kaskade 3
(Ziele: Angleichen der mittleren Schlammbelastung in den drei Kaskadenstufen; Erreichen eines gegenüber der „kopflastigen“ Aufteilung höheren Schlammalters; Erhöhung der Denitrifikationskapazität in der letzten Kaskade)

1.2 Konzepte zur Optimierung der Belüftung

1.2.1 Herleitung von Kenngrößen

Die erforderliche Energie für die Sauerstoffzufuhr macht bis zu zwei Drittel des Gesamtbedarfes einer Kläranlage aus. Bei einer Erhöhung der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken steigt die erforderliche Sauerstoffzufuhr und damit die benötigte Luftmenge entsprechend folgender Gleichung überproportional an; vgl. [ATV95] und [ATV00a]:

$$\alpha OC \approx OV \cdot \frac{SO_{sat}}{SO_{sat} - SO} \quad \text{Gl. 1.1}$$

mit

| | | |
|-------------|--|---------------------|
| SO_{sat} | Sättigung für gelösten Sauerstoff bei der jeweiligen Wassertemperatur | [g/m ³] |
| SO | Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken | [g/m ³] |
| OV | Sauerstoffverbrauch infolge Zehrung | [g/d] |
| αOC | Sauerstoffzufuhr durch die Belüftung in belebtem Schlamm | [g/d] |
| α | Sauerstoffzufuhrfaktor bzw. Grenzflächenfaktor (Quotient der Sauerstoffzufuhr in belebtem Schlamm und in Reinwasser) | [-] |

Abbildung 1.10 veranschaulicht den Einfluss der Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken auf den Luftmehrbedarf für die Sauerstoffzufuhr, bezogen auf den Bedarf bei $SO = 0 \text{ g/m}^3$ (d. h. bezogen auf die für die O_2 -Zehrung erforderliche „genutzte“ Luftmenge), für eine Abwassertemperatur von 20°C; vgl. auch [ATV 1995].

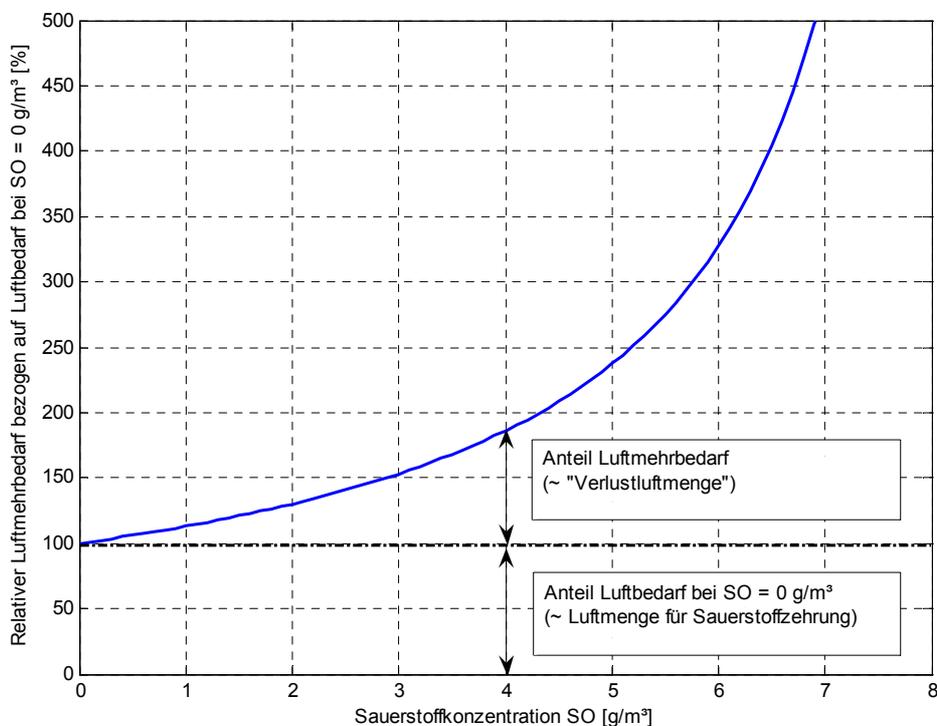


Abbildung 1.10: Einfluss der Sauerstoffkonzentration auf die erforderliche Luftmenge

Um die Effizienz der Belüftung zu bewerten, wird die Größe der **Verlustluftmenge** eingeführt, welche den absoluten Mehrbedarf an Luft infolge des Sauerstoff-Sättigungsgrades

beschreibt. Dem liegt der Gedanke zugrunde, dass ein bloßer Vergleich der O₂-Konzentrationen in den Abschnitten eines pfropfenförmig durchströmten Reaktors noch keinen eindeutigen Rückschluss auf die Auswirkungen auf die entsprechend verbrauchten Luftmengen ermöglicht. Hier ist auch die Sauerstoffzehrung im betrachteten Abschnitt zu berücksichtigen, die in Fließrichtung mehr oder weniger deutlich abnimmt. Ist die Zehrung im Ablaufbereich der Nitrifikation sehr gering, wird sich auch bei kleinen Luftmengen ein hoher Sauerstoffgehalt einstellen bzw. im Umkehrschluss: ein Senken des O₂-Gehaltes bewirkt an dieser Stelle nur eine geringe Energieeinsparung. Es kann also abgeleitet werden, dass die Einstellung einer höheren Sauerstoffkonzentration im vorderen Nitrifikationsabschnitt einen weitaus gravierenderen Anstieg der dafür erforderlichen Luftmengen und damit auch der Verlustluftmengen verursacht, als es bei einer entsprechenden Erhöhung im letzten Abschnitt der Fall ist.

Die Zehrung ist bei ideal funktionierender O₂-Regelung (O₂-Gehalt über Zeit konstant) proportional zur Sauerstoffzufuhr und drückt sich somit auch in der absoluten Menge der zugeführten Luft aus. Der Einfluss des Sauerstofftransportes (Zulauf und Ablauf der einzelnen Abschnitte) kann hier vernachlässigt werden. Es gilt dann abgeleitet aus Gl. 1.1 folgender proportionaler Zusammenhang; vgl. auch [Sva05]:

$$OV = \alpha OC \cdot \frac{SO_{sat} - SO}{SO_{sat}} \quad \text{Gl. 1.2}$$

Die Luftmenge (Q_L) kann gedanklich in einen Anteil, der zur Deckung des Sauerstoffverbrauchs (entsprechend der Sauerstoffzufuhr bei O₂-Konzentration von 0 g/m³) nötig ist und einen mit zunehmendem Sauerstoffgehalt steigenden ungenutzten Anteil (Verlustluftmenge) zerlegt werden (siehe Abbildung 1.10). Der Luftvolumenstrom ergibt sich also aus einem für die Zehrung genutzten Anteil und einer vom Sauerstoffgehalt bzw. -sättigungsgrad abhängigen Verlustluftmenge wie folgt:

$$Q_L = Q_{L,Z} + Q_{L,V} \quad \text{Gl. 1.3}$$

mit

| | | |
|------------------|---|----------------------|
| Q _L | Luftmenge (proportional zu αOC) | [Nm ³ /d] |
| Q _{L,Z} | Anteil Luftmenge f. O ₂ -Zehrung/-verbrauch (proportional zu OV) | [Nm ³ /d] |
| Q _{L,V} | Verlustluftmenge | [Nm ³ /d] |

Mit den bei konstanten Rahmenbedingungen für die Sauerstoffzufuhr (spezifische Sauerstoffzufuhr in [g/(m³m)] des Belüftungssystems) geltenden proportionalen Abhängigkeiten (Q_L ~ αOC und Q_{L,Z} ~ OV) kann aus Gl. 1.2 folgende Gleichung abgeleitet werden:

$$Q_{L,Z} = Q_L \cdot \frac{SO_{sat} - SO}{SO_{sat}} \quad \text{Gl. 1.4}$$

Die Verlustluftmenge berechnet sich demnach wie folgt aus Q_L:

$$Q_{L,V} = Q_L - Q_{L,Z} = Q_L - Q_L \cdot \frac{SO_{sat} - SO}{SO_{sat}} = Q_L \left(1 - \frac{SO_{sat} - SO}{SO_{sat}} \right) \quad \text{Gl. 1.5}$$

Durch Zusammenfassen des rechten Terms, welcher den O₂-Sättigungsgrad (= 1-O₂-Sättigungsdefizit) beschreibt, vereinfacht sich die Gleichung für die Berechnung der Verlustluftmenge wie folgt:

$$Q_{L,V} = Q_L \cdot \frac{SO}{SO_{sat}} \quad \text{Gl. 1.6}$$

Die Betrachtung der Verlustluftmenge im Zusammenhang mit der entsprechenden Sauerstoffkonzentration erlaubt dann eine Einschätzung des Einsparpotenzials und speziell bei längs durchströmten Belebungsbecken auch eine Lokalisierung dieses Potenzials für die einzelnen Abschnitte. Verfügt das ppropfenförmig durchströmte oder kaskadenförmige Belebungsbecken über mehrere Sauerstoff- und auch Luftmengenmessungen im Längsprofil der Nitrifikation besteht die Möglichkeit einer online-Erfassung der entsprechenden Verlustluftmengen und damit der Einbindung in innovative MSR-Konzepte (siehe Abschnitt 1.2.4).

1.2.2 Entwicklung und Simulation statischer Konzepte für die Beispielanlage

Für die Simulationsuntersuchungen wurden verschiedene statische Konzepte zur Optimierung der Belüftung des Klärwerkes erarbeitet. Es erfolgte die Untersuchung folgender längerfristiger Eingriffsmöglichkeiten:

- a) kontinuierliche Belüftung von Steuerstufen
- b) Senkung der O₂-Sollwerte
- c) Drosselung der Luftzufuhr zu einzelnen Steuerstufen
- d) Änderung der statischen Luftaufteilung
- e) Wichtungsfaktoren zur Berechnung der Regelgröße aus O₂-Messungen

Hierbei liegt der Schwerpunkt auf einer Kombination der Maßnahmen a, b und c. Einer Änderung der statischen Luftaufteilung wird in Abstimmung mit dem Betreiber zunächst geringe Priorität eingeräumt. Grund hierfür ist die im Vergleich mit den anderen Maßnahmen relativ aufwändige praktische Umsetzung (genaue Einstellung der simulierten Luftaufteilung auch auf der Anlage). Zudem wurde im Zuge der Simulationsanalysen deutlich, dass sich ein großer Teil des (theoretisch) vorhandenen Optimierungspotenzials bereits durch die Maßnahmen a bis c ausschöpfen lässt. Aus den Untersuchungen mit dem „idealen“ Belüftungsmodell (siehe Abschnitte 1.1.2 und 1.2.4) geht hervor, dass die Einstellung der Luftaufteilung aus energetischen Gründen grundsätzlich so erfolgen sollte, dass sich in den vorderen Bereichen der Nitrifikation nicht zu hohe Sauerstoffgehalte einstellen. Abhängig von der Zulaufast und der baulich bedingten Belüfterdichte, sind dafür ggf. die Absperrklappen in den einzelnen Fallleitungen zu den vorderen Belüftergittern zu drosseln.

Eine Änderung der im Punkt e genannten Wichtungsfaktoren gegenüber der Referenzeinstellung von 0,5 (d. h. gleiche Wichtung von vorderer und hinterer O₂-Messung; vgl. Tabelle 1.1 in Abschnitt 1.1.2) bewirkt stets höhere Schwankungen der Sauerstoffkonzentration im Bereich des Beckenabschnittes mit geringer gewichteter O₂-Messung. Aufgrund dieses hier unerwünschten Effektes wurde diese Eingriffsmöglichkeit bei den folgenden Untersuchungen nicht weiter betrachtet.

Ein wichtiges Resultat der Untersuchung statischer Konzepte ist der Nachweis, dass sich mit einer ständig gedrosselten Belüftung von einzelnen Steuerstufen, besonders große Einsparungen hinsichtlich des Luftverbrauches bei Erhalt bzw. Verbesserung der Reinigungsleistung erzielen lassen. Die Vergrößerung des aeroben Volumens durch die Belüftung jeweils einer Steuerstufe erlaubt eine moderate Senkung der Sauerstoffsollwerte. Unter Berücksichtigung von Nitrifikation, Denitrifikation und Luftverbrauch haben sich gleiche

Sollwerte für alle Kaskaden als besonders günstig herausgestellt. Wesentlich höhere O_2 -Sollwerte als die hier gewählten 2 g/m^3 , sollten nur in Kombination mit weiteren Parametervariationen bzw. mit lastflexiblen Konzepten (siehe Abschnitt 1.2.3) gewählt werden, weil hierdurch u. U. die Denitrifikationsleistung verringert werden kann. Infolge der im Vergleich zur Referenz (vgl. Tabelle 1.1) geringeren Sauerstoffgehalte in der Nitrifikation und der gedrosselten Luftzufuhr zu den Steuerstufen lässt sich durch simultane Denitrifikation die N-Elimination u. U. sogar noch steigern. Geringere O_2 -Sollwerte als 2 g/m^3 wurden, um die Nitrifikationsleistung in den Nitrifikationszonen hinreichend zu gewährleisten, im Rahmen der Untersuchung statischer Konzepte nicht betrachtet.

Für eine sofortige und dauerhafte Einstellung wurden die folgenden Maßnahmen-Kombinationen (MK) vorgeschlagen, dessen Anwendung vor allem von der Zulaufbelastung (insbesondere vom TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf) und von der durch den Betreiber gesetzten Priorität (N_{ges} im Ablauf, $NH_4\text{-N}$ im Ablauf, Höhe der Reduzierung des Luftverbrauches) abhängt:

- **MK1:** gedrosselte Belüftung der Steuerstufe in Kaskade 1
- **MK2:** gedrosselte Belüftung der jeweils hinteren Steuerstufen (und Senkung der O_2 -Sollwerte) in allen Kaskaden
- **MK3:** gedrosselte Belüftung aller Steuerstufen (und Senkung der O_2 -Sollwerte) in allen Kaskaden

Diese Maßnahmen-Kombinationen wurden durch Simulation näher untersucht und bewertet sowie hinsichtlich der Parametrierung weiter optimiert. Die Analyse der geeigneten Maßnahmen-Kombinationen erfolgte durch Simulation, Bewertung und Dokumentation für alle modellierten Lastfälle und Zulaufaufteilungen. An dieser Stelle werden nur exemplarisch einige besonders wichtige Simulationsergebnisse dokumentiert.

Simulation MK1:

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für die Maßnahmen-Kombination 1 exemplarisch mit dem Lastfall Qt2Qm1 (4 Tage Trockenwetter und anschließender max. MW-Zufluss) bei einer Zulaufaufteilung auf die drei Kaskaden von 50 % : 30 % : 20 % simulierte Zeitverläufe für $NO_3\text{-N}$, $NH_4\text{-N}$ und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Lauf 2) im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1).

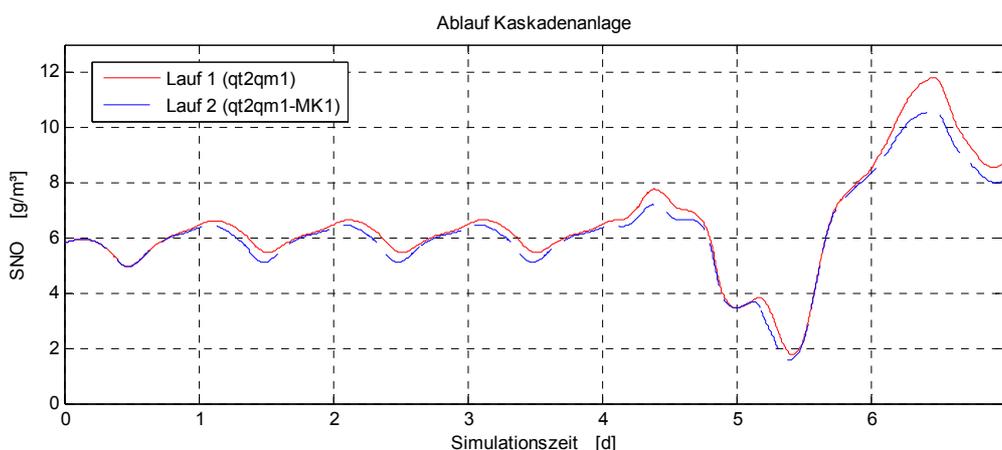


Abbildung 1.11: $NO_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

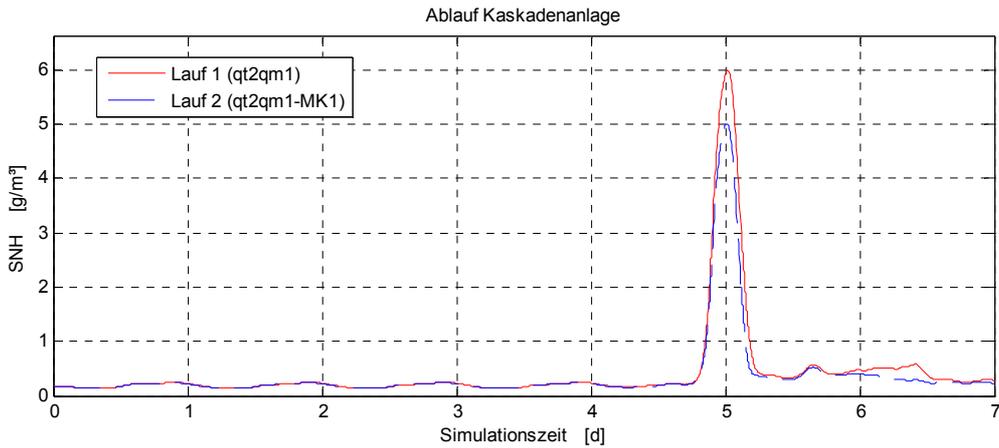


Abbildung 1.12: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

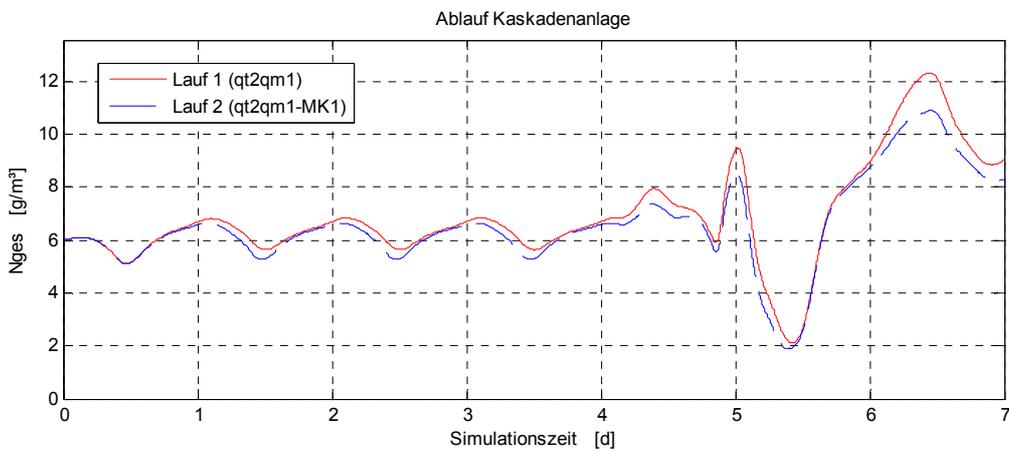


Abbildung 1.13: N_{ges} Ablauf Belebung (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

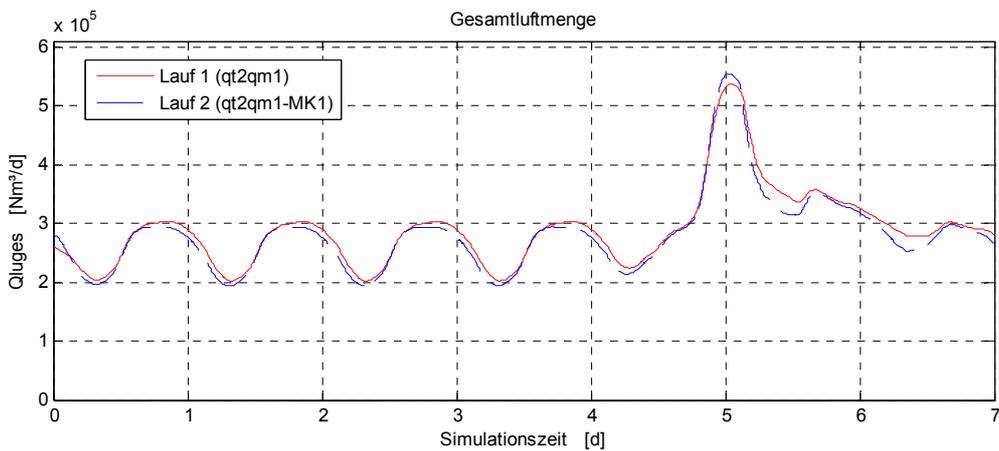


Abbildung 1.14: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen am exemplarisch betrachteten Lastfall, dass sich die gedrosselte Belüftung der Steuerstufe in der ersten Kaskade, günstig auf alle Zielgrößen auswirkt. Wenn auch die eingesparte Luftmenge mit ca. 3 % nur begrenzt ausfällt, so ist es doch bemerkenswert, dass dieses einfache Konzept sowohl eine Senkung der Ammoniumspitzen als auch der Nitratkonzentration im Ablauf bewirkt. Letzteres wird durch eine simultane Denitrifikation in der gedrosselt belüfteten Steuerstufe erreicht, während im Referenzfall hier nahezu anaerobe Verhältnisse herrschen und somit keine Denitrifikation mehr stattfindet. Dies wird in der folgenden Darstellung des über die Zeit gemittelten Profils der simulierten Denitrifikationsrate über das Beckenvolumen einer

Kaskadenstraße in Fließrichtung im Vergleich von Referenz (Lauf 1) und MK1 (Lauf 2) deutlich. Abbildung 1.16 zeigt das entsprechende Profil der Nitrifikationsrate.

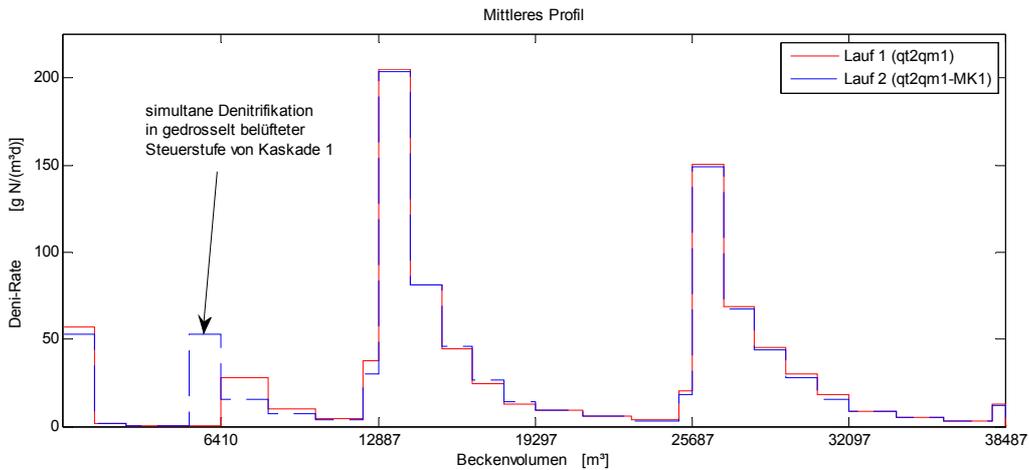


Abbildung 1.15: Mittleres Profil Denitrifikationsrate (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

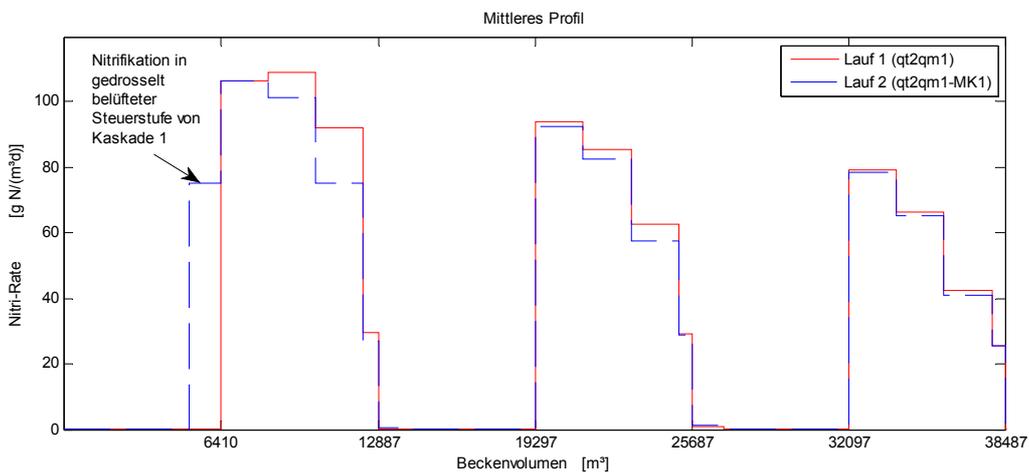


Abbildung 1.16: Mittleres Profil Nitrifikationsrate (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

Es wird deutlich, dass in der gedrosselt belüfteten Steuerstufe trotz des geringen Sauerstoffgehaltes noch eine signifikante Nitrifikationsleistung simuliert wurde, was durch das noch hohe Ammoniumangebot in diesem Bereich begünstigt wird (hier praktisch keine $\text{NH}_4\text{-N}$ -Limitierung der Nitrifikation). Wie an den entsprechenden Nitrifikationsraten zu erkennen ist, muss deshalb in den folgenden Abschnitten weniger Ammonium abgebaut werden, was sich auch auf die hinteren Kaskaden auswirkt. Über die gesamte Kaskade betrachtet, wird die Nitrifikationsleistung gegenüber dem Referenzfall verbessert, insbesondere wenn bei Mischwasser-Frachtstößen auch die hinteren Abschnitte stärker belastet werden.

Dass trotz der gesteigerten Abbauleistung ein geringerer Luftverbrauch simuliert wurde, wird anhand der folgenden Abbildungen verdeutlicht. Abbildung 1.17 bis Abbildung 1.19 zeigen für das gewählte Beispiel die über die Zeit gemittelten Profile über das Beckenvolumen einer Kaskadenstraße in Fließrichtung für die O_2 -Konzentration, die O_2 -Zehrung sowie den entsprechenden Luftverbrauch (Vergleich Referenz - Lauf 1 und MK1 - Lauf 2). Die zusätzlich dargestellten fein gestrichelten Linien beschreiben im Zehrungs-Diagramm den Anteil der Nitrifikanten an der Sauerstoffzehrung und im Luftmengen-Diagramm den Anteil der berechneten Verlustluftmenge (vgl. Abschnitt 1.2.1).

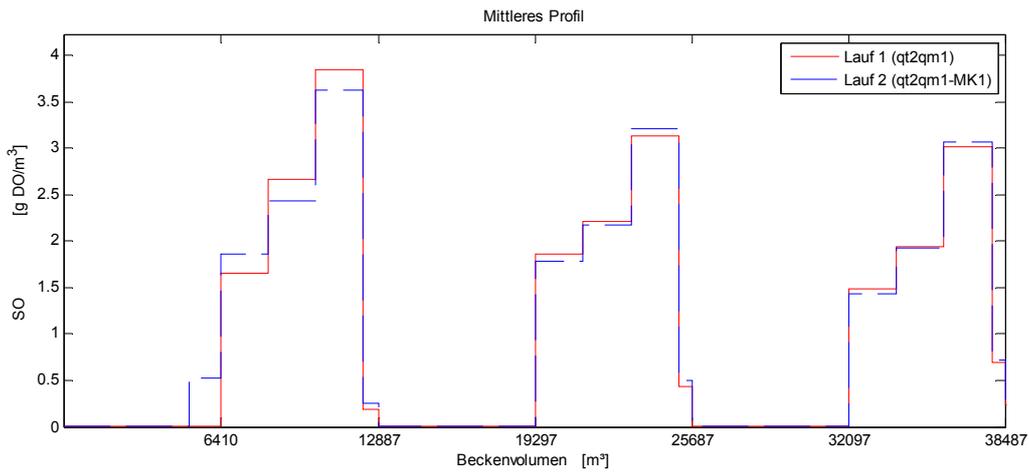


Abbildung 1.17: Mittleres Profil O₂-Gehalt (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

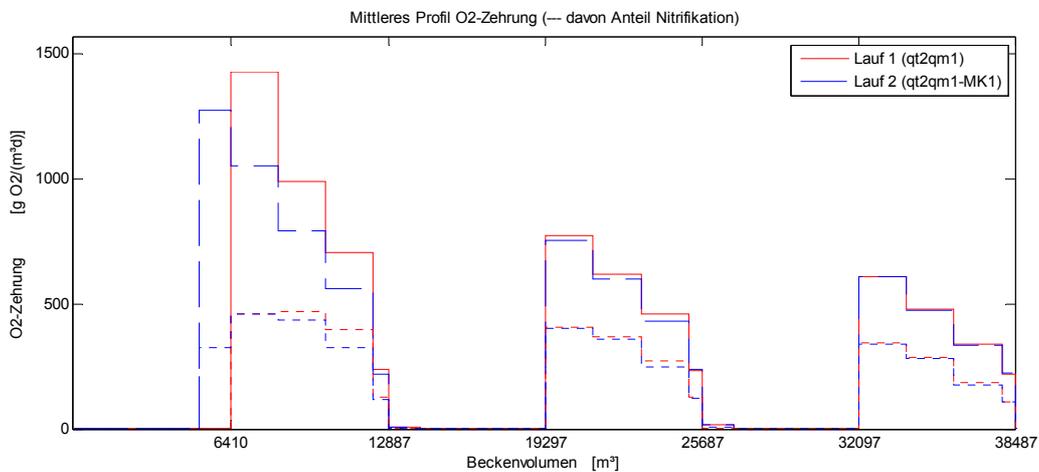


Abbildung 1.18: Mittleres Profil O₂-Zehrung (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

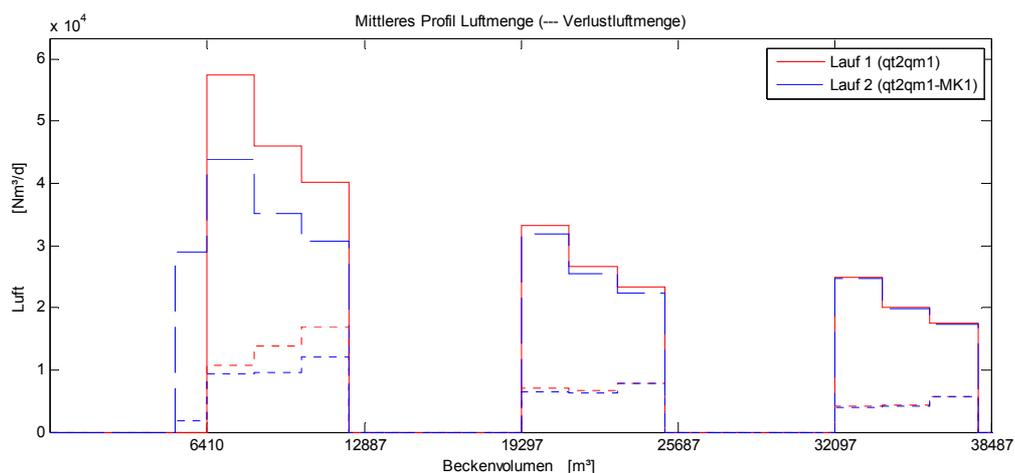


Abbildung 1.19: Mittleres Profil Luftmenge (MK1, Lastfall Qt2Qm1)

Bei der gemeinsamen Auswertung der Profildarstellungen wird deutlich, dass ein alleiniges Betrachten der örtlichen O₂-Konzentrationen in längs durchströmten Belebungsbecken bzw. Kaskadenanlagen keine eindeutigen Rückschlüsse auf die entsprechend verbrauchten Luftmengen und somit auch das Energieeinsparpotenzial in den jeweiligen Abschnitten liefert. Es muss auch die O₂-Zehrung im betrachteten Abschnitt berücksichtigt werden, deren

Profil in Fließrichtung mehr oder weniger deutlich abnimmt und von vielen Faktoren abhängt (Zulaufast, Betrieb der Steuerstufen, O₂-Gehalt, etc.); vgl. Abschnitt 1.2.1.

Gerade die Variation des belüfteten Volumens im Anlagenbetrieb (Steuerstufen) beeinflusst sowohl O₂-Zehrungs-, als auch O₂-Profile und damit den Luftverbrauch. Im gezeigten Beispiel bewirkt das Zuschalten der Belüftung in der ersten Steuerstufe die „Vorverlagerung“ eines Teils der Zehrung in die Steuerstufe (Abbildung 1.18) und somit, dass der Luftverbrauch in den folgenden Nitrifikationszonen sinkt, obwohl der mittlere Sauerstoffgehalt in der Nitrifikation aufgrund der vorhandenen O₂-Regelung gleich bleibt und sich der Gradient relativ wenig ändert (siehe Abbildung 1.19). Dies wird sogar noch in der folgenden Kaskade deutlich. Der Einspareffekt bzgl. der insgesamt erforderlichen Luftmenge wird in diesem Zusammenhang durch die geringen Sauerstoffkonzentrationen in der Steuerstufe hervorgerufen (Abbildung 1.17).

In der folgenden Tabelle ist eine kurze zusammenfassende Auswertung der Simulation von MK1 für den Lastfall Qt2m1 enthalten:

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Einsparung ca. 3 % |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitze bei MW reduziert um ca. 1 g/m ³ |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N und N _{ges} (Mittelwerte und Spitzen) bei TW leicht und bei MW deutlicher reduziert |
| Fazit | Aufgrund verbesserter Nitrifikations- und Denitrifikationsleistung ist die Maßnahmen-Kombination gut geeignet, um mit einfachen Mitteln einen sicheren Effekt zu erzielen. Sie ermöglicht aber nur eine geringe Reduzierung des Luftverbrauches. |

Tabelle 1.3: Kurzauswertung MK1 (Lastfall Qt2m1)

Simulation MK2:

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die für MK2 mit dem Lastfall Qt2Qm1 bei einer Zulaufaufteilung auf die drei Kaskaden von 50 % : 30 % : 20 % simulierten Zeitverläufe für NO₃-N, NH₄-N und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Lauf 2) im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1).

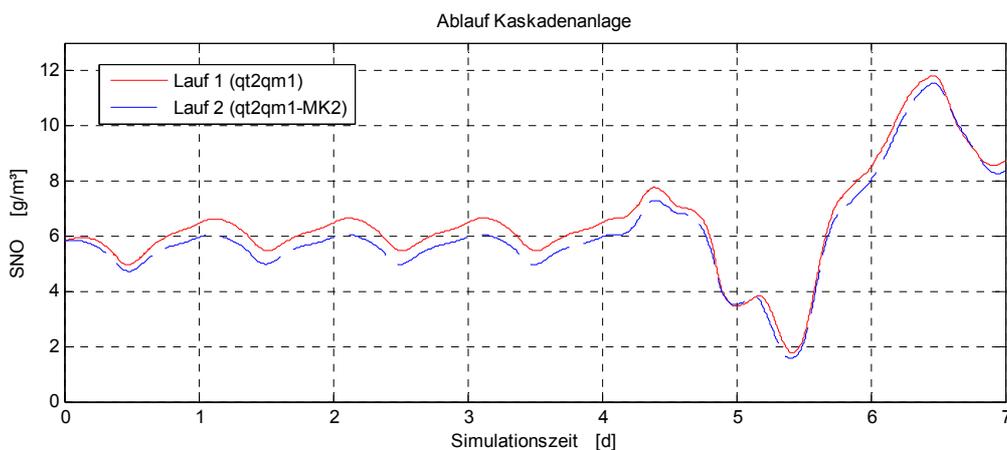


Abbildung 1.20: NO₃-N Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1)

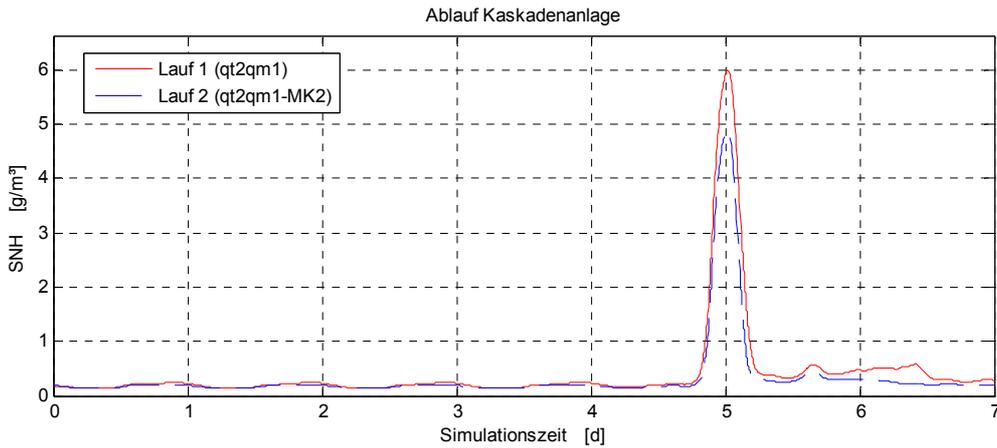


Abbildung 1.21: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1)

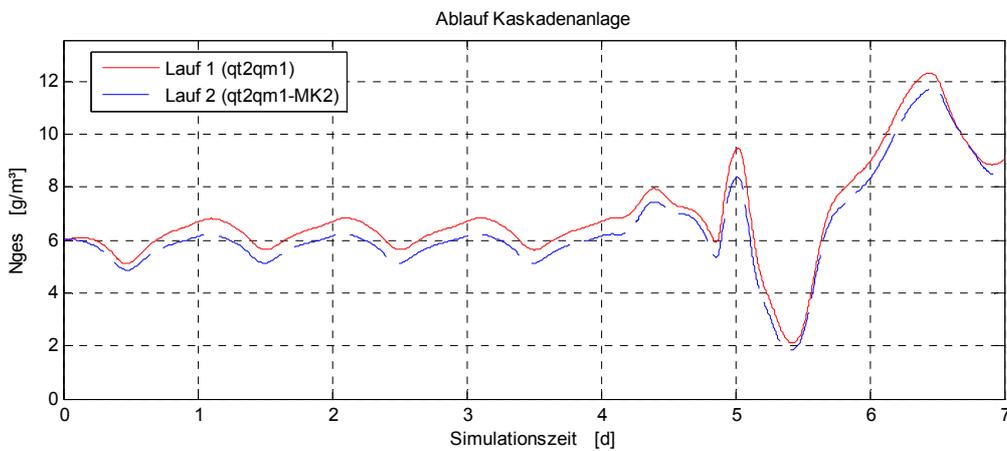


Abbildung 1.22: N_{ges} Ablauf Belebung (MK2, Lastfall Qt2Qm1)

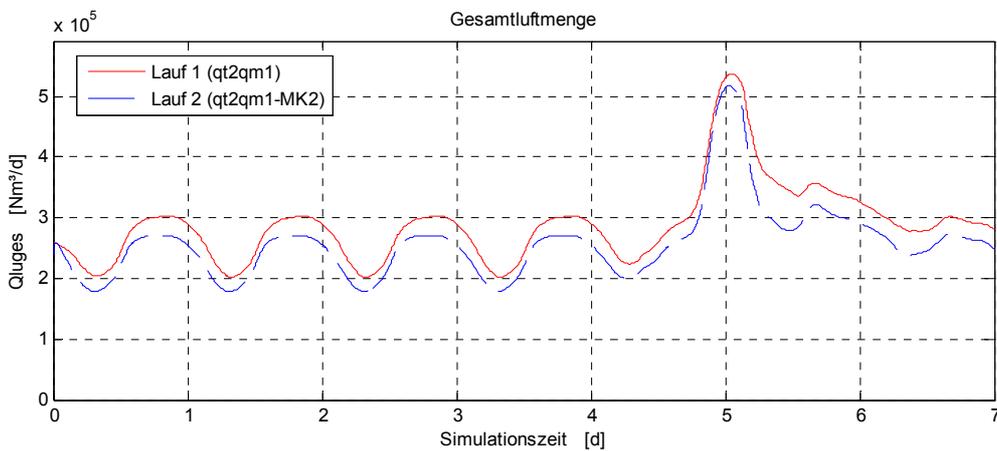


Abbildung 1.23: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK2, Lastfall Qt2Qm1)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass die gedrosselte Belüftung der jeweils hinteren Steuerstufe in den drei Kaskaden verbunden mit der Senkung der Sauerstoffsollwerte einen signifikanten Rückgang des Luftverbrauches von fast 11 % und zugleich eine Verbesserung der Nitrifikationsleistung bewirkt. Durch den o. g. Effekt der simultanen Denitrifikation wird für diesen Lastfall auch die N-Elimination verbessert. Letzteres setzt natürlich voraus, dass das TKN : CSB-Verhältnis im Abwasserzulauf nicht zu hoch ist (in diesem Beispiel ca. 1 : 9). In der folgenden Tabelle ist eine kurze zusammenfassende Auswertung der Simulation von MK2 für den Lastfall Qt2m1 enthalten:

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Einsparung ca. 11 % |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitze bei MW reduziert um mehr als 1 g/m ³ , NH ₄ -N-Mittelwert leicht gesenkt |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N und N _{ges} bei TW mäßig und bei MW (Spitzen) leicht reduziert |
| Fazit | Aufgrund verbesserter Nitrifikationsleistung und deutlich reduziertem Luftverbrauch ist die Maßnahmen-Kombination gut geeignet. Sie ermöglicht aber nur eine geringe Reduzierung der N_{ges}-Ablaufspitze bei MW |

Tabelle 1.4: Kurzauswertung MK2 (Lastfall Qt2m1)

Simulation MK3:

Die folgenden Abbildungen zeigen die für MK3 mit dem Lastfall Qt2Qm1 bei einer Zulaufaufteilung auf die drei Kaskaden von 50 % : 30 % : 20 % simulierten Zeitverläufe für NO₃-N, NH₄-N und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Vergleich Referenz – Lauf 1 und MK3 – Lauf 2).

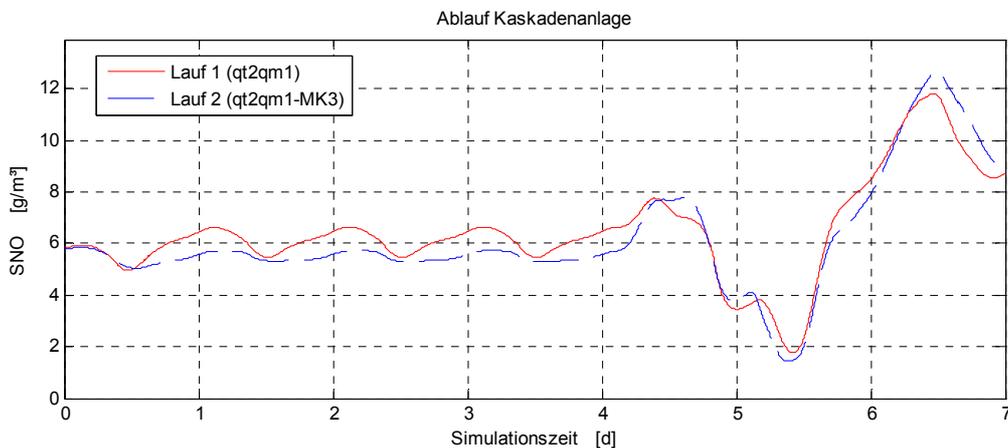


Abbildung 1.24: NO₃-N Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1)

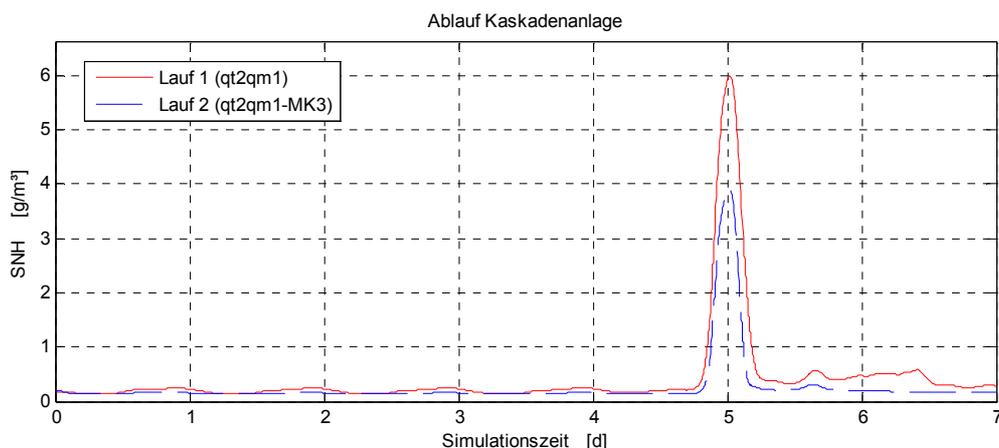


Abbildung 1.25: NH₄-N Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1)

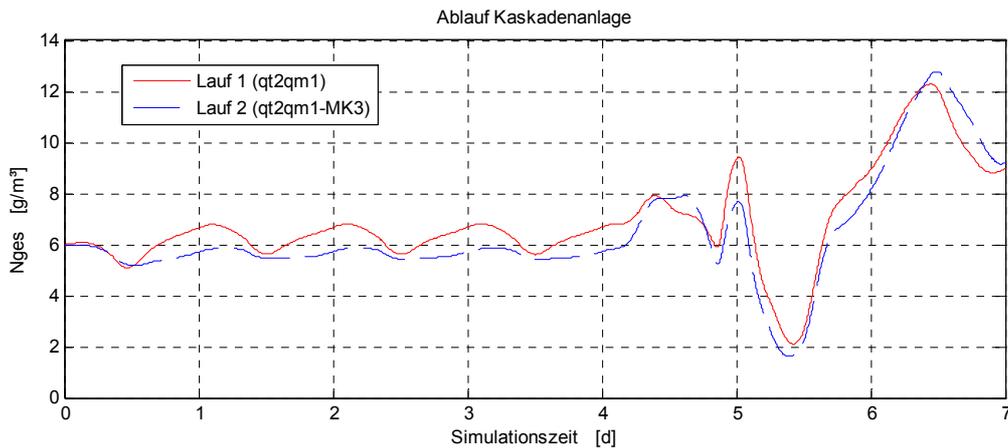


Abbildung 1.26: N_{ges} Ablauf Belebung (MK3, Lastfall Qt2Qm1)

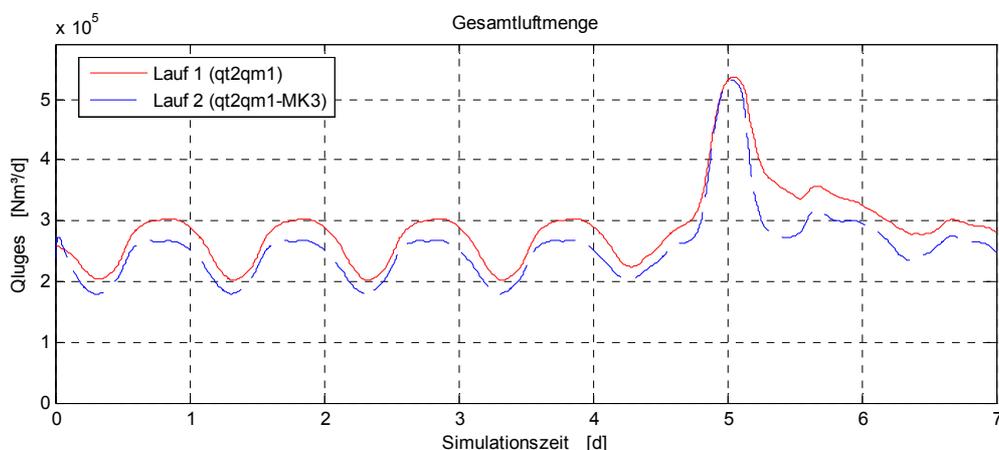


Abbildung 1.27: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage (MK3, Lastfall Qt2Qm1)

Der Rückgang des Luftverbrauchs fällt mit etwas über 11 % kaum höher aus, als bei der Simulation von MK2. Jedoch wird der begünstigende Einfluss der gedrosselten Steuerstufenbelüftung auf den Verbrauch an Belüftungsenergie durch die Auswirkung auf das O_2 -Zehrungsprofil bestimmt. Der Effekt ist also auch abhängig von der Zulaufbelastung (TKN- und CSB-Fracht). Bei einer stärkeren Belastung, kann mit einer höheren Einsparung durch MK3 im Vergleich mit MK2 gerechnet werden.

Erwartungsgemäß wird die Nitrifikationsleistung durch das zusätzliche aerobe Volumen (Belüftung aller Steuerstufen) weiter verbessert. Jedoch reicht im Beispiel das Denitrifikationsvolumen nicht mehr aus, um auch die NO_3-N - bzw. N_{ges} -Spitze infolge des simulierten Mischwasserereignisses zu begrenzen. Aus diesem Grund wird diese Maßnahmen-Kombination nicht als dauerhafte Einstellung empfohlen, kann jedoch ggf. bei günstigem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf zur Belebung zum Einsatz kommen. Vor allem aber ist sie die Basis der Untersuchung dynamischer Konzepte (siehe Abschnitt 1.2.3).

Die folgende Tabelle zeigt die Kurzauswertung der Simulation von MK3 für den Lastfall Qt2m1:

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Einsparung ca. 11 % |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitze bei MW deutlich reduziert um mehr als 2 g/m ³ , NH ₄ -N-Mittelwert gesenkt |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N und N _{ges} bei TW reduziert aber Spitzen bei MW etwas höher |
| Fazit | Aufgrund der erhöhten N_{ges}-Ablaufspitze sollte diese Maßnahmen-Kombination für die Beispielanlage keine Anwendung finden. Sie dient jedoch als Basis für die Untersuchung dynamischer Konzepte. |

Tabelle 1.5: Kurzauswertung MK3 (Lastfall Qt2m1)

1.2.3 Entwicklung und Simulation dynamischer Konzepte für die Beispielanlage

Ausgehend von der vorhandenen Konfiguration der Belüftung/Sauerstoffregelung auf dem Klärwerk (ein Regelkreis je Kaskade) und der vorgeschlagenen gedrosselten Belüftung von Steuerstufen haben sich folgende dynamische, d. h. lastflexible Konzepte als effektiv herausgestellt

- **NH_{4,ab}-Regler:** überlagerte Regelung von NH₄-N im Ablauf Belebung für lastflexible Anpassung der Sauerstoffsollwerte in den Kaskaden, auf Basis von MK3, d. h. mit allen Steuerstufen gedrosselt belüftet (vgl. Abbildung 1.28)
- **Automatische Umschaltung Steuerstufen:** Abschalten der Steuerstufenbelüftung bei Überschreitung eines Grenzwertes für NO₃-N im Ablauf der Denitrifikation der jeweiligen Kaskade (erforderlich nur in den Kaskaden 2 und 3 oder nur stellvertretend in der dritten Kaskade), auf Basis von MK3
- **NH_{4,ab}-Regler + automatische Umschaltung Steuerstufen:** Kombination der o. g. Regelungen auf Basis von MK3

Durch die überlagerte Regelung der NH₄-N-Werte im Ablauf der Kaskadenanlage können die O₂-Sollwerte in allen Kaskaden z. B. so vorgegeben werden, dass sie bei mittlerem TW-Zufluss im Bereich der Einstellungen von MK2 bzw. MK3 (ca. 2 g/m³) und bei größerer Belastung (MW) im Bereich der Referenz oder höher (> 2,5 g/m³) liegen. Im Simulationsmodell wurde dazu ein P-Regler mit einer in Abbildung 1.28 gezeigten Kennlinie implementiert.

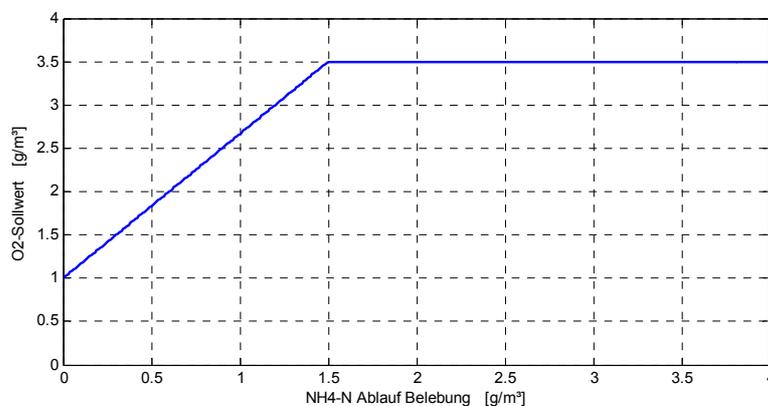


Abbildung 1.28: Kennlinie des NH_{4,ab}-Reglers

Die o. g. automatische Umschaltung der Steuerstufen wurde im Simulationsmodell entsprechend der in Abbildung 1.29 dargestellten Kennlinie umgesetzt. Dabei wurde eine Hysterese für das Zuschalten der Steuerstufenbelüftung bei wieder geringer werdenden

NO₃-N-Konzentrationen in der Denitrifikation vorgesehen. Außerdem wurde die Einhaltung eines oberen Grenzwertes für NH₄-N im Ablauf der Belebung als zusätzliche Bedingung für ein Abschalten der Steuerstufenbelüftung in den modellierten Regelungsalgorithmus integriert.

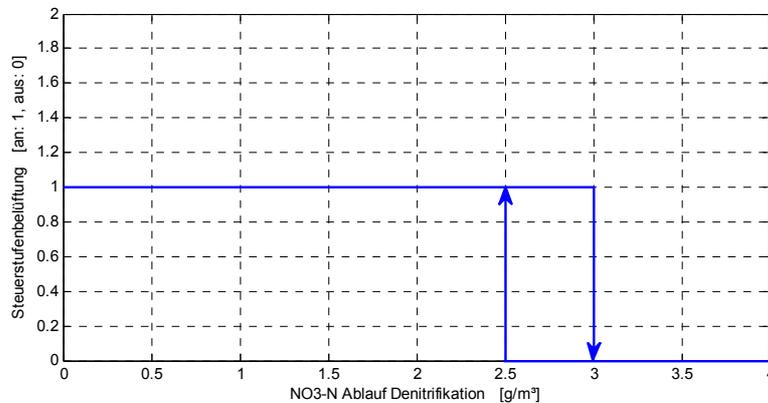


Abbildung 1.29: Kennlinie automatische Umschaltung Steuerstufen

Die zeitliche Dynamik der für diese Regelungen modellierten NH₄-N- und NO₃-N-Online-Sensoren wird im Modell entsprechend der Angaben in [BSM07] berücksichtigt.

Simulation NH_{4,ab}-Regler:

Abbildung 1.30 bis Abbildung 1.33 zeigen die mit dem NH_{4,ab}-Regler für den Lastfall Qt2Qm1 bei einer Zulaufaufteilung auf die drei Kaskaden von 50 % : 30 % : 20 % simulierten Zeitverläufe für NO₃-N, NH₄-N und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung. Die Darstellung dieses Konzeptes (Lauf 3) erfolgt im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1) und der statischen Maßnahmen-Kombination MK3 (Lauf 2). Tabelle 1.6 enthält die Kurzauswertung dieser Simulation. Abbildung 1.34 zeigt exemplarisch den Sauerstoffgehalt im ersten und letzten Nitrifikationsbecken von Kaskade 1 für die Referenz und die NH_{4,ab}-Regelung.

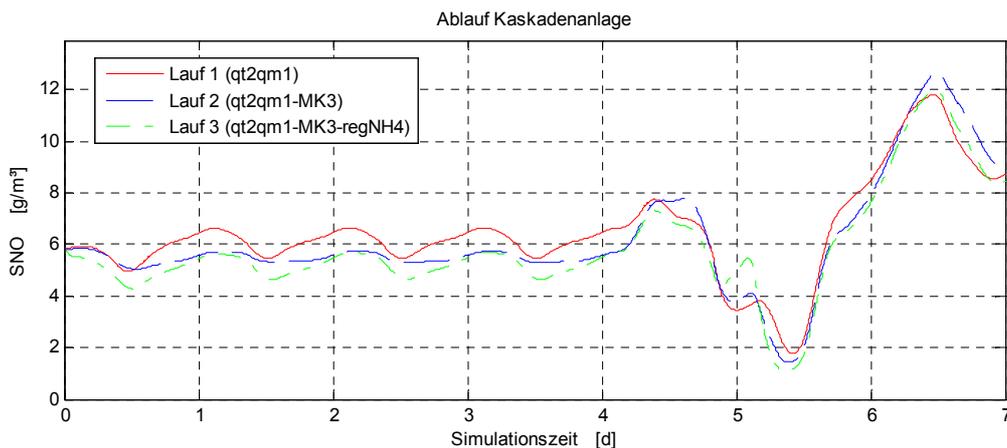


Abbildung 1.30: NO₃-N Ablauf Belebung (NH_{4,ab}-Regler, Lastfall Qt2Qm1)

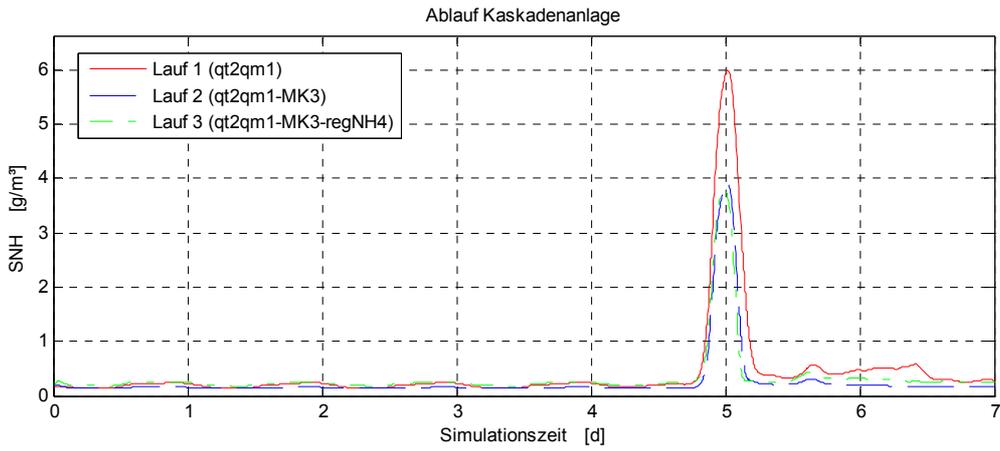


Abbildung 1.31: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belegung, ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1)

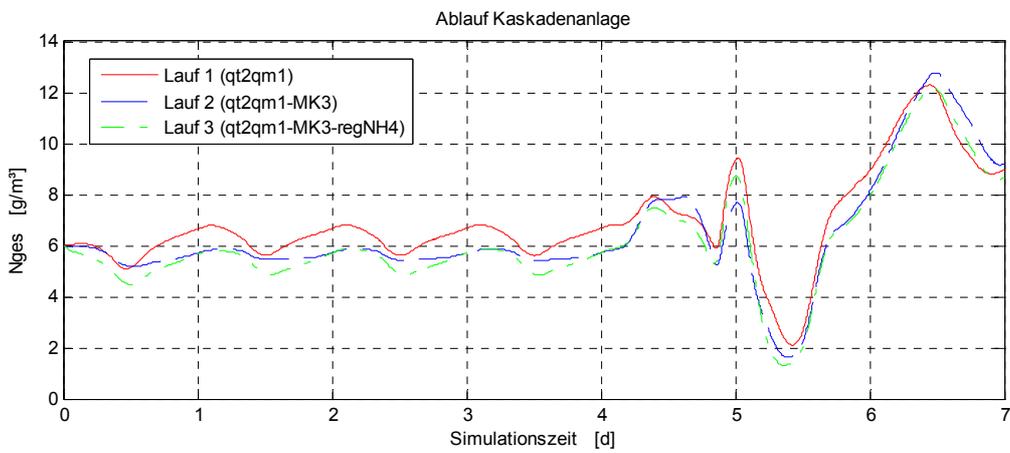


Abbildung 1.32: N_{ges} Ablauf Belegung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1)

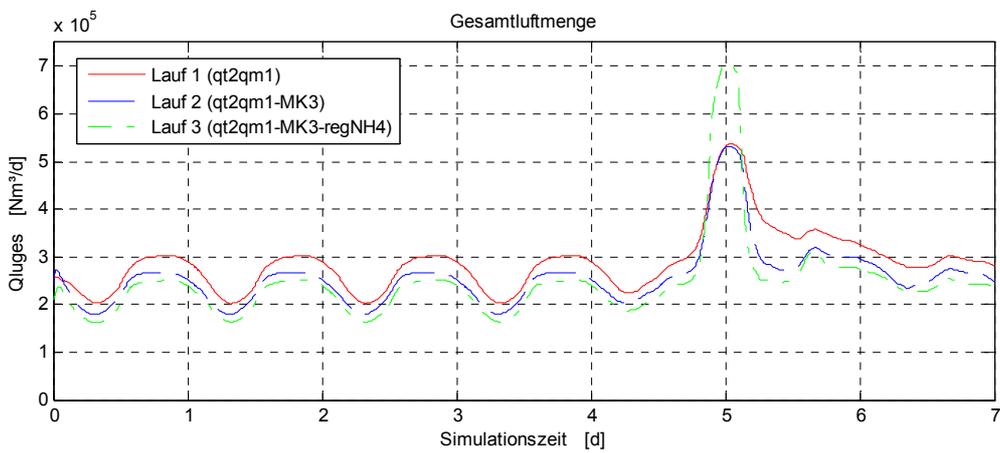


Abbildung 1.33: Gesamt-Luftverbrauch Kaskadenanlage ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler, Lastfall Qt2Qm1)

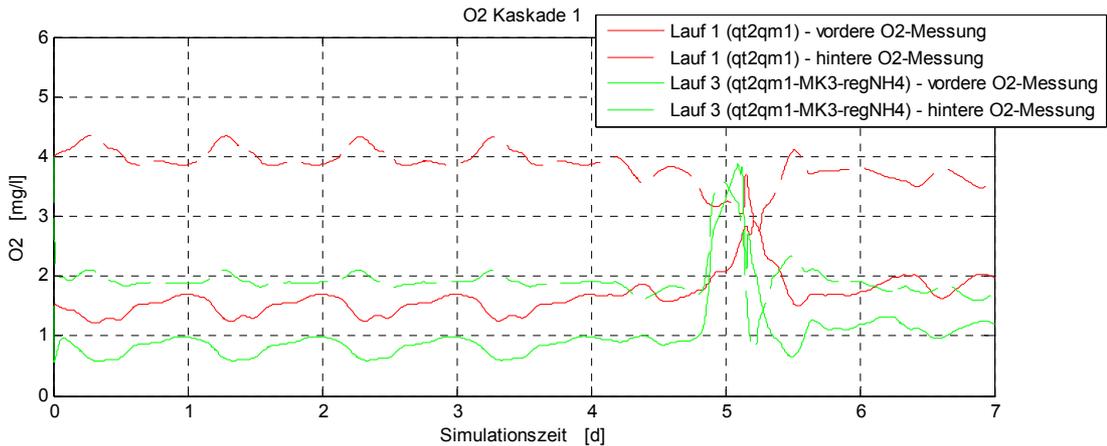


Abbildung 1.34: O₂-Konzentration Kaskade 1 (NH_{4,ab}-Regler, Lastfall Qt2Qm1)

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|--|
| Belüftung | Einsparung ca. 15 % (5 % gegenüber statischem Konzept MK3) |
| NH ₄ -N Ablauf Belegung | NH ₄ -N-Spitze wie bei MK3 deutlich reduziert, Mittelwert etwas höher als bei MK3 aufgrund des bei TW abgesenkten O ₂ -Sollwertes |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belegung | Mittelwert gegenüber Referenz deutlich und gegenüber MK3 leicht reduziert, aber Spitze nach MW wie bei Referenz |
| Fazit | Aufgrund zuverlässiger (lastangepasster) Nitrifikationsleistung (NH₄-N-Spitzen) und stark reduziertem Luftverbrauch ist die Regelung gut geeignet, jedoch ist damit (im gezeigten Beispiel) keine Reduzierung der N_{ges}-Ablaufspitze bei MW möglich. |

Tabelle 1.6: Kurzauswertung Simulation NH_{4,ab}-Regler (Lastfall Qt2Qm1)

Simulation NH_{4,ab}-Regler + automatische Umschaltung Steuerstufen:

Die automatische Umschaltung bewirkt in diesem Beispiel ein Abschalten der Steuerstufenbelüftung bei Überschreitung von NO₃-N im Ablauf der Denitrifikation der zweiten und dritten Kaskade am 7. Tag (nach dem Starkregenereignis). Die Darstellung der Simulationsergebnisse erfolgt hier nur für den kombinierten Einsatz der automatischen Umschaltung mit dem o. g. NH_{4,ab}-Regler (wiederum für Lastfall Qt2Qm1 bei einer Zulaufaufteilung von 50 % : 30 % : 20 %). Dieses Konzept (Lauf 2) wird in den folgenden Diagrammen mit der Referenz (Lauf 1) und dem zuvor beschriebenen Konzept (Lauf 2 => nur NH_{4,ab}-Regelung) verglichen. Abbildung 1.38 veranschaulicht am Beispiel des Sauerstoffgehaltes in den Steuerstufen von Kaskade 2 die Abschaltung der Steuerstufenbelüftung während der NO₃-N-Spitze. Tabelle 1.7 enthält die Kurzauswertung der Simulation.

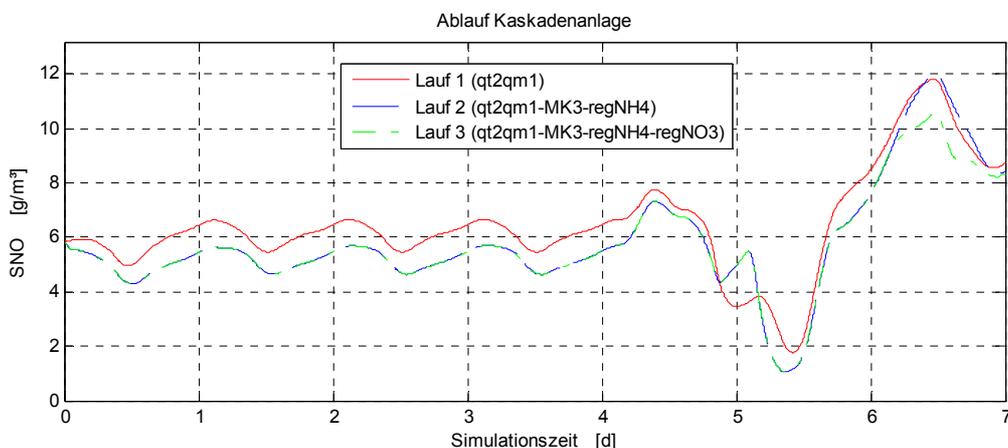


Abbildung 1.35: NO₃-N Ablauf Belegung (NH_{4,ab}-Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1)

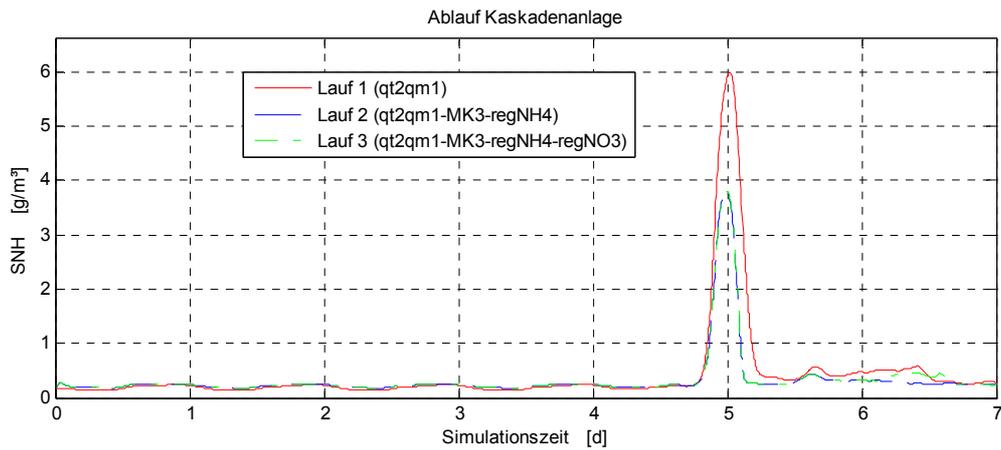


Abbildung 1.36: NH₄-N Ablauf Belegung (NH_{4,ab}-Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1)

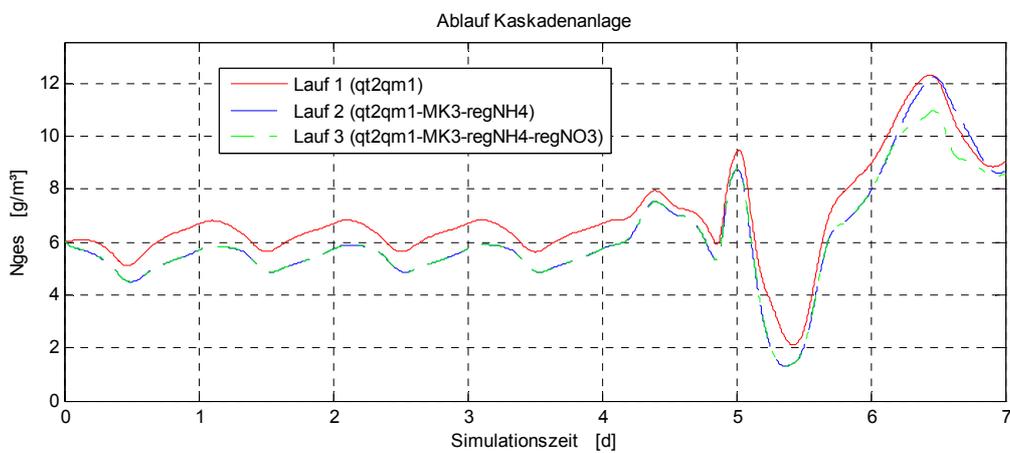


Abbildung 1.37: N_{ges} Ablauf Belegung (NH_{4,ab}-Regler + Automat. Umschaltung, Lastfall Qt2Qm1)

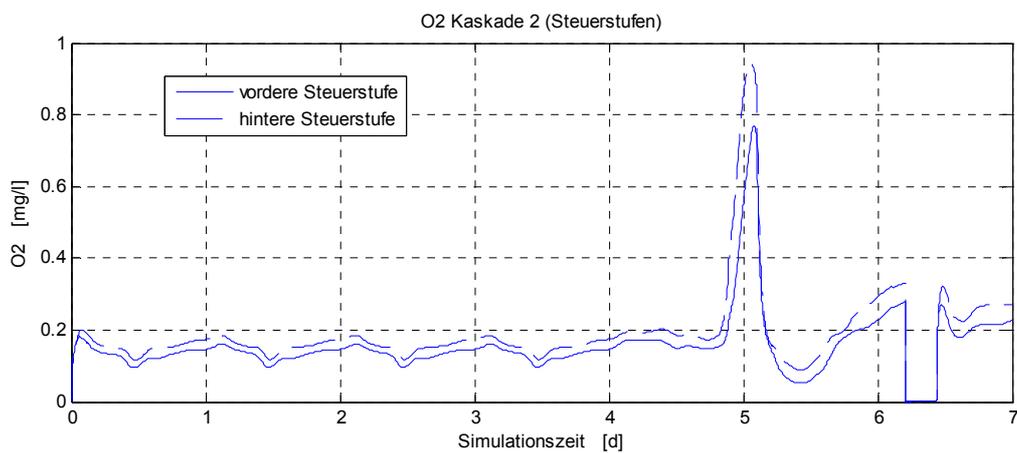


Abbildung 1.38: O₂-Konz. Steuerstufen Kaskade 2 (NH_{4,ab}-Regler + Aut. Umsch., Lastfall Qt2Qm1)

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | siehe Simulation NH _{4,ab} -Regler (Tabelle 1.6) |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | Verlauf bei TW und MW (Spitze) => siehe Simulation NH _{4,ab} -Regler (Tabelle 1.6); kaum Erhöhung während der Abschaltung der Steuerstufenbelüftung am 7. Tag |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N bzw. N _{ges} bei TW => siehe Simulation NH _{4,ab} -Regler; NO ₃ -N- bzw. N _{ges} -Spitze nach MW am 7. Tag deutlich gekappt (ca. 1,5 g/m ³ weniger als bei Referenz bzw. bei Simulation NH _{4,ab} -Regler) |
| Fazit | Die automatische Umschaltung der Steuerstufen eignet sich für eine Reduzierung von N_{ges}-Ablaufspitzen. Durch Kombination mit dem NH_{4,ab}-Regler, lassen sich die jeweiligen Vorteile beider Konzepte verbinden. |

Tabelle 1.7: Kurzauswertung Simulation NH_{4,ab}-Regler + Automat. Umschaltung (Lastfall Qt2Qm1)

1.2.4 Ansatz zur Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen im Längsprofil

Wie es bereits bei der Untersuchung der statischen Konzepte deutlich wurde (vgl. Auswertung der Profil-Darstellungen in Abschnitt 1.2.2), muss bei der Einstellung eines für den Luftverbrauch und die Reinigungsleistung optimalen Profils der Sauerstoffkonzentration in Beckenlängsrichtung auch das entsprechende O₂-Zehrungsprofil berücksichtigt werden. Es hat sich für die Beispielanlage weiterhin gezeigt, dass bei geringeren O₂-Gehalten in den vorderen Beckenabschnitten und entsprechend höheren Sauerstoffkonzentrationen in den hinteren Bereichen Belüftungsenergie gespart werden kann, ohne die Reinigungsleistung zu beeinträchtigen. Gute Ergebnisse lassen sich mit einer Abflachung des O₂-Zehrungsprofils (genauer: Verringerung des Gradienten der in Längs- bzw. Durchflussrichtung des Beckens abnehmenden O₂-Zehrung) durch Einstellung einer im Fließweg ansteigenden Sauerstoffkonzentration erzielen. Dies wird z. T. bereits durch die im Abschnitt 1.2.2 beschriebenen statischen Konzepte (gedrosselte Belüftung der Steuerstufen und Senkung der Sauerstoffsollwerte) erreicht.

Zur Quantifizierung des theoretisch möglichen Potenzials mit grundlegenden Betriebseinstellungen hinsichtlich der Reinigungsleistung und des Luftverbrauches erfolgte die Modellierung von separaten O₂-Regelkreisen in den einzelnen belüfteten Abschnitten jeder Kaskade (siehe Abschnitt 1.1.2). Im Ergebnis wurden bei den Untersuchungen folgende für alle betrachteten Lastfälle hinsichtlich Nitrifikation/Denitrifikation und Luftverbrauch günstige O₂-Sollwerte eingestellt (in allen Kaskaden):

- Steuerstufe 1: 0 g/m³
- Steuerstufe 2: 0,5 g/m³
- Nitrifikationszone 1: 1,0 g/m³
- Nitrifikationszone 2: 1,5 g/m³
- Nitrifikationszone 3: 2,0 g/m³

Dabei handelt es sich allerdings um eine statische Betrachtung. Die genaue Ausprägung des optimalen Sauerstoffprofils hängt von verschiedenen Randbedingungen (dynamische Zulaufbelastung, Beckengestaltung, Belüftungssystem, Rezirkulation, etc.) ab und unterliegt damit auch zeitlichen Schwankungen. Um das lastabhängig jeweils optimale O₂-Profil zu finden, wird die in Abschnitt 1.2.1 eingeführte Größe der **Verlustluftmenge** verwendet. Es lässt sich folgender **Ansatz** formulieren:

Die effizienteste Sauerstoffzufuhr kann bei Einstellung von im Längsprofil gleich großen Verlustluftmengen erzielt werden. Diese Effizienz wird - jeweils in der Summe über alle

belüfteten Beckenabschnitte betrachtet - durch den geringsten Luftverbrauch, d. h. die geringste Verlustluftmenge, bezogen auf die Abbauleistung bzw. den Sauerstoffverbrauch, beschrieben. Das bedeutet im Detail:

- mit einer bestimmten Menge an gelöstem Sauerstoff in der gesamten Belebung ist eine möglichst große Nitrifikationsleistung bei gleichzeitig möglichst geringem Luftbedarf, d. h. bei möglichst geringer Verlustluftmenge, zu erzielen
- diese Sauerstoffmenge wird durch einen **mittleren O₂-Gehalt** beschrieben, der sich durch Mittelung der jeweils gemessenen Sauerstoffkonzentrationen in den in Fließrichtung aufeinander folgenden Beckenabschnitten ergibt
- die Sauerstoffkonzentrationen in diesen Beckenabschnitten bilden ein **Sauerstoffprofil**, welches entlang des Fließweges so eingestellt werden muss, dass die Verlustluftmenge (siehe Abschnitt 1.2.1) über alle Beckenabschnitte gleich ist
- durch eine **überlagerte Regelung der Verlustluftmengen** „auf ein flaches Profil“ sollen belastungsabhängig die - bei einem gewählten mittleren O₂-Gehalt - jeweils optimalen Sauerstoffprofile als Sollwerte für **unterlagerte Sauerstoffregelungen** vorgegeben werden
- damit werden bei jeder Lastsituation auch die hinteren belüfteten Beckenabschnitte am Ammoniumabbau beteiligt und es wird eine z. B. gegenüber der Fahrweise mit gleichen O₂-Sollwerten in den einzelnen Beckenabschnitten effizientere Belüftung ermöglicht

Voraussetzung dieses Konzeptes zur lastflexiblen Einstellung des jeweils optimalen Sauerstoffprofils sind separate Regelkreise für die Sauerstoffkonzentrationen in wenigstens zwei in Fließrichtung aufeinander folgenden belüfteten Beckenabschnitten und die Erfassung der diesen Abschnitten zugeführten Luftmengen.

Bei Anlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation ist zu beachten, dass eine Erhöhung des O₂-Gehaltes im letzten Nitrifikationsabschnitt durch die interne Rezirkulation und damit die Verschleppung von Sauerstoff zum Denitrifikationsbecken die Leistung der N-Elimination beeinträchtigen kann. Deshalb sollte der durch die o. g. überlagerte Regelung vorgegebene Sauerstoffsollwert für den letzten Nitrifikationsabschnitt nach oben begrenzt werden. Infolge einer entsprechend gesenkten Sauerstoffkonzentration in den vorderen belüfteten Zonen kann dort mit einer simultanen Denitrifikation gerechnet werden. Abhängig von verschiedenen Rahmenbedingungen (z. B. Abwasserzusammensetzung im Zulauf) lässt sich somit u. U. die Denitrifikation insgesamt sogar verbessern. Besonders günstig sind in diesem Zusammenhang auch die auf einigen Anlagen vorhandenen, zur Entgasung dienenden unbelüfteten Abschnitte im Ablauf der Belebung. Die Reduzierung der erforderlichen Luftmenge kann noch gesteigert werden, wenn dieses Konzept mit Maßnahmen kombiniert wird, welche die Nitrifikationsleistung der gesamten Anlage entsprechend der Lastsituation steuern (z. B. Senkung des mittleren O₂-Sollwertes bei Schwachlast; vgl. Abschnitt 1.2.3).

Sollte sich dieser Ansatz als praxistauglich erweisen, ließe sich darauf aufbauend ein innovativer Regler zur lastabhängigen Einstellung des optimalen Sauerstoffprofils in längs durchströmten Belebungsbecken entwickeln.

Das folgende Schema veranschaulicht eine Möglichkeit der Anwendung des beschriebenen Ansatzes auf die Belebung einer fiktiven Beispielkläranlage. Das Schema umfasst zusätzlich zu den drei Nitrifikationsabschnitten (N 1...N 3) auch ein vorgeschaltetes Denitrifikationsbecken (D) und eine Entgasungszone (unbelüfteter Beckenabschnitt) im Ablauf (E).

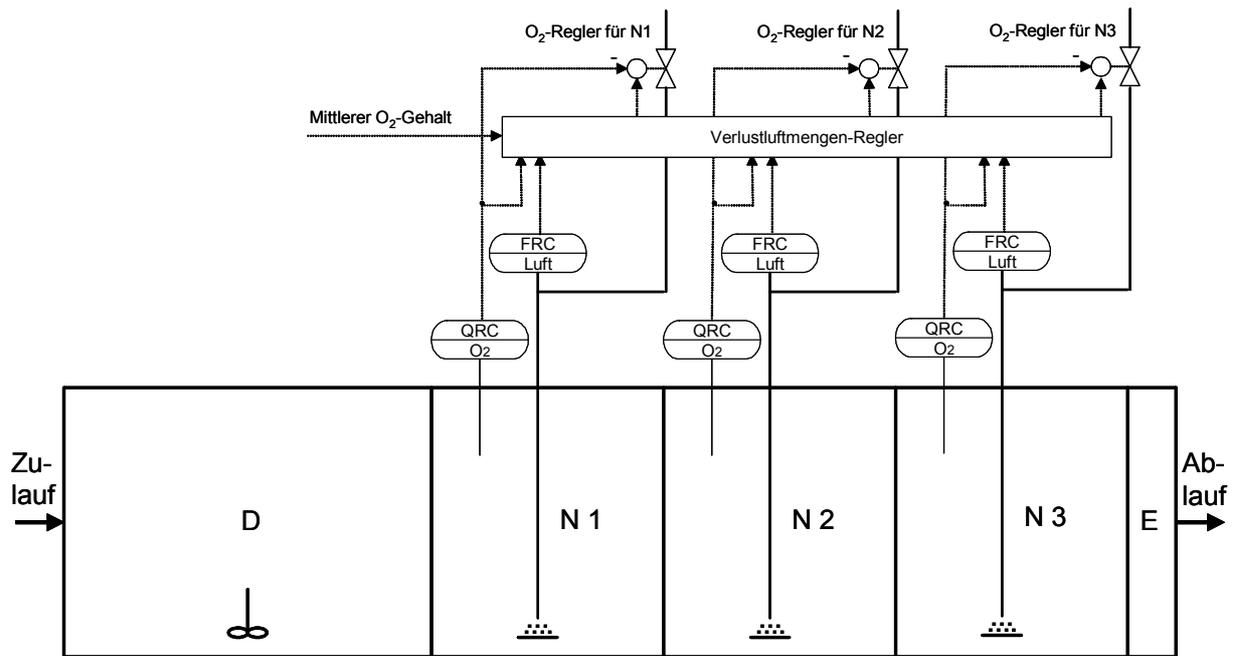


Abbildung 1.39: Exemplarisches Schema zur möglichen Konfiguration einer Regelung

Das exemplarisch skizzierte Regelungskonzept basiert auf drei unterlagerten konventionellen Regelkreisen für die Sauerstoffkonzentration in den jeweiligen Nitrifikationsbecken. Die hierfür benötigten O_2 -Sollwerte werden durch eine überlagerte Regelung so vorgegeben, dass sich in allen drei Abschnitten gleiche Verlustluftmengen einstellen. Dazu dient der gezeigte **Verlustluftmengen-Regler**. Er benötigt als Eingangsgrößen die Online-Messungen der Sauerstoffkonzentrationen und der Luftmenge für die Berechnung der aktuellen Verlustluftmengen der drei belüfteten Reaktoren. Zur dynamischen Berechnung der temperaturabhängigen Sauerstoff-Sättigungskonzentration als Parameter des Verlustluftmengen-Reglers, kann zudem eine geeignete Online-Messung der Abwassertemperatur als Regler-Eingangsgröße dienen. Für einen gewählten mittleren O_2 -Gehalt über alle drei Becken werden die entsprechend dynamischen O_2 -Sollwertprofile als Führungsgrößen für die unterlagerten Sauerstoffregelungen vorgegeben. Somit werden auch bei den auf Kläranlagen üblichen dynamischen Verhältnissen (Zulaufschwankungen, etc.) durch den Verlustluftmengen-Regler die für ein flaches Profil der Verlustluftmengen jeweils erforderlichen Sauerstoffsollwerte berechnet. Der o. g. mittlere O_2 -Gehalt kann darüber hinaus in einen weiteren Regelkreis (z. B. Führung über Ammonium-Stickstoff im Ablauf Belebung) eingebunden werden, um die Lastflexibilität der Belüftung weiter zu steigern.

Das Konzept ist für die in diesem Vorhaben mit der Beispielanlage (siehe Abschnitt 1.1) betrachteten Anlagenkonfigurationen jedoch nicht unmittelbar anwendbar, weil hier nur ein Sauerstoffregelkreis im längs durchströmten Belebungsbecken vorhanden ist. Im Vorfeld der Entwicklung eines Reglers, besteht zudem noch weiterer Forschungsbedarf (dynamische Simulation, halbtechnische Versuche) zur Gültigkeit und Anwendbarkeit des o. g. Ansatzes. Deshalb wurde im Rahmen dieses Vorhabens kein hierauf basierendes detailliertes MSR-Konzept entwickelt.

Eine dynamische Änderung der Luftaufteilung im Längsprofil der Nitrifikation allein durch z. B. Ansteuerung motorischer Regulierschieber - also ohne Online-Messung und Regelung der dazugehörigen Sauerstoffkonzentration - erscheint vor dem Hintergrund der in diesem Abschnitt geschilderten Untersuchungen als wenig sinnvoll. Wenn separate Stelleinrichtungen für die Belüftung der einzelnen Beckenabschnitte vorhanden sind, bzw. eingerichtet werden sollen, dann sollten sie auch zusammen mit entsprechenden Online- O_2 -Messungen in Regelkreise für die Sauerstoffkonzentration im Belebungsbecken eingebunden werden. Damit ist es dann möglich, statisch (d. h. für definierte Randbedingungen) ein optimales O_2 -Profil in Fließrichtung der Nitrifikation einzustellen, und es ist weiterhin eine wesentliche

Voraussetzung für eine Implementierung des o. g. lastflexiblen Ansatzes (Verlustluftmengen-Regler) gegeben.

1.2.5 Untersuchungen zur lastflexiblen Zulaufaufteilung

Zusätzlich zur Entwicklung von energiesparenden Belüftungsstrategien soll anhand der exemplarisch betrachteten Kaskadenanlage auch nach Strategien für eine lastflexible Aufteilung des Abwasserzulaufes auf die drei Kaskaden gesucht werden.

Die Aus- und Wechselwirkungen bei einer lastflexiblen Variation der Zulaufaufteilung sind schwer zu überblicken, z. B. bewirkt eine Verlagerung des Zulaufes in die erste Kaskade zwar zunächst eine Dämpfung bzw. Verzögerung der Auswirkungen auf den Ablauf der letzten Kaskade. Dann kann aber ein entsprechend zeitversetztes „Durchschlagen“ von Spitzen aus den vorderen Kaskaden auf den Ablauf erfolgen, womit die Ablaufwerte sogar schlechter als bei konstanter Zulaufaufteilung sein können. Daraus leiten sich entsprechend hohe Anforderungen an eine Entwicklung von zuverlässigen MSR-Konzepten für die Zulaufaufteilung ab.

Es wurden verschiedene Konzepte getestet, welche sich aus den o. g. Gründen oft als unzulänglich bzw. nicht robust genug erwiesen haben. Jedoch wurden zwei Ansätze gefunden, die ein gewisses Potenzial für jeweils eines der folgenden Ziele besitzen:

- Reduzierung der NH₄-N-Spitzen im Ablauf
- Reduzierung von NO₃-N bzw. N_{ges} im Ablauf

Diese Ansätze, bzw. die entsprechend im Modell implementierten und getesteten Konzepte zur lastflexiblen Zulaufaufteilung werden in den beiden folgenden Abschnitten erläutert.

Regelung von NH₄-N im Ablauf Belebung über die Zulaufaufteilung:

Dieses Konzept sieht eine kontinuierliche Variation des Zulaufanteils zur ersten und zur dritten Kaskade in Abhängigkeit von der NH₄-N-Konzentration im Ablauf der Belebung vor. Es dient zur Reduzierung der bei Frachtstößen auftretenden Spitzen von NH₄-N im Ablauf. Das Konzept wird als eine Regelung der Ammoniumkonzentration im Ablauf der Belebung mit der Stellgröße Zulaufaufteilung umgesetzt. Der Berechnung der Aufteilungsfaktoren liegen folgende Gleichungen zu Grunde:

$$\text{Auf}3 = m \cdot \text{NH}_{4,\text{ab}} + n \quad \text{Gl. 1.7}$$

$$\text{Auf}2 = \text{konstant} \quad \text{Gl. 1.8}$$

$$\text{Auf}1 = 1 - \text{Auf}2 - \text{Auf}3 \quad \text{Gl. 1.9}$$

mit

| | | |
|--------------------|---|-----------------------|
| Auft1 | Anteil Zulauf Kaskade 1 | [-] |
| Auft2 | Anteil Zulauf Kaskade 2 | [-] |
| Auft3 | Anteil Zulauf Kaskade 3 | [-] |
| NH _{4,ab} | NH ₄ -N-Konzentration im Ablauf Belebung | [g N/m ³] |
| m | Anstieg | [-] |
| n | Offset | [-] |

Die Gleichungen beschreiben - ergänzt durch eine geeignete Begrenzung der Aufteilungsvariation - Kennlinien für die Zulaufaufteilung in Abhängigkeit von der NH₄-N-Konzentration

im Ablauf der Belegung. Abbildung 1.40 zeigt die den nachfolgend beschriebenen Simulationsläufen für dieses Konzept zugrunde liegenden Kennlinien.

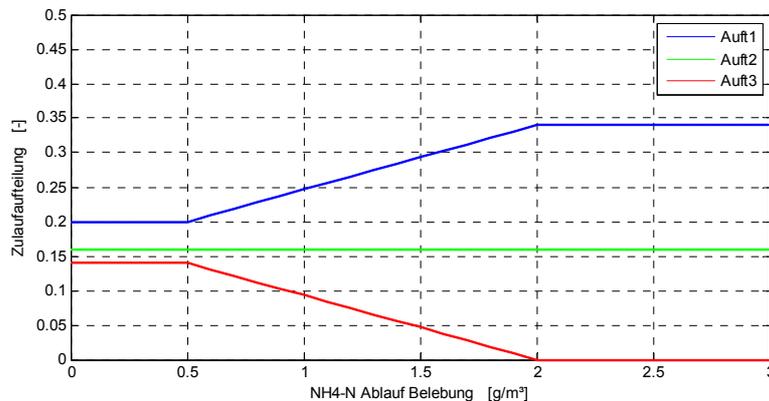


Abbildung 1.40: Kennlinien Zulaufaufteilung entsprechend NH₄-N im Ablauf Belegung

Es ist bei den betrachteten Lastfällen sinnvoll, die Parameter so einzustellen, dass die Kaskadenanlage bei normaler Belastung (Trockenwetter) mit einer Aufteilung für eine gleiche Schlammbelastung der drei Kaskaden und bei Frachtstößen mit einer kopflastigen Zulaufaufteilung gefahren wird (siehe Abschnitt 1.1.4). Außerdem soll eine zu schnelle Veränderung der Zulaufaufteilung vermieden werden. Der Anstieg der Kennlinien darf also keinen zu großen Betrag haben.

Die nach dem Durchfließen der Kaskadenanlage im Ablauf der letzten Kaskade gemessenen Ammoniumkonzentrationen sind gegenüber Belastungsschwankungen im Zulauf deutlich verzögert und gedämpft. Durch die ablaufbasierte Regelung wird erreicht, dass nicht schon unmittelbar nach dem Auftreten einer TKN-Frachtspitze im Zulauf die Entlastung der letzten Kaskade erfolgt, wie es z. B. bei einer Vorsteuerung der Zulaufaufteilung über die TKN-Fracht im Zulauf der Fall wäre. Dies würde einem vollständigen Verlagern der Fracht in die damit überforderte erste Kaskade entsprechen. Ein späteres „Durchschlagen“ der Frachtspitze in den Ablauf wäre der Fall. Die Verzögerung bewirkt eine bessere Aufteilung der bei einem Frachtstoß auftretenden Mehrbelastung auf die Kaskaden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die mit dem Lastfall Qt2Qm1 für dieses Konzept, bei sonst gegenüber der Referenz unveränderten Einstellungen (d. h. keine Belüftung der Steuerstufen), simulierten Zeitverläufe für NO₃-N, NH₄-N und N_{ges} im Ablauf Belegung sowie die Zulaufaufteilung. Lauf 1 zeigt jeweils die Ergebnisse der Referenzsimulation, während Lauf 2 der Simulation mit lastflexibler Zulaufaufteilung durch Regelung von NH₄-N im Ablauf Belegung zugeordnet wird. Zusätzlich wird zum Vergleich auch der Verlauf der Stickstoff-Parameter für die Simulation mit konstanter Zulaufaufteilung für eine im Mittel gleiche Schlammbelastung in den Kaskadenstufen (40 % : 32 % : 28 %) dargestellt (Lauf 3).

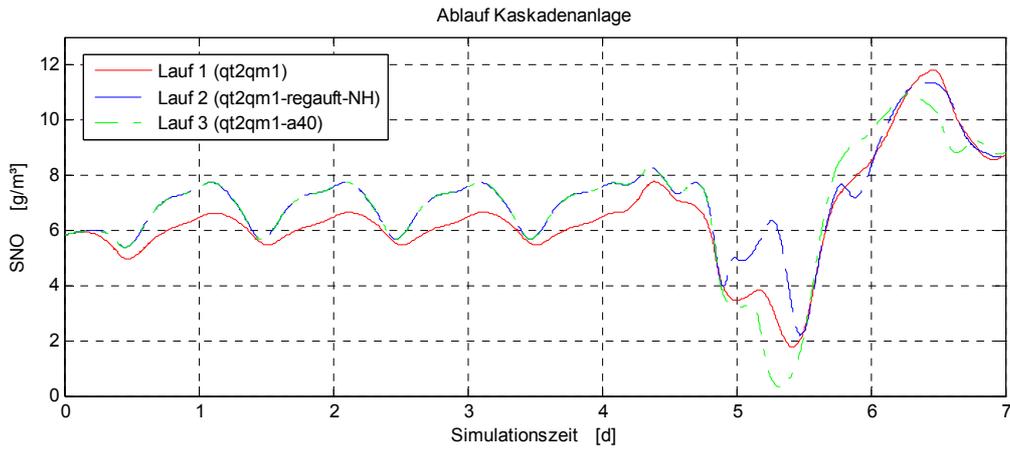


Abbildung 1.41: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belegung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

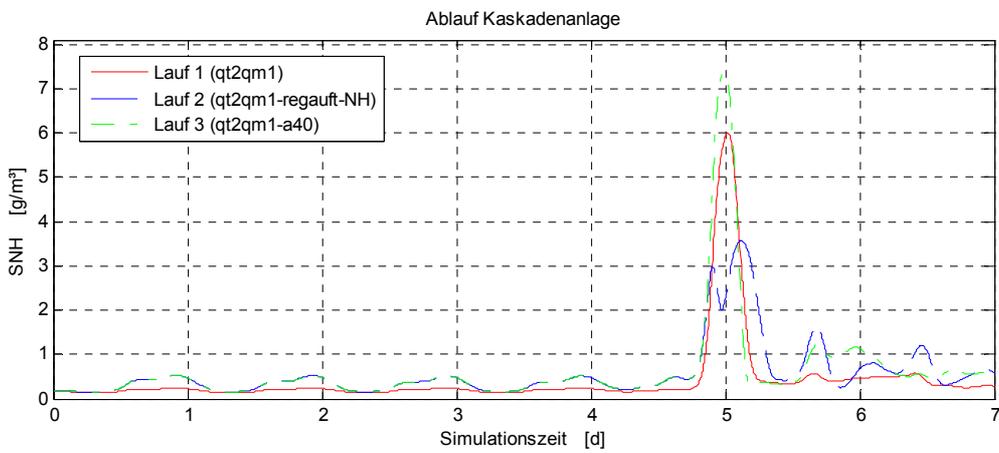


Abbildung 1.42: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belegung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

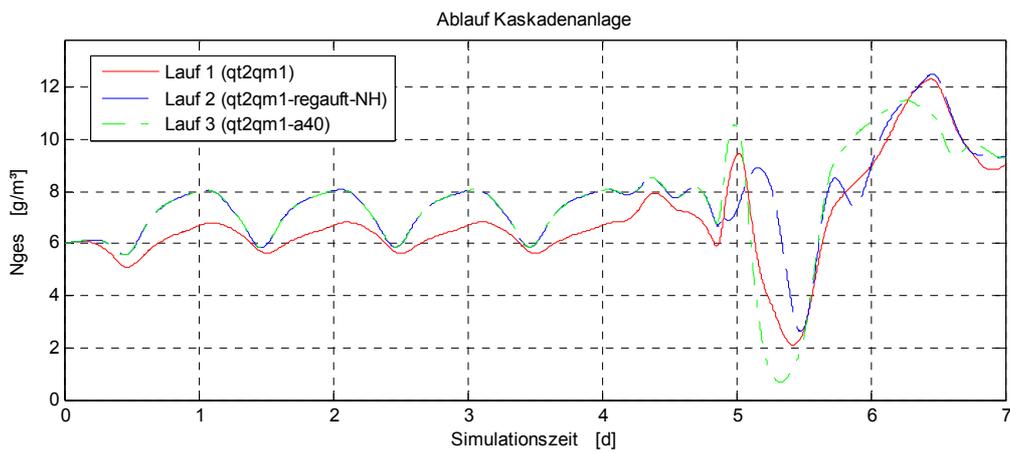


Abbildung 1.43: N_{ges} Ablauf Belegung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

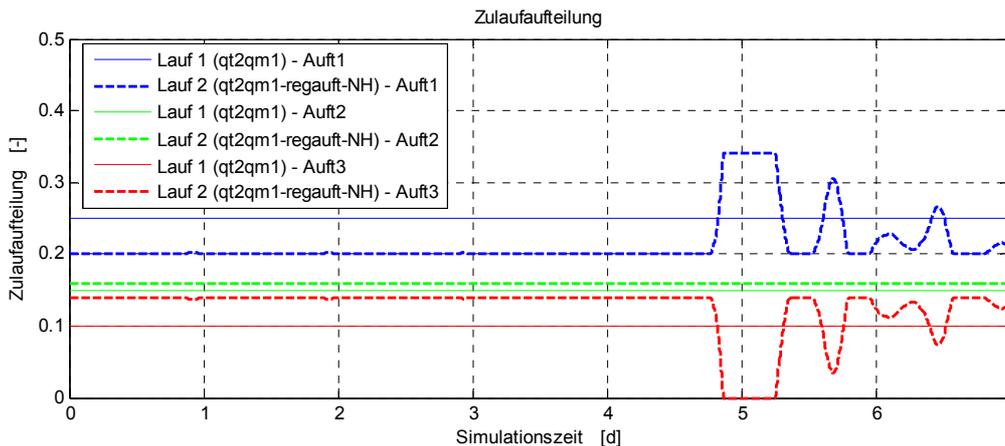


Abbildung 1.44: Zulaufauft. Kaskaden (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

An den Simulationsergebnissen kann eine deutliche Senkung aber auch zugleich eine „Zweiteilung“ der beim Mischwasser-Frachtstoß auftretenden $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufspitze erkannt werden, womit sich die Auswirkung der zunächst in die erste Kaskade geleiteten TKN-Zulaufspitze im Ablauf andeutet. Durch die Wahl des Messortes (Ablauf Belebung) und die moderate Einstellung der Regelung wird jedoch das Auftreten größerer Ammoniumspitzen im Ablauf vermieden und gegenüber der Referenzsimulation eine deutliche Reduzierung der Spitze beim Mischwasser-Frachtstoß erreicht. Die Regelung bewirkt infolge der Begrenzungen erst während des Frachtstoßes eine dynamische Anpassung der Zulaufaufteilung in Richtung „kopflastige“ Fahrweise. Bei TW erfolgt somit eine Zulaufaufteilung entsprechend einer gleichen Schlammbelastung in den Kaskadenstufen, womit sich im Vergleich mit einer kontinuierlich „kopflastigen“ Fahrweise (Referenz) ein höherer TS-Gehalt in der ersten Kaskade und dadurch ein erhöhtes Schlammalter erzielen lässt. Wird die Aufteilung entsprechend gleicher Schlammbelastung aber ständig beibehalten, muss, wie die Ergebnisse beim Mischwasser-Frachtstoß zeigen, mit deutlich höheren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Spitzen im Ablauf gerechnet werden. Deshalb stellt die vorgeschlagene Regelung einen viel versprechenden Ansatz dar, um die Vorteile beider Fahrweisen zu verbinden (siehe Kurzauswertung in Tabelle 1.8). Jedoch ist dadurch kaum eine Einflussnahme auf die N_{ges} -Konzentration im Ablauf möglich, was jedoch Ziel des nachfolgend beschriebenen Konzeptes ist.

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | kaum Auswirkungen auf Gesamt-Luftverbrauch |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung | $\text{NH}_4\text{-N}$ -Spitze bei MW deutlich reduziert um ca. $2,5 \text{ g/m}^3$, $\text{NH}_4\text{-N}$ -Mittelwert leicht erhöht (aufgrund des bei TW ggü. Referenz kontinuierlich höheren Zulaufanteils in Kaskade 3), kleinere Spitzen im „Regenwetternachlauf“ |
| $\text{NO}_3\text{-N}$, N_{ges} Ablauf Belebung | Verlauf $\text{NO}_3\text{-N}$ und N_{ges} bei TW erhöht (aufgrund des bei TW ggü. Referenz kontinuierlich höheren Zulaufanteils in Kaskade 3) aber Spitzen bei MW etwa gleich |
| Fazit | Aufgrund der deutlichen Reduzierung der $\text{NH}_4\text{-N}$-Ablaufspitze bei MW und zugleich ggü. der Referenz („kopflastige Fahrweise“) erhöhtem TS-Gehalt in der 1. Kaskade (höheres Schlammalter) bildet diese Regelung einen viel versprechenden Ansatz. |

Tabelle 1.8: Kurzauswertung lastflexible Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NH}_4\text{-N}$ (Lastfall Qt2m1)

Regelung von NO₃-N im Ablauf Denitrifikation der letzten Kaskade über die Zulaufaufteilung:

Es wurde ein Konzept zur dynamischen Zulaufaufteilung mit dem Ziel einer Reduzierung von NO₃-N im Ablauf entwickelt und durch Simulation getestet. Dieser Ansatz stellt eine Regelung der NO₃-N-Konzentration im Ablauf der Denitrifikation der letzten Kaskade mit Hilfe einer kontinuierlichen Erfassung von aktuell erforderlicher und aktuell vorhandener Denitrifikationskapazität dar. Mit dem Ziel erforderliche und vorhandene Denitrifikationskapazität anzugleichen, gilt folgender Ansatz:

$$DK_{\text{erf}} = DK_{\text{vorh}} \quad \text{Gl. 1.10}$$

mit

| | | |
|--------------------|--|-------------|
| DK_{erf} | aktuell erf. Denitrifikationskapazität in letzter Kaskade | [g N/g CSB] |
| DK_{vorh} | aktuell vorh. Denitrifikationskapazität in letzter Kaskade | [g N/g CSB] |

Dabei soll der Zulaufanteil für die letzte Kaskadenstufe so eingestellt werden, dass die Denitrifikationskapazität in dieser Kaskade gerade ausreicht, um einen vorzugebenden (Soll-)Wert für NO₃-N im Ablauf der Denitrifikation der Kaskade zu erreichen. Der Zulaufanteil zur letzten Kaskade soll nicht größer als für die Denitrifikation erforderlich sein, weil sich durch die anschließende Nitrifikation sonst entsprechend mehr Nitrat im Ablauf finden würde. Der Sollwert für NO₃-N sollte größer Null gewählt werden (z. B. 0,5 g/m³), weil bei geringer werdenden Nitratkonzentrationen eine zunehmende Limitierung der Denitrifikationsprozesse zu verzeichnen ist.

Der Berechnung von vorhandener und erforderlicher Denitrifikationskapazität in der letzten Kaskade liegen folgende Zusammenhänge zugrunde:

$$\text{Vorh. Denitrifikationskapazität in letzter Kaskade} = \frac{\text{In letzter Kaskade denitrifiziertes Nitrat}}{\text{CSB im Zulauf zur letzten Kaskade}}$$

$$\text{Erf. Denitrifikationskapazität in letzter Kaskade} = \frac{\text{In letzter Kaskade zu denitrifizierendes Nitrat}}{\text{CSB im Zulauf zur letzten Kaskade}}$$

Wird die Nitratkonzentration im Zulauf und im Ablauf der Denitrifikation der letzten Kaskade online gemessen, kann die aktuell in der letzten (d. h. in diesem Beispiel der dritten) Kaskade vorhandene Denitrifikationskapazität mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$DK_{\text{vorh}} = \frac{NO_{3,\text{zu}3}(1 - \text{Auf}t3_{\text{vorh}} + RV) - NO_{3,\text{ab}3}(1 + RV)}{\text{Auf}t3_{\text{vorh}} \cdot \text{CSB}_{\text{zu}}} \quad \text{Gl. 1.11}$$

mit

| | | |
|------------------------------|--|-------------------------|
| $NO_{3,\text{zu}3}$ | NO ₃ -N Zulauf Denitrifikation Kaskade 3 (Ablauf Kaskade 2) | [g N/m ³] |
| $NO_{3,\text{ab}3}$ | NO ₃ -N Ablauf Denitrifikation Kaskade 3 | [g N/g CSB] |
| RV | Rücklaufverhältnis | [-] |
| $\text{Auf}t3_{\text{vorh}}$ | vorhandener Zulaufanteil Kaskade 3 | [-] |
| CSB_{zu} | CSB Zulauf Belegung | [g CSB/m ³] |

Die Berechnung der aktuell erforderlichen Denitrifikationskapazität in der letzten Kaskade basiert auf Gl. 1.11, wobei anstelle der im Ablauf der Denitrifikation vorhandenen Nitratkonzentration (NO_{3,ab3}) ein Sollwert (NO_{3,ab3,soll}) und statt des vorhandenen Zulaufanteils (Auf $t3_{\text{vorh}}$) der erforderliche Zulaufanteil (Auf $t3_{\text{erf}}$) in die Formel eingesetzt werden:

$$DK_{erf} = \frac{NO_{3,zu3}(1 - Auft3_{erf} + RV) - NO_{3,ab3,soll}(1 + RV)}{Auft3_{erf} \cdot CSB_{zu}} \quad \text{Gl. 1.12}$$

mit

$NO_{3,ab3,soll}$ Sollwert NO_3 -N Ablauf Denitrifikation Kaskade 3 [g N/g CSB]
 $Auft3_{erf}$ erforderlicher Zulaufanteil Kaskade 3 [-]

Diese Beziehungen (Gl. 1.11 und Gl. 1.12) werden in Gl. 1.10 eingesetzt und nach $Auft3_{erf}$ umgestellt, womit sich folgende Gleichung ergibt:

$$Auft3_{erf} = Auft3_{vorh} \frac{NO_{3,zu3} - NO_{3,ab3,soll}}{NO_{3,zu3} - NO_{3,ab3}} \quad \text{Gl. 1.13}$$

Diese Formel zur Berechnung des erforderlichen Zulaufanteils in die dritte Kaskade wurde in einen Regelungsalgorithmus im Simulationsmodell implementiert und getestet, wobei die NO_3 -N-Konzentration im Zulauf (bzw. Ablauf Kaskade 2) und im Ablauf zur Denitrifikation der dritten Kaskade gemessen und die vorhandene Aufteilung (gedämpft durch ein PT1-Glied, Zeitkonstante z. B. 30 min) zurückgeführt wird. Wie im zuvor beschriebenen Ansatz, bleibt $Auft2$ konstant, womit sich $Auft1$ ergibt. Durch geeignete Grenzwerte wird die Schwankungsbreite der Aufteilung eingestellt.

Die folgenden Abbildungen zeigen die für dieses Konzept, bei sonst gegenüber der Referenz unveränderten Einstellungen, mit dem Lastfall Qt2Qm1 simulierten Zeitverläufe für NO_3 -N, NH_4 -N, N_{ges} im Ablauf Belebung und die Zulaufaufteilung. Lauf 1 veranschaulicht jeweils die Ergebnisse der Referenzsimulation und Lauf 2 zeigt die Simulationsergebnisse mit lastflexibler Zulaufaufteilung entsprechend der Denitrifikationskapazität in der dritten Kaskade. Der Verlauf der Stickstoff-Parameter für die Simulation mit konstanter „schlammbelastungsgleicher“ Zulaufaufteilung von 40 % : 32 % : 28 % wird zum Vergleich in Lauf 3 dargestellt.

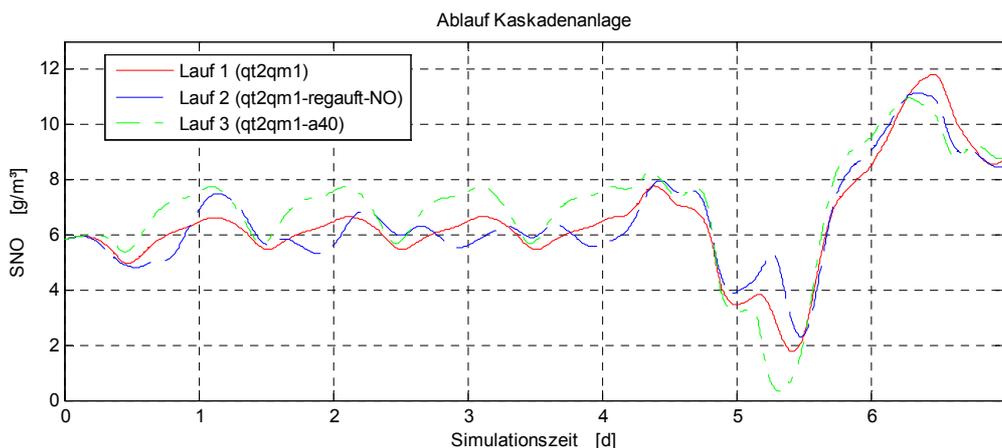


Abbildung 1.45: NO_3 -N Ablauf Belebung (Zulaufaufteilung entsprechend NO_3 -N, Lastfall Qt2Qm1)

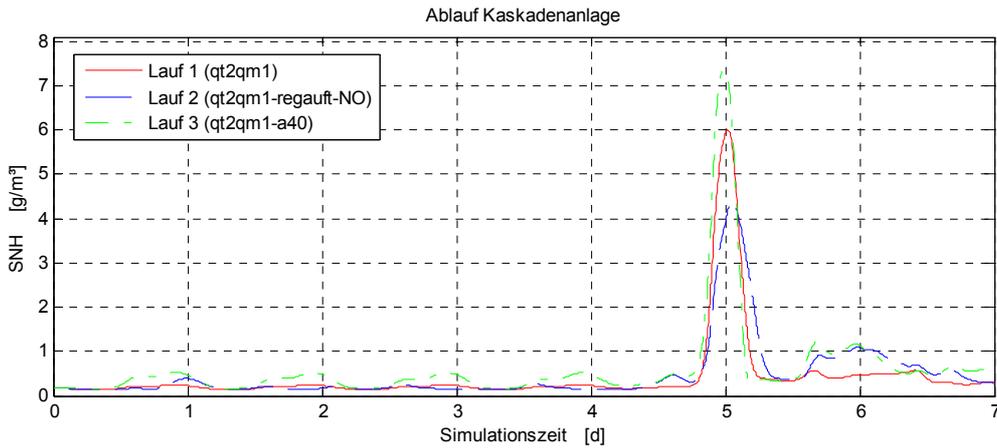


Abbildung 1.46: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belegung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

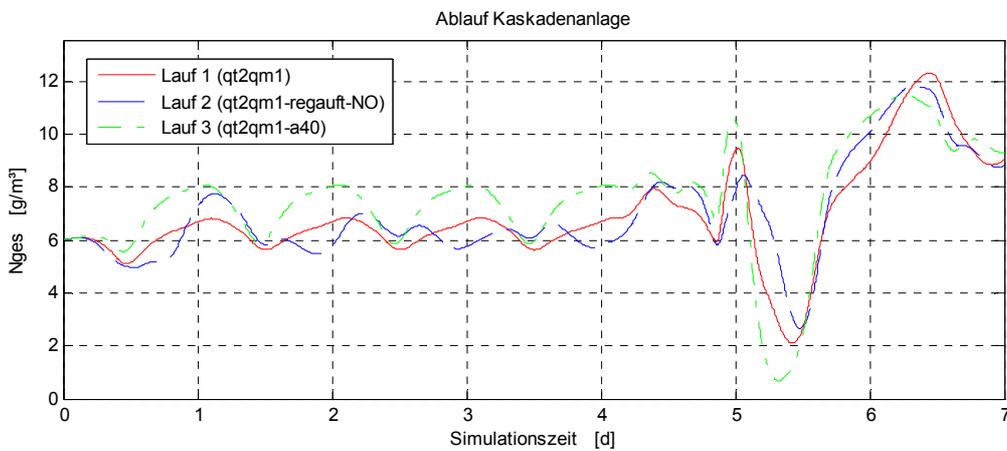


Abbildung 1.47: N_{ges} Ablauf Belegung (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

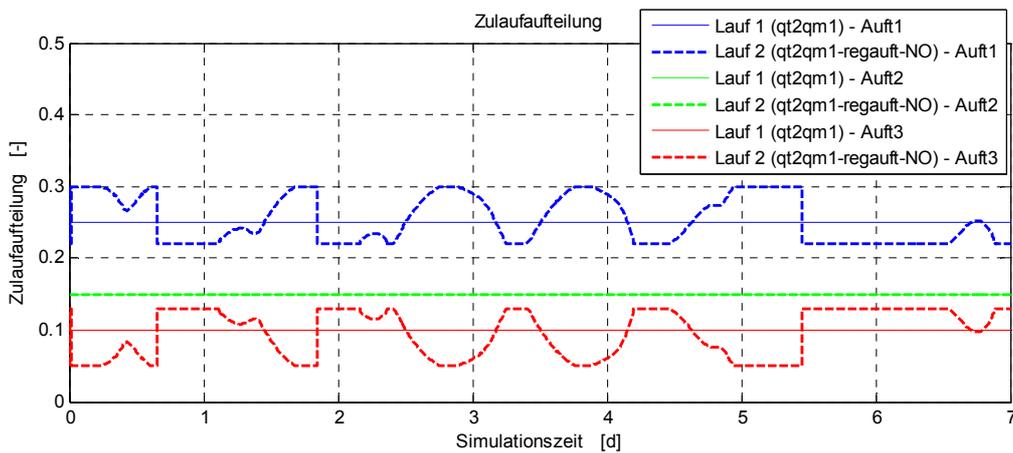


Abbildung 1.48: Zulaufaufteilung Kask. (Zulaufaufteilung entsprechend $\text{NO}_3\text{-N}$, Lastfall Qt2Qm1)

Die Simulationsergebnisse zeigen z. T. eine Senkung der $\text{NO}_3\text{-N}$ - bzw. N_{ges} -Ablauf-Konzentration. Durch die schwer zu quantifizierenden dynamischen Wechselwirkungen der lastflexiblen Variation der Zulaufaufteilung, kommt es jedoch zu einer gewissen zeitlichen Verschiebung von $\text{NO}_3\text{-N}$ - bzw. N_{ges} -Ablaufspitzen, so dass die Konzentration nicht immer unter dem Referenzfall liegt. Dieser Effekt war auch durch Parametervariationen (z. B. Zeitkonstante PT_1 -Glied) nicht vollständig zu beseitigen. Deshalb wird das Konzept zunächst nicht weiter verfolgt. Jedoch wären zukünftig weiterführende Untersuchungen, wenn möglich auch mit Modellen anderer Kaskadenanlagen, denkbar.

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|--|
| Belüftung | kaum Auswirkungen auf Gesamt-Luftverbrauch |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitze bei MW reduziert um ca. 1,5 g/m ³ , (aufgrund der Entlastung der Kaskade 3 bei MW, dieser Effekt wird durch das N _{ges} -basierte Konzept jedoch nicht gezielt herbeigeführt) |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N und N _{ges} verschoben ggü. Referenz, Mittelwert etwas gesenkt |
| Fazit | Die Regelung ist in dieser Form nicht geeignet, weil keine zuverlässige Senkung von N_{ges} im Ablauf simuliert wurde. Weiterführende Untersuchungen sind denkbar (auch mit Modellen anderer Kaskadenanlagen). |

Tabelle 1.9: Kurzauswertung lastflexible Zulaufaufteilung entsprechend NO₃-N (Lastfall Qt2m1)

1.2.6 Ansätze für Regelungen mit Störgrößenaufschaltung

Mit Regelungen, die auf Ablaufmessungen basieren, lassen sich hochdynamische Lastsituationen die zu unerwünschten Spitzen in den Ablaufkonzentrationen führen, kaum bekämpfen. Dafür sind ablaufbasierte Regelungen nicht prädestiniert. Für diese Aufgabe können Störgrößenaufschaltungen (Vorsteuerungen) einen besseren Beitrag leisten, wie nachfolgend erläutert wird.

Viele aussagekräftige Messungen werden am Ablauf der Belebung bzw. im Ablauf der Nachklärung installiert, um das Betriebsergebnis zu überwachen. Ein wirksamer Stelleingriff ist das Umschalten der variablen Beckenabschnitte (Steuerstufen), die entweder zur Nitrifikation belüftet oder zur Denitrifikation unbelüftet betrieben werden. Da Kläranlagen mit Kaskadendenitrifikation und mit vorgeschalteter Denitrifikation entweder als Beckenkaskaden oder lang gestreckte Becken ausgeführt werden, verhalten sich diese Anlagen strömungstechnisch wie Plug-Flow-Reaktoren. Das führt dazu, dass der Stelleingriff „Steuerstufe“ im Fließweg „weit“ vor den Ablaufmessungen liegt. Damit können Regelungen, die auf Ablaufmessungen basieren und die variablen Zonen als Stellgröße benutzen nicht besonders wirksam zu Beherrschung kurzer dynamischer Störereignisse (z. B. extremer Frachtstöße) eingesetzt werden. D. h., wenn ein Laststoß (Tagespitze der Fracht oder ein extremes Mischwasser-Ereignis) am Ablauf der Belebung zu Konzentrationserhöhungen führt, ist es in der Regel zu spät die variablen Zonen zu aktivieren, denn die Frachtspitze hat diese bereits passiert. Soll die variable Zone dennoch für diese Aufgabe genutzt werden, muss auf das Prinzip einer Vorsteuerung zurückgegriffen werden.

Mit einer prädiktiven Steuerung/Regelung die auf einem sehr einfachen robusten Modell beruht und die Nitrifikation mit hoher Güte abbildet kann das durch die gegebenen Stellgrößen vorhandene Potenzial zur Senkung der NH₄-N-Ablaufspitzen besser ausgeschöpft werden [Ale01].

In diesem Projekt lag der Schwerpunkt jedoch auf der Einsparung von Belüftungsenergie, ohne die Reinigungsleistung und die Betriebssicherheit zu beeinträchtigen. Als Grundlage hierfür hat sich eine kontinuierliche (gedrosselte) Belüftung ausgewählter Steuerstufen als sehr geeignet erwiesen. Diese effektive Grundeinstellung bildete deshalb im Vorhaben den Ausgangspunkt für die Entwicklung von lastflexiblen Konzepten, weshalb auch die Stellgröße „belüftetes Volumen“ hier nur noch aus Sicht der Denitrifikation interessant erscheint. Weil durch das somit vergrößerte aerobe Volumen bereits die NH₄-N-Ablaufspitzen bei gleichzeitig geringerem Luftverbrauch deutlich gesenkt werden können, erfolgte auch keine Störgrößenaufschaltung zur Einbindung weiterer Eingriffsmöglichkeiten, wie z. B. der Sauerstoffsollwerte. Die Bekämpfung von NO₃-N- bzw. N_{ges}-Ablaufspitzen mit einer modellbasierten prädiktiven Vorsteuerung/Regelung ist prinzipiell möglich, aber durch die im Vergleich zur Nitrifikation (siehe [Ale01]) höhere Komplexität einer Modellierung der

Denitrifikation (Zulauffraktionierung, Hydrolyse, Verhältnis aerober/anoxischer CSB-Abbau, etc.) gerade im praktischen Einsatz deutlich aufwändiger. Deshalb wurden an dieser Stelle relativ einfache Konzepte, die auf der Messgröße Nitrat im Ablauf Denitrifikation bzw. alternativ (speziell bei vorgeschalteter Denitrifikation, siehe Abschnitt 1.3.5) im Ablauf Belebung basieren, bevorzugt.

1.3 Prüfung der Übertragbarkeit unter Berücksichtigung von Industrieabwässern

1.3.1 Überblick entwickelte Konzepte

Die folgende Tabelle enthält eine Zusammenstellung der anhand der Beispielanlage Klärwerk Magdeburg/Gerwisch (mit Kaskadendenitrifikation => KD) untersuchten statischen und dynamischen Konzepte mit Aussagen zur prinzipiellen Übertragbarkeit auf das Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation (VD).

| Konzept | | Details/ Bemerkungen | Untersuchungsergebnisse für KD (Simulationsmodell) | Prinzipielle Übertragbarkeit auf VD |
|---------------------|---|---|---|--|
| Statische Konzepte | MK1 (Gedrosselte Belüftung der Steuerstufen in 1. Kaskade) | nur für KD relevant | Leichte Verbesserungen bzgl. Nitrifikation, Luftverbrauch und Denitrifikation | nein |
| | MK2 (Gedrosselte Belüftung der jeweils hinteren Steuerstufe) | ggf. kombiniert mit Senkung der Sauerstoffsollwerte | Mittlere bis deutliche Verbesserungen bzgl. Nitrifikation und Luftverbrauch, aber nicht zwangsläufig Verbesserung Denitrifikation | ja |
| | MK3 (Gedrosselte Belüftung aller Steuerstufen) | ggf. kombiniert mit Senkung der Sauerstoffsollwerte | Deutliche Verbesserungen bzgl. Nitrifikation und Luftverbrauch, aber u. U. Verschlechterung Denitrifikation | ja |
| Dynamische Konzepte | NH _{4,ab} -Regler (Überlagerte Regelung von NH ₄ -N im Ablauf Belebung) | für lastflexible Anpassung der Sauerstoffsollwerte (auf Basis von MK3) | Weitere Verbesserungen bzgl. Nitrifikation (insbesondere NH ₄ -N-Ablaufspitzen) und Luftverbrauch, aber speziell bei Frachtstößen keine Verbesserung Denitrifikation | ja |
| | Automatische Umschaltung Steuerstufen (entspr. NO ₃ -N in Denitrifikation) | Ab-/Zuschaltung Steuerstufenbelüftung bei Über-/Unterschreitung Grenzwert für NO ₃ -N im Ablauf Denitrifikation (auf Basis von MK3) | Reduzierung von NO ₃ -N- und N _{ges} -Ablaufspitzen | ja (ggf. Modifikation Messort NO ₃ -N Ablauf Belebung) |
| | NH _{4,ab} -Regler + automatische Umschaltung Steuerstufen | Kombination NH _{4,ab} -Regler und automatische Umschaltung Steuerstufen (auf Basis von MK3) | Verbesserungen Nitrifikation und Luftverbrauch entspr. NH _{4,ab} -Regler und Reduzierung N _{ges} -Ablaufspitzen | ja (ggf. Modifikation Messort NO ₃ -N Ablauf Belebung) |
| | Steuerung der O ₂ -Konzentrationen im Längsprofil | Konzept erfordert unterlagerte O ₂ -Regelungen und Luftmengenmessungen in mindestens zwei Abschnitten im Längsprofil der Nitrifikation, weiterer Forschungsbedarf (dynamische Simulation, halbtechnische Versuche) | | |
| | Regelung von NH ₄ -N im Ablauf Belebung über Zulaufaufteilung | Lastflexible Zulaufaufteilung zur Reduzierung von NH ₄ -N-Spitzen im Ablauf | Deutliche Reduzierung der NH ₄ -N-Ablaufspitzen | nein |
| | Regelung von NO ₃ -N im Ablauf Denitrifikation der letzten Kaskade über Zulaufaufteilung | Lastflexible Zulaufaufteilung zur Reduzierung von NO ₃ -N und N _{ges} im Ablauf durch Ausschöpfung Denitrifikationskapazität in letzter Kaskade | Nur teilweise Reduzierung NO ₃ -N bzw. N _{ges} im Ablauf, weiterführende Untersuchungen des Ansatzes sind notwendig | nein |

Tabelle 1.10: Überblick Entwicklung und Übertragbarkeit statischer und dynamischer Konzepte

Eine Prüfung der Übertragbarkeit geschieht durch dynamische Simulation mit einem geeigneten Modell (siehe Abschnitt 1.3.2). Die in diesem Vorhaben entwickelten statischen und dynamischen Konzepte zur optimierten Belüftung sind prinzipiell auf allen Belebtschlamm-Kläranlagen mit Druckbelüftung und längs durchströmten Belebungsbecken (z. B. Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation und der Kaskadendenitrifikation) anwendbar. Damit kommen neben kommunalen auch industrielle Kläranlagen in Betracht. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Anwendbarkeit bzw. die Effektivität der Konzepte stark von der Auslastung der Kläranlage und von der Beschaffenheit des Abwasserzulaufes (insbesondere der Höhe des TKN : CSB-Verhältnisses) abhängt (siehe Abschnitt 1.3.6).

1.3.2 Simulationsmodell zur Prüfung der Übertragbarkeit

Die Prüfung der Übertragbarkeit der erzielten Ergebnisse auf grundsätzlich vergleichbare Kläranlagen erfolgte mit Hilfe des Simulationsmodells einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation („VD-Modell“). Dafür wurde von einem von den COST-Arbeitsgruppe 624 erstelltes und international eingeführtes Benchmark-Modell verwendet: Das Benchmark Simulation Model no. 1 (BSM1); siehe <http://www.benchmarkWWTP.org>, [Cop02] oder [Jep04]. Das BSM1 dient als Plattform für den objektiven Vergleich von Regelungskonzepten für Kläranlagen durch Simulation. Es umfasst eine definierte Anlagenkonfiguration, ein Simulationsmodell mit entsprechenden Zulaufbelastungen sowie dazu gehörige Testverfahren und Bewertungskriterien. Das BSM1 (bzw. die zugrunde liegende Konfiguration einer Kläranlage) ist relativ einfach. Es wird eine Belebungsanlage mit vorgeschalteter Denitrifikation in zwei anoxischen Becken, gefolgt von drei aeroben Becken und einem Nachklärbecken abgebildet. Eine genaue Beschreibung der Anlagenkonfiguration ist z. B. unter <http://www.benchmarkWWTP.org> oder [Cop02] zu finden. Als mathematische Modellgrundlage dient das ASM1, entsprechend seiner Veröffentlichung im Jahre 1987. Im Original-BSM1 wurden zwei Regelungskonzepte implementiert, welche als Beispiel und Ausgangspunkt für die Entwicklung und den Test weiterer MSR-Konzepte dienen. Dies betrifft eine Sauerstoffregelung im letzten belüfteten Becken und die Regelung von Nitrat im Ablauf der Belebung über die Höhe der internen Rezirkulation. Abbildung 1.49 gibt einen Überblick zum Original-BSM1.

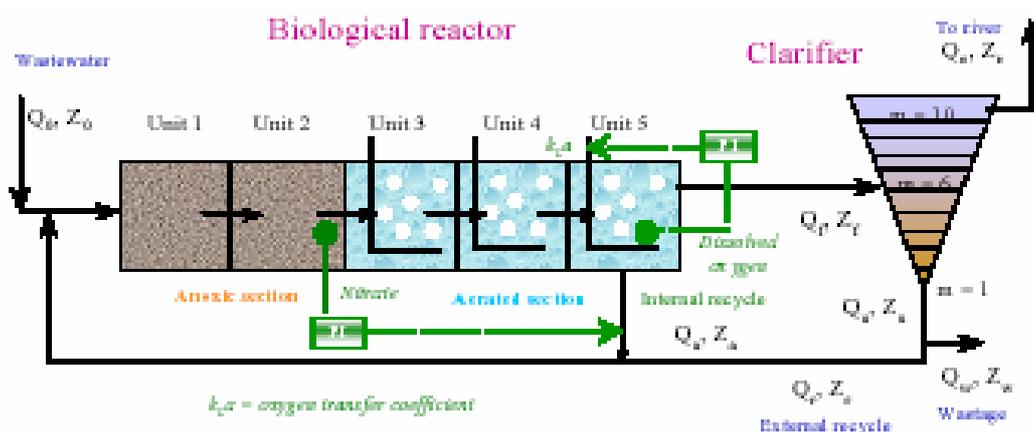


Abbildung 1.49: Überblick zum Original-BSM1 (siehe <http://www.benchmarkWWTP.org>)

Hier wird von einer SIMBA-Implementierung des BSM1 ausgegangen (siehe <http://simba.ifak-md.de/simba>). Bevor die Übertragbarkeit der in diesem Vorhaben entwickelten Konzepte zur optimierten Belüftung getestet wird, wurden einige Änderungen an diesem Modell bzw. an dessen Ausgangseinstellungen vorgenommen, welche in Tabelle 1.11 aufgeführt werden.

| Komponente/Einstellung | Original-BSM1 | Modifikation (VD-Modell) |
|---|---|--|
| Modell Nachklärung | 10-Schichtenmodell [Tak91], Simulation biologischer Prozesse deaktiviert | 3-Schichtenmodell [Sim07], Simulation biologischer Prozesse aktiviert |
| Fakultativ belüftete Zonen (Steuerstufen) | Nur Becken 3 bis 5 (obligatorisch) belüftet | Möglichkeit der zusätzlichen Belüftung von Becken 2 |
| O ₂ -Regelung in den belüfteten Becken | Möglichkeit der O ₂ -Regelung nur im letzten Becken (ein O ₂ -Regelkreis), in Becken 3 und 4 nur jeweils konstante Sauerstoffzufuhr | Möglichkeit der O ₂ -Regelung in allen drei Nitrifikationsbecken (drei O ₂ -Regelkreise) |
| Interne Rezirkulation | Nitrat im Ablauf Denitrifikation geregelt über interne Rezirkulation | Konstante Menge: 55 338 m ³ /d Mittleres internes Rückführverhältnis: 3 |

Tabelle 1.11: Änderung von Ausgangs-Einstellungen des BSM1

Grundsätzlich wird bei den nachfolgend ausgewerteten Simulationen mit dem VD-Modell die zeitliche Dynamik von modellierten Online-Sensoren (NH₄-N, NO₃-N, O₂) und ein Rauschen der Messsignale entsprechend der SIMBA-Implementierung des BSM1 berücksichtigt (siehe <http://simba.ifak-md.de/simba>). Alle Simulationen mit dem VD-Modell geschehen auf Basis einer Abwassertemperatur von 15 °C und mit den unter <http://www.benchmarkWWTP.org> angegebenen biologischen Parametern, welche sich auf diese Temperatur beziehen. Der für das BSM1 vorgeschlagene Trockenwetterzulauf (siehe auch [Van96]) wird als Grundlage für die folgenden Untersuchungen verwendet.

1.3.3 Simulationen mit Trockenwetterzulauf

Die Anwendung des im Original BSM1 modellierten Trockenwetterzulaufes führt zu einer generell sehr starken Belastung der Anlage, im Hinblick auf den CSB und im noch stärkeren Maße auf den TKN im Zulauf. Das hohe TKN : CSB-Verhältnis von ca. 1 : 7 ist jedoch an dieser Stelle geeignet, um im Zusammenhang mit den hohen Zulauf-Frachten die Grenzen für eine Anwendung der entwickelten Konzepte zu testen (siehe Abschnitt 1.3.6). Zur Prüfung der Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte (siehe Tabelle 1.10) wurden mit dem VD-Modell und dem Original-BSM1-Trockenwetterzulauf [Van96] Simulationsläufe mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- **Referenzsimulation:** entsprechend Original-BSM1, aber mit separat geregelten O₂-Konzentrationen in den Nitrifikationsbecken; siehe Tabelle 1.11 und Tabelle 1.12
- **Statisches Konzept 1:** zusätzlich kontinuierliche, gedrosselte Belüftung von Becken 2; siehe Tabelle 1.12 (vergleichbar mit MK2 bzw. MK3 in Abschnitt 1.2.2, aber ohne Senkung der O₂-Sollwerte)
- **Statisches Konzept 2:** zusätzlich kontinuierliche, gedrosselte Belüftung von Becken 2 und Drosselung der Belüftung in Becken 3 durch Senkung des O₂-Sollwertes; siehe Tabelle 1.12 (vergleichbar mit MK2 bzw. MK3 in Abschnitt 1.2.2)

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die zur Untersuchung der o. g. statischen Konzepte geänderten Modelleinstellungen im Vergleich mit der Referenzsimulation:

| Größe | Referenzsimulation | Statisches Konzept 1 | Statisches Konzept 2 |
|-----------------------------------|--------------------|--|--|
| Belüftung Steuerstufe (Becken 2) | aus | gedrosselt (O ₂ -Gehalt ~0,5 g/m ³) | gedrosselt (O ₂ -Gehalt ~0,5 g/m ³) |
| O ₂ -Sollwert Becken 3 | 2 g/m ³ | 2 g/m ³ | 0,5 g/m ³ |
| O ₂ -Sollwert Becken 4 | 2 g/m ³ | 2 g/m ³ | 2 g/m ³ |
| O ₂ -Sollwert Becken 5 | 2 g/m ³ | 2 g/m ³ | 2 g/m ³ |

Tabelle 1.12: Modelleinstellungen bei Prüfung der Übertragbarkeit statischer Konzepte

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für das Statische Konzept 1 mit dem VD-Modell und dem Original-BSM1-Trockenwetterzulauf simulierte Zeitverläufe für $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Lauf 2) im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1).

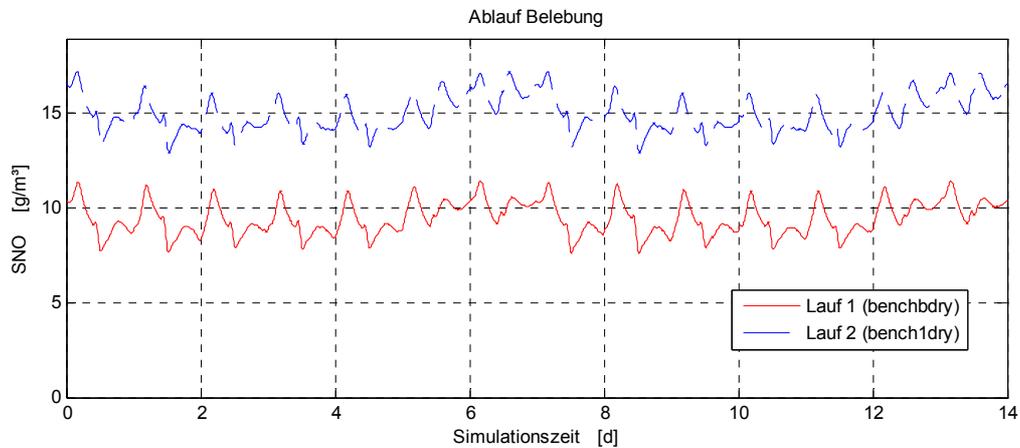


Abbildung 1.50: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)

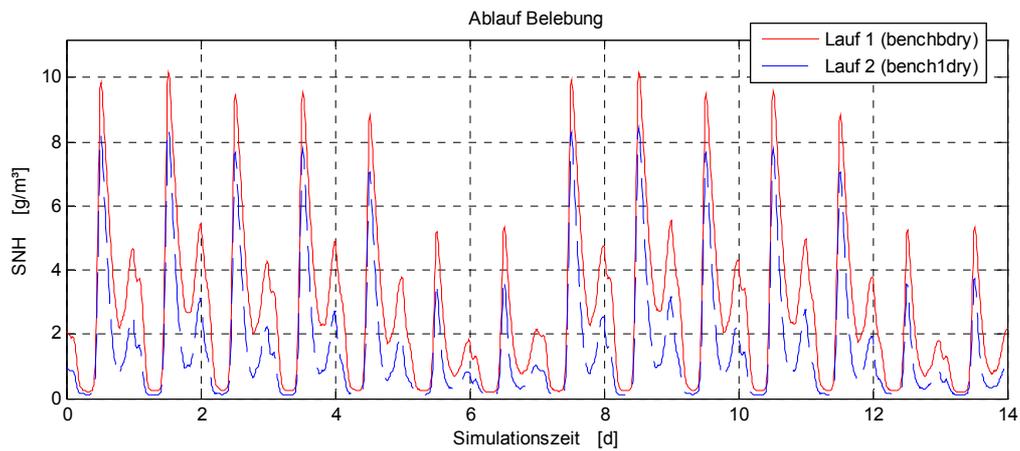


Abbildung 1.51: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)

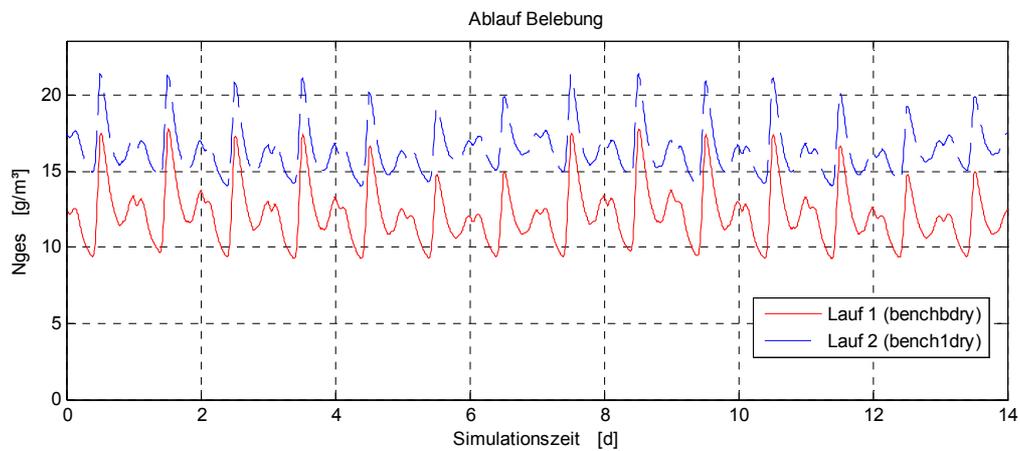


Abbildung 1.52: N_{ges} Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW- Zulauf)

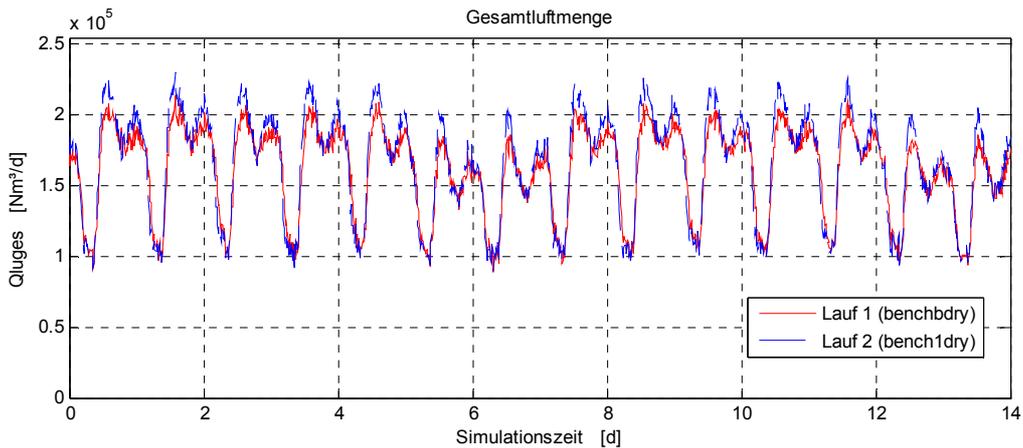


Abbildung 1.53: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sich infolge der Belüftung von Becken 2 nicht nur die Ablaufspitzen sondern auch die mittlere Konzentration von $\text{NH}_4\text{-N}$ deutlich senken lassen (um ca. 2 g/m^3). Diese signifikante Steigerung der Nitrifikation hebt den Einspareffekt der gedrosselten Belüftung von Becken 2 bzgl. der erforderlichen Luftmenge mehr als auf – es wurde ein um 3 % erhöhter Gesamt-Luftverbrauch simuliert. Sehr große Erhöhungen (um ca. 5 g/m^3) wurden für die $\text{NO}_3\text{-N}$ - und N_{ges} -Konzentrationen im Ablauf berechnet. Das wird bei dieser Lastsituation durch das im Vergleich zur Referenz geringere anoxische Volumen bewirkt. Durch ein im Verhältnis zum Stickstoff geringes Kohlenstoffangebot im Zulauf besteht Substratmangel, und der Nitratabbau ist in den Denitrifikationsbecken schon in der Referenzsimulation unvollständig. Dieser Effekt wird natürlich durch die Verringerung des unbelüfteten Volumens beim Statischen Konzept 1 verstärkt, was Abbildung 1.54 verdeutlicht. Das Diagramm zeigt das über die Zeit gemittelte Profil der $\text{NO}_3\text{-N}$ -Konzentration über das Volumen der fünf in Reihe geschalteten Becken des VD-Modells im Vergleich von Referenz (Lauf 1) und Statischem Konzept 1 (Lauf 2). Abbildung 1.55 zeigt das entsprechende Profil der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration.

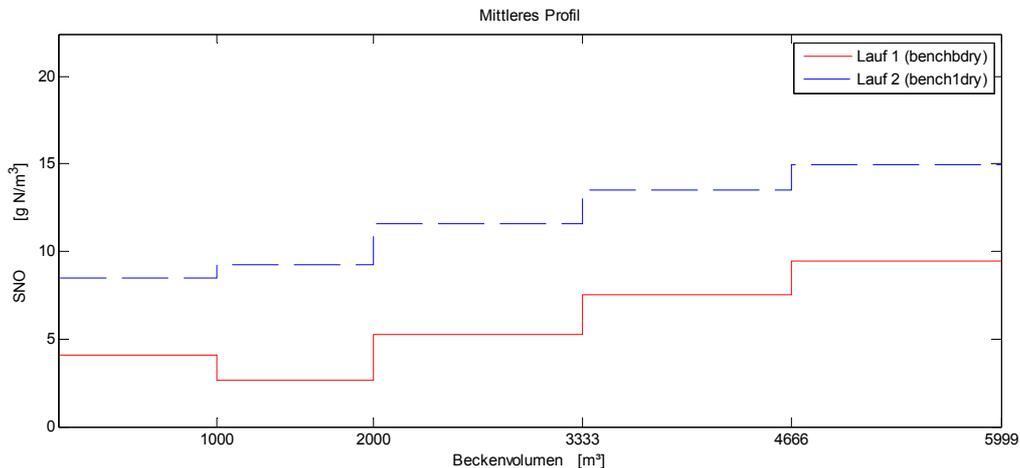


Abbildung 1.54: Mittleres Profil $\text{NO}_3\text{-N}$ (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)

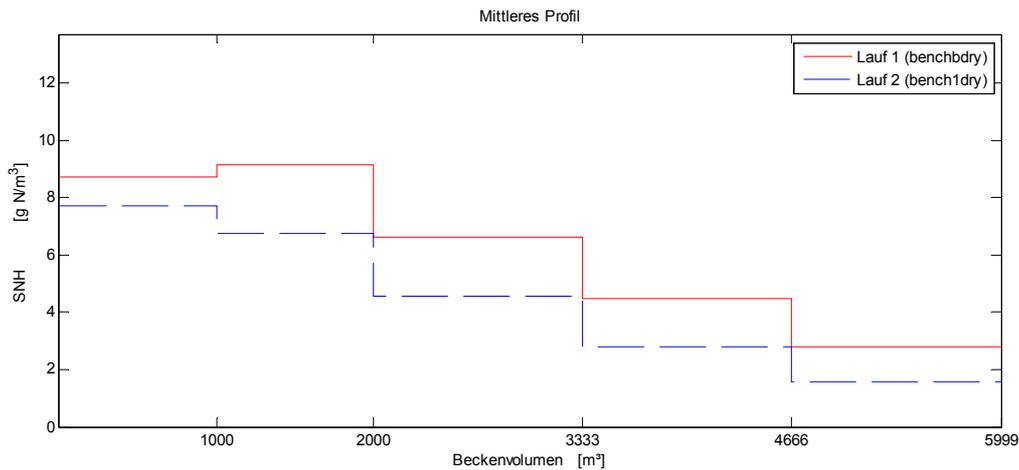


Abbildung 1.55: Mittleres Profil $\text{NH}_4\text{-N}$ (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit TW-Zulauf)

Dieses Konzept ist, vor allem aufgrund der erhöhten N_{ges} -Konzentrationen im Ablauf, bei dem hier betrachteten Original-BSM1-Trockenwetterzulauf nicht für das VD-Modell geeignet: Tabelle 1.13 enthält eine kurze zusammenfassende Auswertung der Simulation des Statisches Konzeptes 1:

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|---|--|
| Belüftung | Mehrverbrauch ca. 3 % |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung | $\text{NH}_4\text{-N}$ -Spitzen und Mittelwert reduziert um ca. 2 g/m^3 |
| $\text{NO}_3\text{-N}$, N_{ges} Ablauf Belebung | Verlauf $\text{NO}_3\text{-N}$ und N_{ges} deutlich erhöht (um ca. 5 g/m^3) |
| Fazit | Aufgrund der stark erhöhten N_{ges}-Konzentrationen im Ablauf ist das Konzept für dieses Beispiel nicht geeignet. |

Tabelle 1.13: Kurzauswertung Statisches Konzept 1 (VD-Modell mit TW- Zulauf)

Die Simulation des Statisches Konzeptes 2 (siehe Tabelle 1.12) ergab eine Reduzierung des Luftverbrauches von ca. 5 % bei etwa gleichen $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Ablauf der Belebung. Weil aber auch hier eine erhöhte N_{ges} -Konzentration im Ablauf (um ca. 2 g/m^3) simuliert wurde, ist die Anwendbarkeit für diesen Fall eingeschränkt und es wird auf eine Darstellung verzichtet. Das gilt auch für die auf den statischen Konzepten basierenden dynamischen Konzepte, deren Untersuchungen zur Übertragbarkeit im Abschnitt 1.3.5 am Beispiel des VD-Modells mit industriellem Abwasseranteil dokumentiert werden.

Die hier abgebildete Lastsituation (kontinuierlich hohe CSB- und TKN-Fracht bei gleichzeitig erhöhtem TKN : CSB-Verhältnis) stellt einen sehr ungünstigen Fall dar und trifft zumindest in Deutschland auf viele kommunale Kläranlagen nicht in diesem Maße zu. An dem Beispiel lassen sich jedoch gut die erforderlichen Rahmenbedingungen für die Anwendung der entwickelten Konzepte ableiten: Die Variation des belüfteten Volumens und/oder der Sauerstoffkonzentration kann, wenn sowohl Denitrifikation als auch Nitrifikation unvollständig verlaufen, kaum beide Prozesse verbessern (d. h. N_{ges} im Ablauf optimieren). Auch wird dann eine Verringerung des Luftverbrauches nur schwer möglich sein ohne die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufwerte zu erhöhen. Weitere Erläuterungen hierzu werden in den zusammenfassenden Ausführungen zur Prüfung der Übertragbarkeit im Abschnitt 1.3.6 gegeben.

1.3.4 Berücksichtigung von Industrieabwasser

Beispiel für einen industriellen Abwasserzulauf:

In vielen Branchen fällt ein Abwasser mit relativ hohem CSB-Gehalt mit auch ausreichendem leicht abbaubaren Anteil an, z. B. bei der Kartoffelverarbeitung, der Zucker- und Stärkeherstellung oder in Brauereien. Als typisches Beispiel wird hier die kartoffelverarbeitende Industrie betrachtet; mit in Deutschland z. Z. 48 Betrieben, wobei es sich zumeist um Indirekteinleiter handelt [DWA05]. Die Reinigung des in kartoffelverarbeitenden Betrieben anfallenden Abwassers erfolgt i. d. R. nach einer im Produktionsbetrieb statt findenden Vorbehandlung und Speicherung (Speicherbecken mit Tages- oder Wochenmengenausgleich), gemeinsam mit häuslichem Abwasser in kommunalen Kläranlagen. Hierfür werden u. a. auch die in diesem Vorhaben betrachteten längs durchströmten Belebungsbecken eingesetzt.

Um eine bessere Vergleichbarkeit im Rahmen der Untersuchungen zur Übertragbarkeit zu gewährleisten, soll das zuvor beschriebene Benchmark-Modell BSM1 bzw. das darauf aufbauende VD-Modell (siehe Abschnitt 1.3.2) als Basis für die Simulation einer Kläranlage mit deutlichem industriellen Abwasseranteil (Abwasser aus Kartoffelverarbeitung) dienen. Es erfolgt die Beimischung eines Teilstroms mit Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung auf den Trockenwetterzulauf des BSM1. Dabei wird eine weitgehende Zulaufvergleichmäßigung über den Zeitraum einer Woche durch ein entsprechend dimensioniertes, vorgeschaltetes Misch- und Ausgleichsbecken angenommen. Deshalb erfolgen die Simulationen mit konstantem Volumenstrom und konstanten Inhaltsstoffen des beigemischten industriellen Abwassers.

Bei der Kartoffelverarbeitung fallen verschiedene Abwasserarten, wie Produktionsabwasser, Reinigungsabwasser, etc., an. Verbindliche Angaben über spezifischen Anfall, Schmutzkonzentrationen und Frachten des Gesamtabwassers sind nicht verfügbar. Menge und Beschaffenheit sind von verschiedenen Einflüssen abhängig, wie z. B. Rohstoffsorten, Kartoffellagerung, Produktionspalette, Wasserkreislaufführung. Im DWA-Merkblatt M 753 [DWA05] werden einige repräsentative Betriebswerte zur Menge und –beschaffenheit des für die Abwasserreinigung maßgeblichen Produktionsabwassers verschiedener Produzenten aufgeführt. Hieraus wurde als Basis für die Modellierung des industriellen Abwasseranteiles exemplarisch die Angaben zum Produktionsabwasser eines Kartoffelchips-Herstellers (Chipsherstellung nach Siebung (0,6 mm) bei mechanischer Schälung) herangezogen; siehe Tabelle 9 in [DWA05]. Die folgende Tabelle zeigt die dort angegebenen mittleren Belastungswerte dieses durch Siebung mechanisch vorgereinigten Abwassers, welche hier als Ausgangsgrößen für die Zulauffraktionierung dienen:

| Parameter | Mittlere Konzentration/Menge industrieller Abwasserzulauf |
|--------------------------------|---|
| Abwasserzufluss | 790 m ³ /d |
| CSB homogenisiert | 3 638 g/m ³ |
| CSB filtriert | 2 415 g/m ³ |
| BSB ₅ homogenisiert | 1 977 g/m ³ |
| BSB ₅ filtriert | 1 430 g/m ³ |
| Stickstoff, gesamt | 296 g/m ³ |
| Ammonium-Stickstoff | 29 g/m ³ |
| Abfiltrierbare Stoffe | 650 g/m ³ |

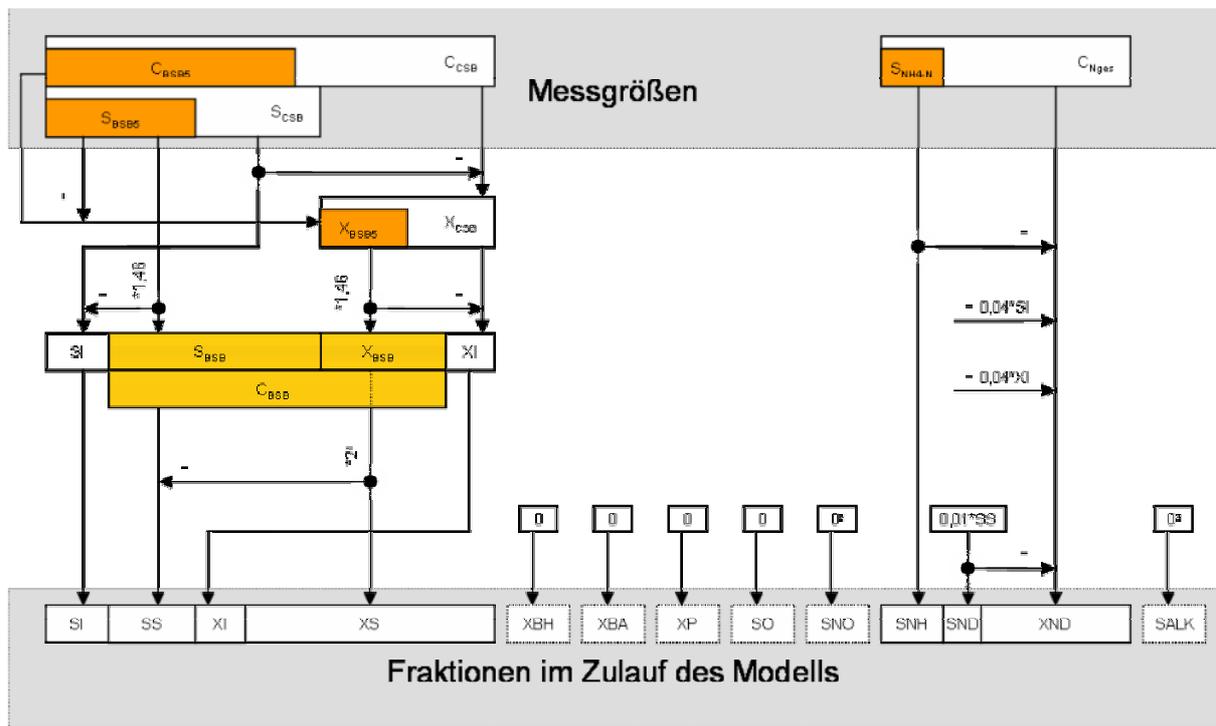
Tabelle 1.14: Mittlere Belastungswerte industrieller Abwasserzulauf

Es wird deutlich, dass dieses Abwasser einen sehr hohen CSB und auch BSB₅ aufweist, so dass trotz der im Vergleich zu kommunalem Abwasser hohen N_{ges}-Konzentration ein günstigeres TKN : CSB-Verhältnis von ca. 1 : 12 vorliegt. Kommunales Abwasser weist nach einer Kurzvorklä rung i. d. R. ein TKN : CSB-Verhältnis von 1 : 9 auf [ATV00b]. Außerdem

liegt das BSB₅ : CSB-Verhältnis mit ca. 1 : 1,8 etwas über dem von rein kommunalem Abwasser. Der große Anteil des filtrierten BSB₅ weist auf einen hohen Anteil leicht abbaubarer Inhaltsstoffe hin. Diese Faktoren wirken sich günstig auf die Denitrifikationsleistung aus.

Fraktionierung eines industriellen Abwasserzulaufes und Integration in das VD-Modell:

Ausgehend von der zuvor beschriebenen Datengrundlage wurde eine für die Simulation erforderliche separate Fraktionierung des industriellen Abwasserzulaufes vorgenommen und in das VD-Modell integriert. Die folgende Abbildung veranschaulicht den für dieses Beispiel umgesetzten Algorithmus zur Zulauffraktionierung.



- ¹ Faktor für Aufteilung des abbaubaren CSB in SS und XS => Annahme dass XS (wie bei kommunalem Abwasser etwa zu 50% partikulär => XS mit Faktor 2 aus X_{BSB5} berechnen)
- ² Annahme SNO=0 => Faulnisfähigkeit der Produktionsabwässer schließt NCB aus (siehe M753, S.44), in den üblichen Misch-Ausgleichsbecken liegen bereits z.T. anaerobe Verhältnisse vor (teilweise Belüftung um Übersäuerung zu vermeiden)
- ³ Annahme SALK=0 => ggf. bei unbelüfteten Misch-Ausgleichsbecken Übersäuerung => geringe Pufferkapazität (KS_{4,3} bzw SALK) => SALK zur Sicherheit auf 0 setzen

Beispiel geht von mechanischer Vorreinigung aus (Siebung) => keine Vorklärvirkung in kommunaler Kläranlage auf das industrielle Abwasser modelliert (Einleitung in Belebung)

Abbildung 1.56: Schema zur Fraktionierung des industriellen Abwasserzulaufes

Um mittlere Schlammbelastung und mittleres Schlammalter des BSM1 bzw. des VD-Modells bei den Simulationen mit industriellem Abwasseranteil den Simulationen mit rein kommunalem Abwasser (Abschnitt 1.3.3) anzugleichen, wird die mittlere CSB-Fracht der jeweiligen Zuläufe in Übereinstimmung gebracht. Deshalb wird der mittlere kommunale Zulauf entsprechend dem Anteil der zugeführten CSB-Fracht des industriellen Teilstromes am gesamten CSB im Zulauf um folgenden Faktor abgemindert:

$$f = 1 - f_{CSB_{ind}} = 1 - \frac{Q_{ind} \cdot CSB_{ind}}{Q_{TW} \cdot CSB_{TW}} = 1 - \frac{790 \text{ m}^3 / \text{d} \cdot 3,638 \text{ kg} / \text{m}^3}{18446 \text{ m}^3 / \text{d} \cdot 0,3813 \text{ kg} / \text{m}^3} = 1 - 0,4086 = 0,5914$$

Gl. 1.14

mit

| | | |
|---------------------|---|-------------------------|
| f | Abminderungsfaktor für TW-Zulaufmenge des Original-BSM1 | [-] |
| fCSB _{ind} | Anteil industrielle CSB-Fracht am gesamten CSB | [-] |
| Q _{ind} | Zulaufmenge Industrieabwasser | [m ³ /d] |
| CSB _{ind} | CSB Industrieabwasser | [g CSB/m ³] |
| Q _{TW} | TW-Zulaufmenge des Original-BSM1 | [m ³ /d] |
| CSB _{TW} | TW-CSB des Original-BSM1 | [g CSB/m ³] |

Damit ergeben sich durch den industriellen Einfluss eine höhere CSB-Konzentration und - eine unveränderte CSB-Fracht vorausgesetzt - eine geringere Zulaufmenge. Deshalb mussten auch die Volumenströme für den Rücklaufschlamm und die interne Rezirkulation abgemindert werden, damit das für die Reinigungsprozesse maßgebliche Rücklauf- und interne Rückführverhältnis im Mittel gegenüber den Simulationen mit rein kommunalem Zulauf unverändert bleiben. Dafür wurde folgender Faktor errechnet:

$$f_R = \frac{Q_{ind} + f \cdot Q_{TW}}{Q_{TW}} = \frac{790m^3/d + 0,5914 \cdot 18446m^3/d}{18446m^3/d} = 0,6342 \quad \text{Gl. 1.15}$$

mit

| | | |
|----------------|--|-----|
| f _R | Abminderungsfaktor für Rücklaufschlamm und interne Rezirkulation | [-] |
|----------------|--|-----|

Die im BSM1 eingestellte Menge für den Überschussschlammabzug wurde beibehalten, weil die Schlammproduktion infolge der unveränderten mittleren CSB-Fracht im Mittel etwa gleich bleibt. In Tabelle 1.15 sind die am BSM1 bzw. VD-Modell (vgl. Abschnitte 1.3.2 und 1.3.3) zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil vorgenommenen Änderungen zusammengefasst:

| Komponente/ Einstellung | VD-Modell - Simulation mit kommunalem Abwasser | VD-Modell - Simulation mit kommu- nalem und industriellem Abwasser |
|----------------------------|---|---|
| Zulauf | Mittlere Zulaufmenge: 18 446 m ³ /d | Mittlere Zulaufmenge: 11 698 m ³ /d (40,86 % industrieller Anteil bzgl. CSB-Fracht => Abminderung des kommunalen Anteils auf 59,14 %) Separate Fraktionierung von kom- munalem und industriellem Zulauf |
| Interne Rezirkulation | Konstante Menge: 55 338 m ³ /d Mittleres internes Rückführverhältnis: 3 | Konstante Menge: 35 095 m ³ /d Mittleres internes Rückführverhältnis: 3 |
| Rücklaufschlamm | Konstante Menge: 18 446 m ³ /d Mittleres Rücklaufverhältnis: 1 | Konstante Menge: 11 698 m ³ /d Mittleres Rücklaufverhältnis: 1 |

Tabelle 1.15: Änderungen am VD-Modell zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil

Abbildung 1.57 zeigt die Konfiguration des zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil verwendeten VD-Modells.

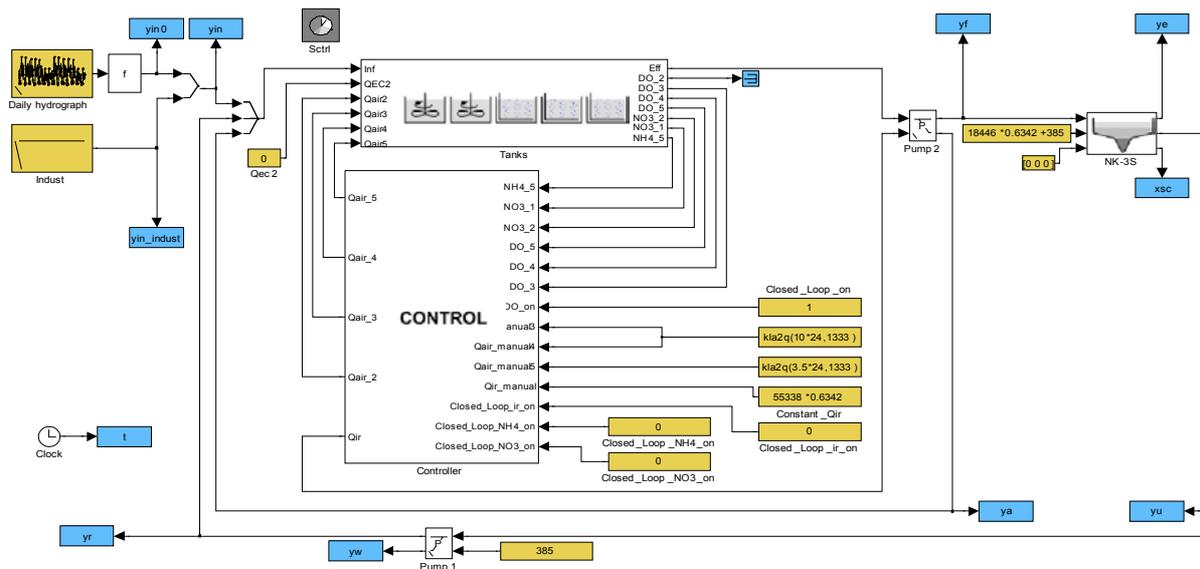


Abbildung 1.57: VD-Modell zur Simulation mit industriellem Abwasseranteil

1.3.5 Simulationen mit industriellem Abwasseranteil

Eine exakte Übernahme der Maßnahmen-Kombinationen MK2 und MK3 (siehe Abschnitt 1.2.2 und Tabelle 1.10) auf das VD-Modell ist aufgrund der Anlagenkonfiguration nicht möglich. Wegen der hohen Belastung der Anlage ist es, um eine hinreichende Nitrifikation zu erzielen, erforderlich, mindestens drei der fünf hintereinander geschalteten Becken zu belüften. Weil dann aber nur zwei Denitrifikationsbecken verfügbar sind, kann davon höchstens Becken 2 (gedrosselt) belüftet bzw. als Steuerstufe betrieben werden, während Becken 1 weiterhin ausschließlich zur Denitrifikation genutzt werden muss. Als weitere Variante kann auch das folgende Becken 3 als gedrosselt belüftete Steuerstufe betrachtet werden, indem der O_2 -Sollwert im Vergleich zur Nitrifikation deutlich abgesenkt wird und ggf. eine lastflexible Abschaltung der Belüftung (gemeinsam mit Becken 2) erfolgt. Somit ist eine prinzipielle Übertragbarkeit gegeben.

Zur Prüfung der Übertragbarkeit der entwickelten statischen und dynamischen Konzepte (siehe Tabelle 1.10) wurden mit dem VD-Modell und (wie in Abschnitt 1.3.4 beschrieben) beigemischt industriellen Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung Simulationsläufe mit folgenden Einstellungen durchgeführt:

- **Referenzsimulation:** entsprechend Original-BSM1, aber mit separat geregelterm O_2 -Gehalt in jedem Nitrifikationsbecken
- **Statisches Konzept 1:** zusätzlich kontinuierliche, gedrosselte Belüftung von Becken 2 (vergleichbar mit MK2/MK3 in Abschnitt 1.2.2, aber ohne Senkung der O_2 -Sollwerte)
- **Statisches Konzept 2:** zusätzlich kontinuierliche, gedrosselte Belüftung von Becken 2 und Drosselung der Belüftung in Becken 3 durch Senkung des O_2 -Sollwertes (vergleichbar mit MK2/MK3 in Abschnitt 1.2.2)
- **Dynamisches Konzept 1** ($NH_{4,ab}$ -Regler): überlagerte Regelung von NH_4-N im Ablauf Belebung für lastflexible Anpassung der O_2 -Sollwerte in den Becken 4 und 5, auf Basis des Statischen Konzeptes 2, d. h. mit gedrosselter Belüftung von Becken 2 und 3 (vgl. Abschnitt 1.2.3)
- **Dynamisches Konzept 2** ($NH_{4,ab}$ -Regler + automatische Umschaltung Steuerstufen): $NH_{4,ab}$ -Regler kombiniert mit automatischer Umschaltung für Abschalten der Steuerstufenbelüftung bei Überschreitung eines Grenzwertes für NO_3-N im Ablauf der Denitrifikation (Becken 1), auf Basis des Statischen Konzeptes 2 (vgl. Abschnitt 1.2.3)

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die zur Untersuchung der o. g. dynamischen Konzepte geänderten Modelleinstellungen im Vergleich mit der Referenzsimulation: Die entsprechenden Einstellungen für die Referenzsimulation und die statischen Konzepte wurden bereits im Abschnitt 1.3.3 mit Tabelle 1.12 dokumentiert.

| Größe | Dynamisches Konzept 1 | Dynamisches Konzept 2 |
|----------------------------------|---|--|
| Belüftung Steuerstufe (Becken 2) | gedrosselt (O_2 -Gehalt $\sim 0,5 \text{ g/m}^3$) | gedrosselt (O_2 -Gehalt $\sim 0,5 \text{ g/m}^3$), mit automatischer Umschaltung |
| O_2 -Sollwert Becken 3 | $0,5 \text{ g/m}^3$ | $0,5 \text{ g/m}^3$, mit automatischer Umschaltung |
| O_2 -Sollwert Becken 4 | Führung über NH_4 -N Ablauf Belebung | Führung über NH_4 -N Ablauf Belebung |
| O_2 -Sollwert Becken 5 | Führung über NH_4 -N Ablauf Belebung | Führung über NH_4 -N Ablauf Belebung |

Tabelle 1.16: Modelleinstellungen bei Prüfung der Übertragbarkeit dynamischer Konzepte

Simulation Statisches Konzept 1:

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen für das Statische Konzept 1 mit dem VD-Modell bei industriellem Abwasseranteil simulierte Zeitverläufe für NO_3 -N, NH_4 -N und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Lauf 2) im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1).

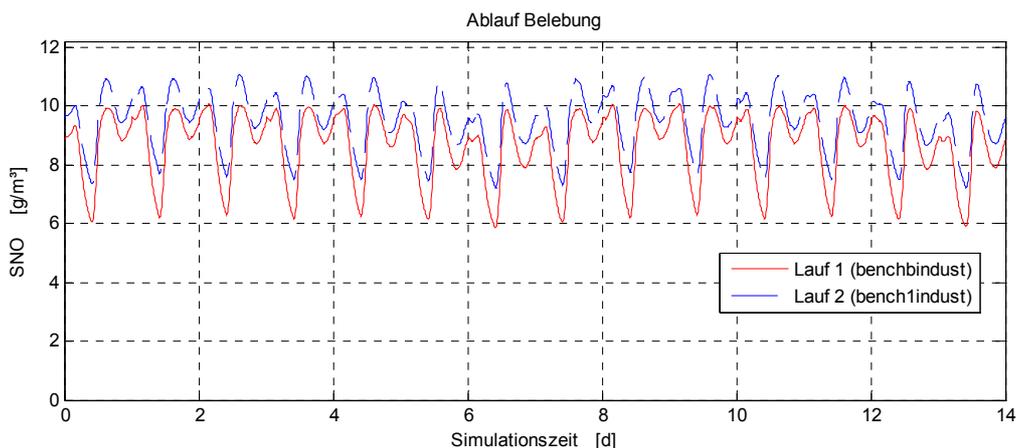


Abbildung 1.58: NO_3 -N Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

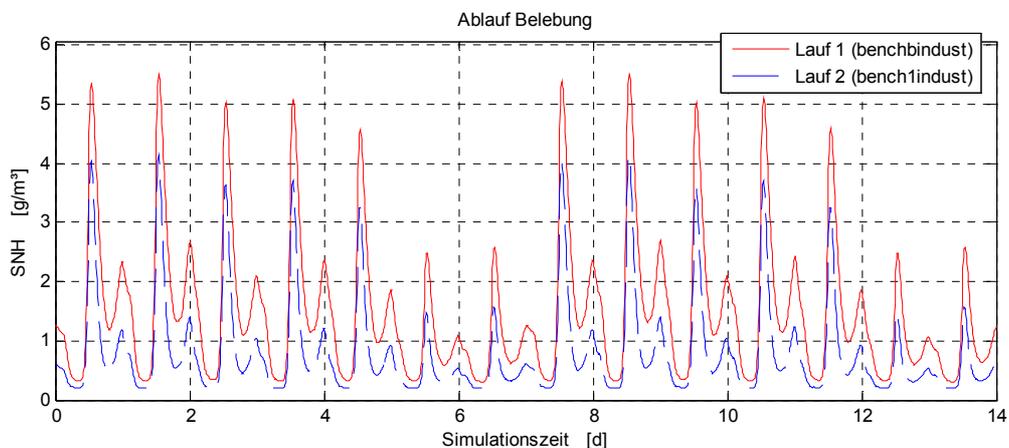


Abbildung 1.59: NH_4 -N Ablauf Belebung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

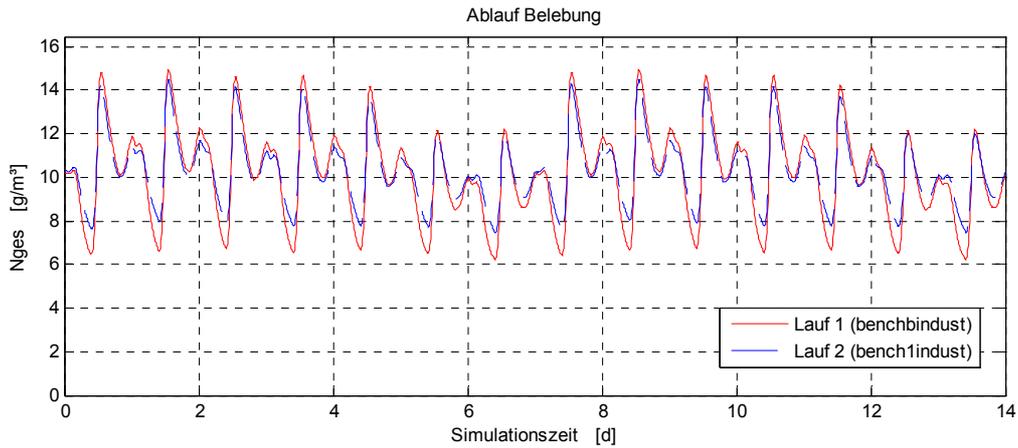


Abbildung 1.60: N_{ges} Ablauf Belegung (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

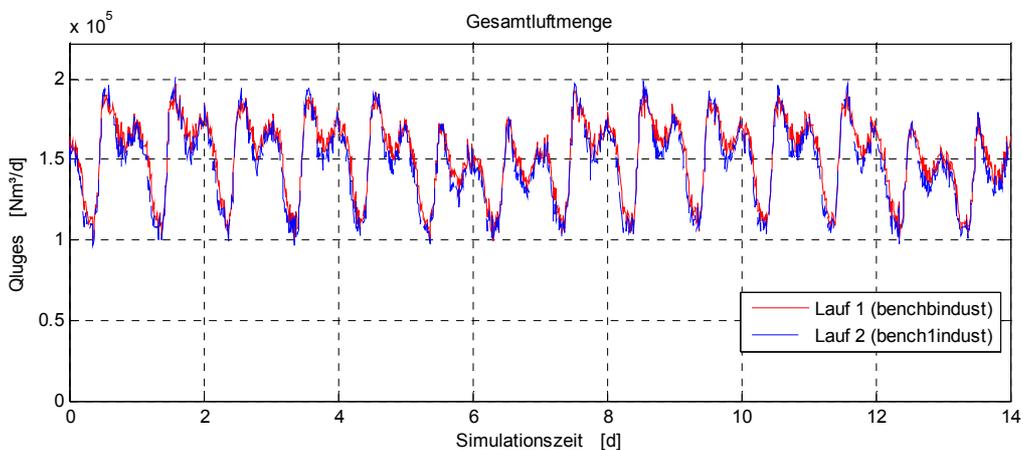


Abbildung 1.61: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sich eine kontinuierliche, aber gedrosselte Belüftung von Becken 2 sehr günstig auf die NH_4 -N-Ablaufkonzentration auswirkt, woraus in diesem Fall auch die Senkung der N_{ges} -Spitzen resultiert. Die eingesparte Luftmenge ist mit ca. 3% nur gering. Die Nitratkonzentration im Ablauf ist erhöht. Letzteres wird jedoch nur z. T. durch eine verringerte Denitrifikation infolge des im Vergleich zur Referenz geringeren anoxischen Volumens verursacht. Die verbesserte Nitrifikation führt zu einer gesteigerten Bildung von Nitrat, welches wieder in das vorgeschaltete Denitrifikationsbecken rückgeführt wird. Diese Zusammenhänge werden in den folgenden Profildarstellungen deutlich. Abbildung 1.62 veranschaulicht das über die Zeit gemittelte Profil der NO_3 -N-Konzentration über das Volumen der fünf in Reihe geschalteten Becken im Vergleich von Referenz (Lauf 1) und Statischem Konzept 1 (Lauf 2). Abbildung 1.63 zeigt das entsprechende Profil der NH_4 -N-Konzentration.

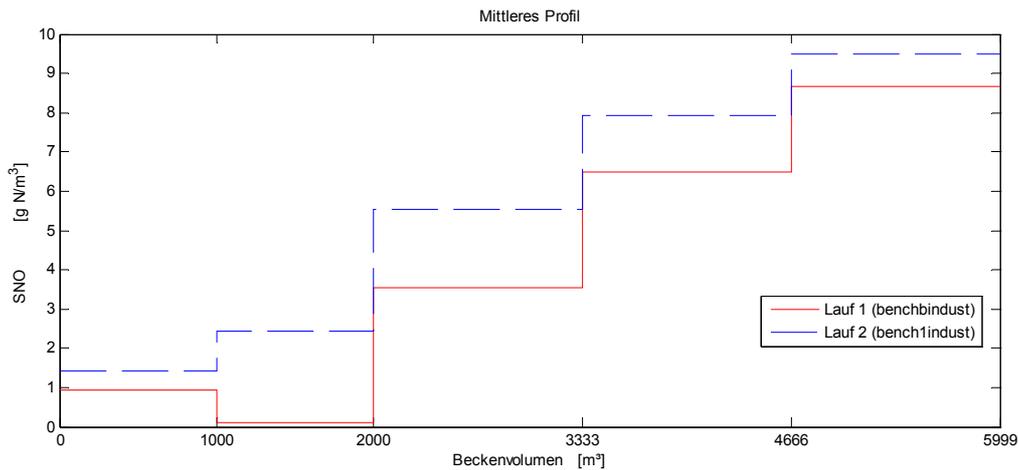


Abbildung 1.62: Mittleres Profil NO₃-N (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

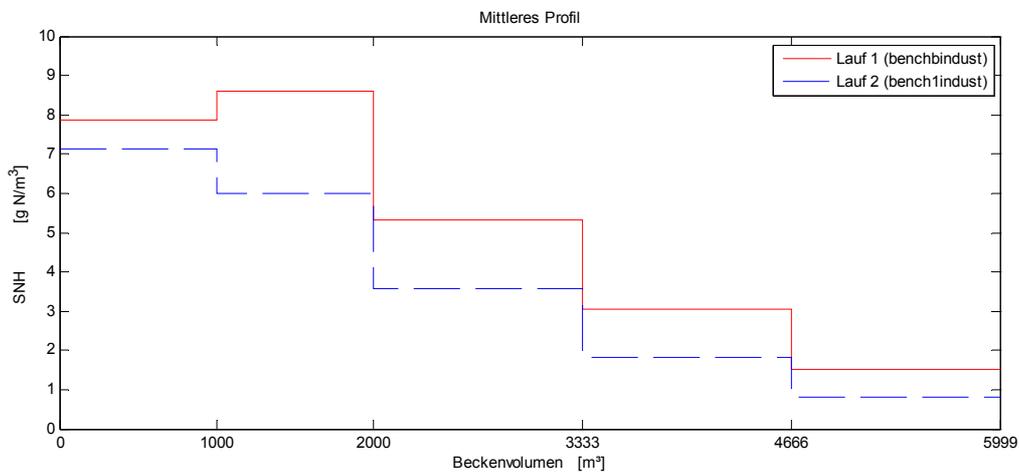


Abbildung 1.63: Mittleres Profil NH₄-N (Statisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Darin spiegelt sich die Situation des BSM1 bzw. des VD-Modells wider: Schon bei mittlerer Zulaufbelastung wird eine unvollständige Nitrifikation simuliert, was an den Ammoniumkonzentrationen im Ablauf der Belebung von -ausgenommen bei der nächtlichen Schwachlast mehr als 1 g/m³ bis hin zu den Tagesspitzen von > 5 g/m³ deutlich wird (siehe Abbildung 1.59). Durch das in diesem Beispiel mit Becken 2 zusätzlich belüftete Volumen wird NH₄-N im Ablauf der Belebung im Vergleich zur Referenz deutlich gesenkt, während NO₃-N entsprechend höher liegt und somit die mittlere N_{ges}-Konzentration im Wesentlichen gleich bleibt. Die hier durch den NH₄-N-Anteil hervorgerufenen N_{ges}-Spitzen können durch das Statische Konzept 1 sogar noch gesenkt werden (siehe Abbildung 1.60). In der folgenden Tabelle ist eine kurze zusammenfassende Auswertung dieser Simulation enthalten:

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Einsparung ca. 3 % |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitzen und Mittelwert reduziert um > 1 g/m ³ |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | Verlauf NO ₃ -N erhöht, N _{ges} -Mittelwert etwa gleich N _{ges} -Spitzen leicht gesenkt |
| Fazit | Wegen der verbesserten Nitrifikationsleistung, ohne N_{ges} im Ablauf zu erhöhen, ist das Konzept geeignet zur Verbesserung der Ablaufwerte, wobei gleichzeitig noch eine begrenzte Reduzierung des Luftverbrauches möglich ist. |

Tabelle 1.17: Kurzauswertung Statisches Konzept 1 (VD-Modell mit indust. Zulauf)

Simulation Statisches Konzept 2:

Die folgenden Abbildungen zeigen für das Statische Konzept 2 mit dem VD-Modell bei industriellem Abwasseranteil simulierte Zeitverläufe für $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und N_{ges} im Ablauf Belebung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belebung (Lauf 2) im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1).

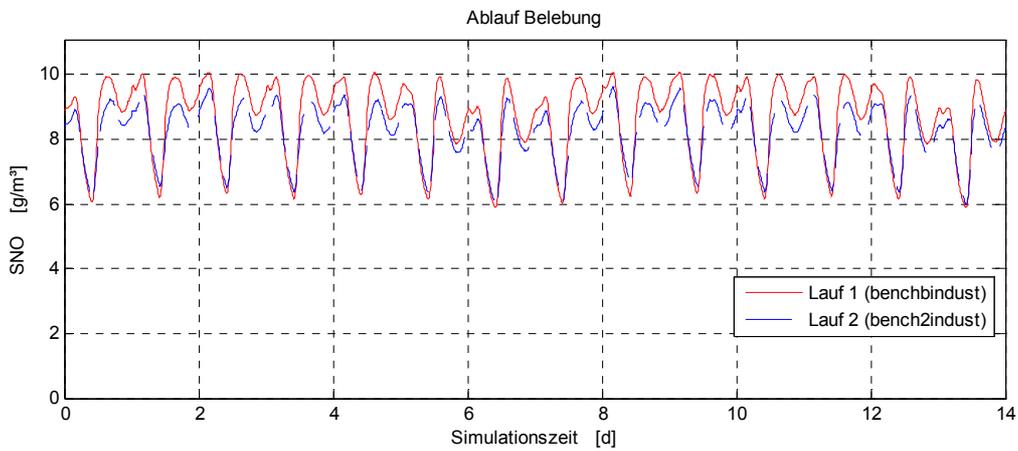


Abbildung 1.64: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

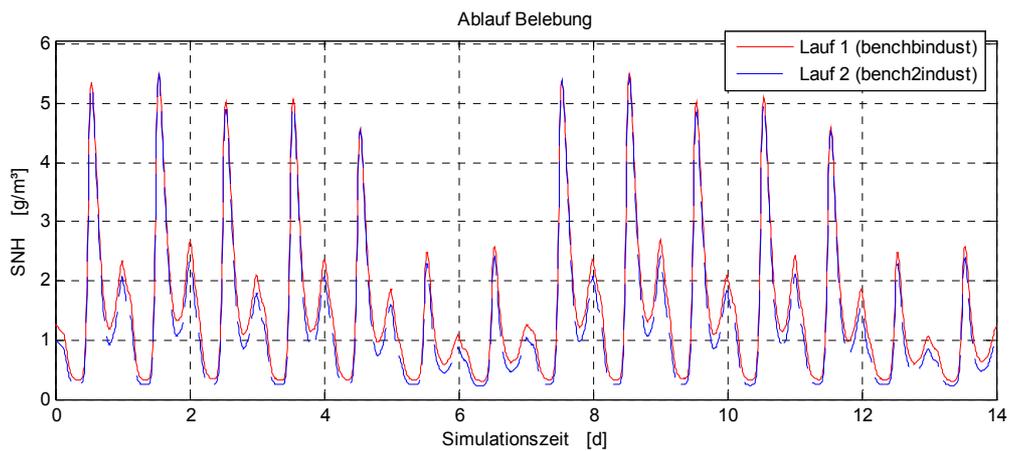


Abbildung 1.65: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

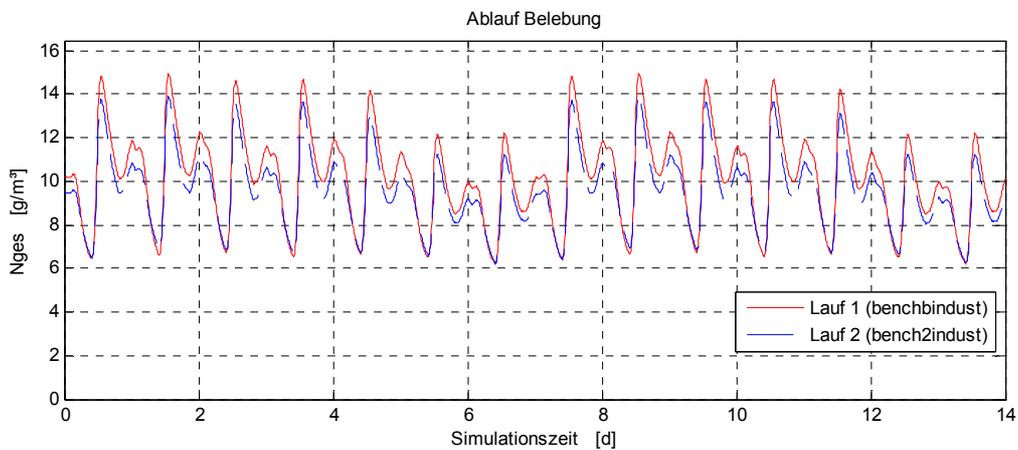


Abbildung 1.66: N_{ges} Ablauf Belebung (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

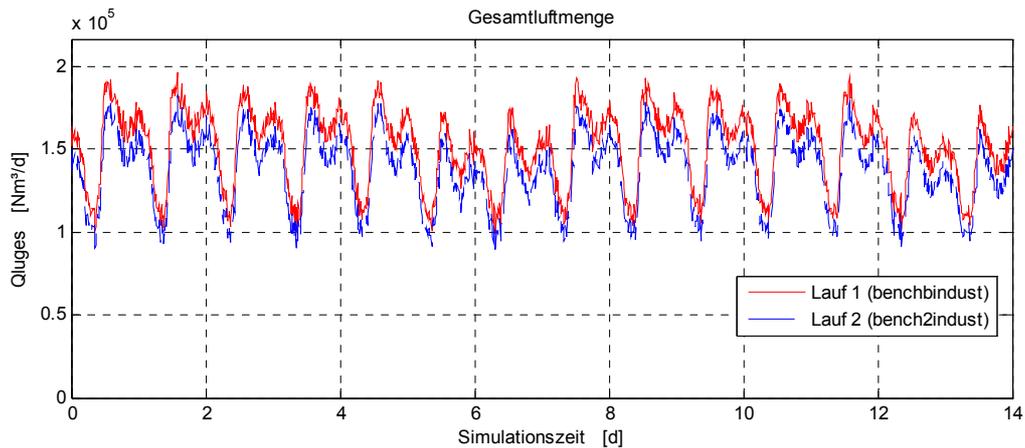


Abbildung 1.67: Gesamt-Luftverbrauch (Statisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Die dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass die gedrosselte Belüftung von zwei Volumenabschnitten (Becken 2 und 3) gegenüber der Referenzsimulation einen Rückgang des Luftverbrauchs von mehr als 9 % bei zumindest gleich bleibender Nitrifikationsleistung bewirkt. Durch den Effekt der simultanen Denitrifikation wird für diesen Lastfall auch die $\text{NO}_3\text{-N}$ - und damit die N_{ges} -Konzentration verringert. Dies kommt hier im Gegensatz zum oben geschilderten Statischen Konzept 1 zum Tragen, weil die Nitrifikation und damit die Nitratbildung durch den im Unterschied zum Statischen Konzept 1 geringeren Sauerstoffgehalt im Becken 3 nicht erhöht wird, sondern im Vergleich zur Referenz etwa gleich bleibt. Die folgende Tabelle zeigt die Kurzauswertung der Simulation des Statischen Konzeptes 2.

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Einsparung > 9 % |
| $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belebung | $\text{NH}_4\text{-N}$ -Verlauf geringfügig gesenkt |
| $\text{NO}_3\text{-N}$, N_{ges} Ablauf Belebung | $\text{NO}_3\text{-N}$ und N_{ges} (Mittelwerte und Spitzen) gesenkt |
| Fazit | Aufgrund verbesserter $\text{NO}_3\text{-N}$ und N_{ges}-Ablaufwerte und deutlicher reduziertem Luftverbrauch ist das Konzept gut geeignet. Es ermöglicht eine gleich bleibende Nitrifikationsleistung |

Tabelle 1.18: Kurzauswertung Statisches Konzept 2 (VD-Modell mit indust. Zulauf)

Eine Steigerung der Nitrifikationsleistung kann ggf. durch das folgende darauf aufbauende dynamische Konzept erzielt werden.

Simulation Dynamisches Konzept 1:

Für eine überlagerte Regelung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentration im Ablauf der Belebung ($\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regler) wurde im VD-Modell wie auch für die untersuchte Kaskadenanlage (siehe Abschnitt 1.2.3) ein P-Regler verwendet. Dieser Regler gibt den Sauerstoffsollwert für die beiden Folgeregler zur Regelung der Sauerstoffkonzentration in den Becken 4 und 5 vor. Entsprechend der angestrebten gedrosselten Belüftung wird davon unabhängig die O_2 -Konzentration im Becken 3 auf einen konstanten Sollwert von $0,5 \text{ g/m}^3$ geregelt (siehe Tabelle 1.16). Im Becken 2 wird diese O_2 -Konzentration im Mittel durch eine konstante Sauerstoffzufuhr erreicht. Die Parameter des $\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Reglers wurden an die infolge der deutlich größeren Belastung höheren $\text{NH}_4\text{-N}$ -Ablaufkonzentrationen des VD-Modells angepasst (siehe Kennlinie in Abbildung 1.68).

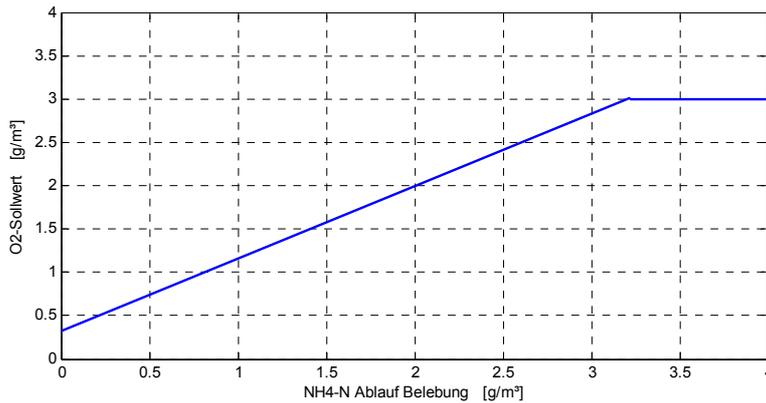


Abbildung 1.68: Kennlinie des $\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Reglers im VD-Modell

Abbildung 1.69 bis Abbildung 1.72 zeigen für das Dynamische Konzept 1 bei industriellem Abwasseranteil mit dem VD-Modell berechnete Zeitverläufe für $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ und N_{ges} im Ablauf der Belegung sowie den Gesamt-Luftverbrauch in der Belegung. Die Darstellung dieses Konzeptes (Lauf 3) erfolgt im Vergleich mit der Referenz (Lauf 1) und dem Statischen Konzept 2 (Lauf 2). Abbildung 1.73 zeigt am Beispiel von Becken 5 den infolge der $\text{NH}_{4,\text{ab}}$ -Regelung lastabhängigen Verlauf der O_2 -Konzentration (Lauf 2) im Vergleich zur Referenz (Lauf 1).

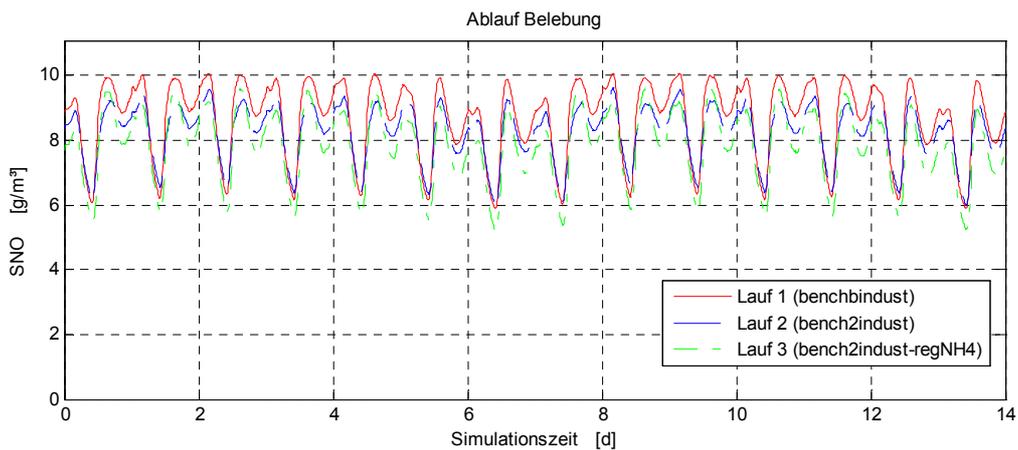


Abbildung 1.69: $\text{NO}_3\text{-N}$ Ablauf Belegung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

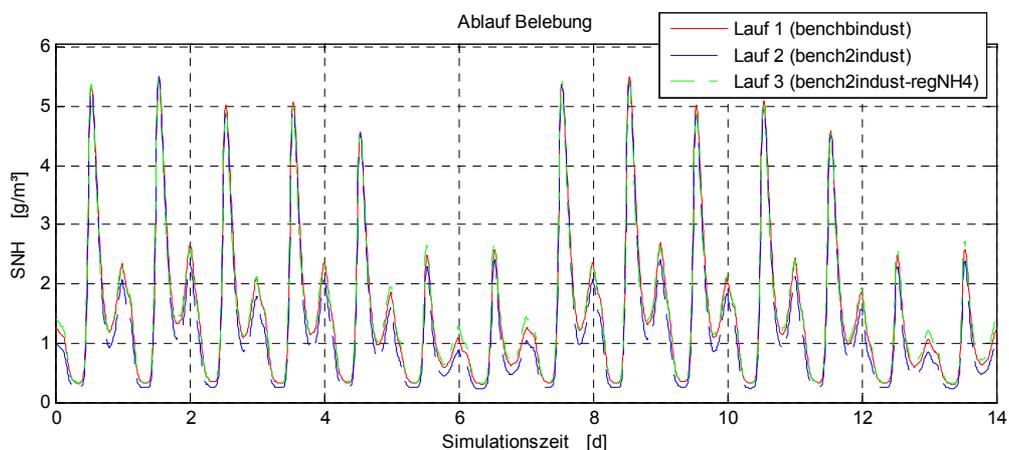


Abbildung 1.70: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belegung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

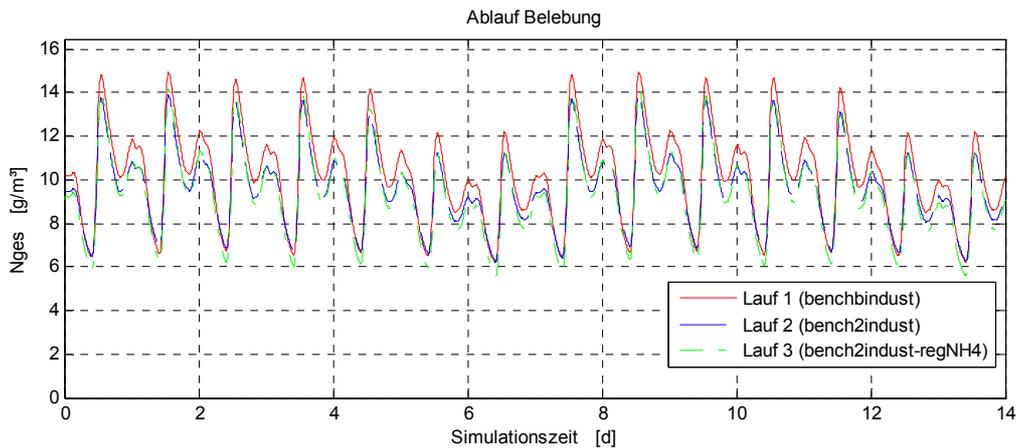


Abbildung 1.71: N_{ges} Ablauf Belegung (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

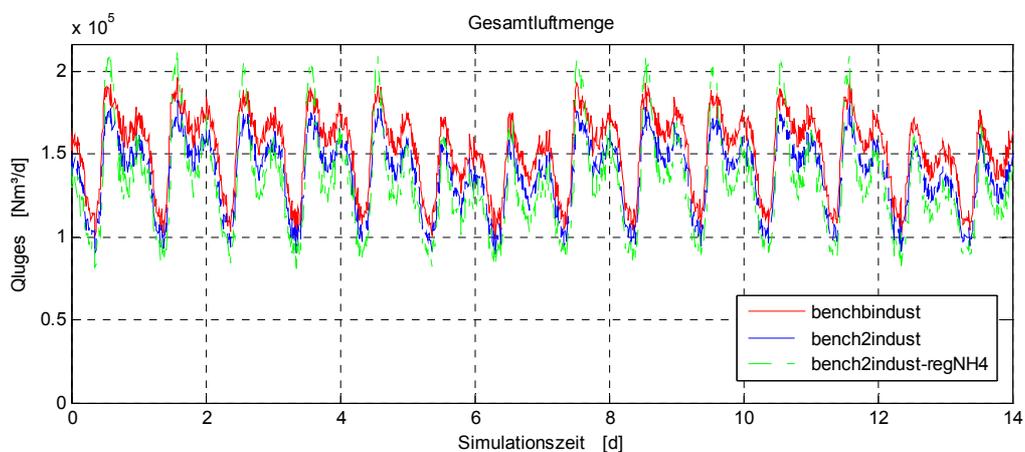


Abbildung 1.72: Gesamt-Luftverbrauch (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

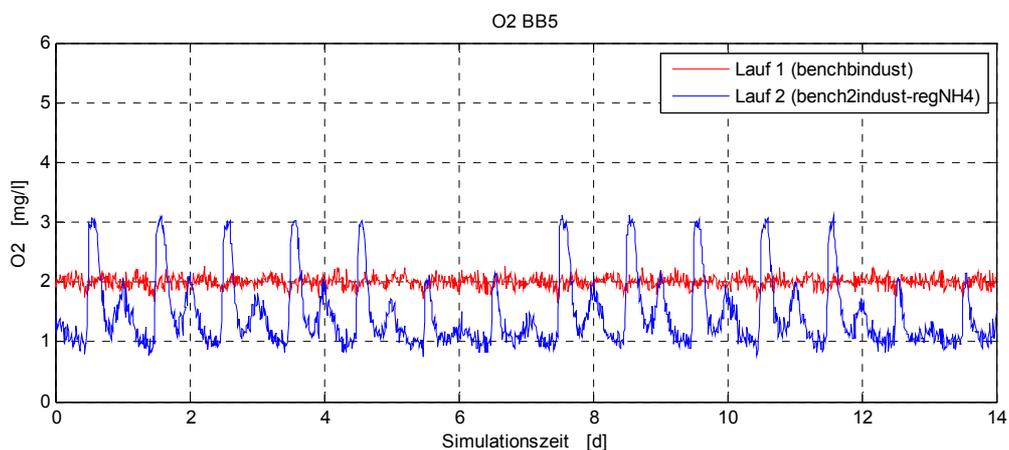


Abbildung 1.73: O_2 -Gehalt Becken 5 (Dynamisches Konzept 1, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Die $NH_{4,ab}$ -Regelung bewirkt im Mittel deutlich geringere O_2 -Konzentrationen in den beiden hinteren Becken und damit einen Rückgang des Luftverbrauchs von 13 % in Bezug auf die Referenz; bzw. von 4 % gegenüber dem Statischen Konzept 2. Die Höhe der Nitrifikantenkonzentration in der Belegung bleibt infolge des zusätzlichen belüfteten Volumens (Becken 2) gegenüber der Referenz erhalten. Während der Belastungsspitzen werden die O_2 -Konzentrationen und damit die Nitrifikationsleistung hinreichend schnell erhöht. So gelingt es trotz der geringeren mittleren O_2 -Konzentration, die NH_4 -N-Ablaufwerte im Bereich der Referenz bzw. des Statischen Konzeptes 2 zu halten. Besonders in Schwachlast-Zeiten, d. h. wenn der $NH_{4,ab}$ -Regler geringe O_2 -Sollwerte vorgibt, wird die NO_3 -N- und auch die N_{ges} -

Konzentration im Ablauf gegenüber der Referenzsimulation gesenkt. Während der Belastungsspitzen liegt Nitrat im Ablauf verglichen mit dem Statischen Konzept 2 etwas höher. Dies wirkt sich aber nicht auf die N_{ges} -Spitzen im Ablauf der Belebung aus, weil diese hier hauptsächlich aus NH_4 -N resultieren. Die folgende Tabelle zeigt eine kurze zusammenfassende Auswertung der Simulation des Dynamischen Konzeptes 1.

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--------------------------------------|---|
| Belüftung | Einsparung 13 % (4 % im Vergleich zum Statischen Konzept 2) |
| NH_4 -N Ablauf Belebung | NH_4 -N-Verlauf etwa wie bei Referenz und ggü. Statischem Konzept 2 geringfügig erhöht |
| NO_3 -N, N_{ges} Ablauf Belebung | NO_3 -N und N_{ges} (Mittelwerte und Spitzen) im Vergleich zur Referenz gesenkt und bei Schwachlast auch im Vergleich zum Statischen Konzept 2 geringer |
| Fazit | Aufgrund deutlich reduzierten Luftverbrauchs bei Erhalt der Nitrifikationsleistung ist das Konzept gut geeignet. Es ermöglicht u. U. auch verbesserte NO_3-N und N_{ges}-Ablaufwerte |

Tabelle 1.19: Kurzauswertung Dynamisches Konzept 1 (VD-Modell mit indust. Zulauf)

Natürlich ist es durch eine entsprechende Parametrierung des $NH_{4,ab}$ -Reglers möglich, die Nitrifikationsleistung zu steigern, was allerdings die hier simulierte Einsparung an Belüftungsenergie schmälert. An dieser Stelle bleibt noch anzumerken, dass die Simulation einer entsprechenden $NH_{4,ab}$ -Regelung in den drei Nitrifikationsbecken (Becken 3 bis 5) bei gedrosselt belüftetem Becken 2 zwar gegenüber der Referenz nur eine Reduzierung der Luftmenge von ca. 11 % ergeben hat, aber damit deutlich besser als das dieser Strategie zugrunde liegende Statische Konzept 1 ist (vgl. Tabelle 1.17). Ursache hierfür ist, dass durch eine Vergrößerung des aeroben Volumens die Nitrifikationsleistung verbessert wird, was wiederum die Effektivität der $NH_{4,ab}$ -Regelung steigert. Denn erst wenn der mittlere Verlauf der NH_4 -N-Konzentration im Ablauf der Belebung ausreichend gering ist, kann mit dieser Regelung infolge der dann im Mittel kleineren Sauerstoffsollwerte auch Belüftungsenergie eingespart werden.

Simulation Dynamisches Konzept 2:

Das Dynamische Konzept 2 (automatische Umschaltung Steuerstufen) wurde im VD-Modell ebenfalls entsprechend der untersuchten Kaskadenanlage (siehe Abschnitt 1.2.3) implementiert. In diesem Beispiel ist das Potenzial für eine Senkung der N_{ges} - und NO_3 -N-Konzentrationen im Ablauf der Belebung gering, weil sich infolge des günstigeren TKN : CSB-Verhältnisses des VD-Modells mit industriellem Abwasseranteil niedrige NO_3 -N-Gehalte in der Denitrifikation (Becken 1) einstellen. Für qualitative Betrachtungen wurden dennoch Testsimulationen durchgeführt, wobei die Parameter an die geringeren NO_3 -N-Konzentrationen in der Denitrifikation angepasst wurden (siehe Kennlinie in Abbildung 1.74).

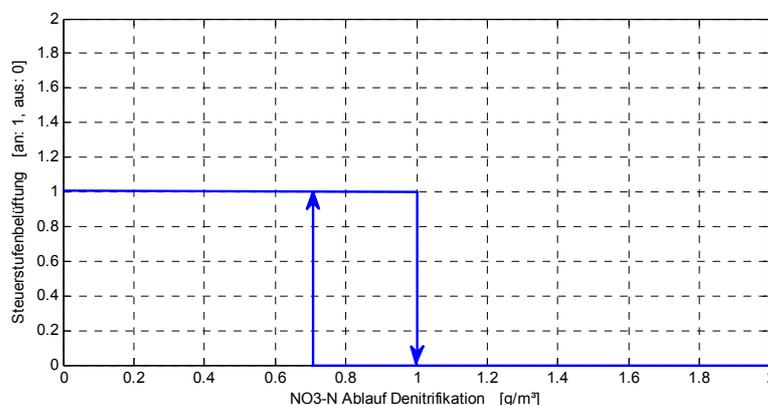


Abbildung 1.74: Kennlinie automatische Umschaltung Steuerstufen im VD-Modell

Abbildung 1.75 zeigt den infolge der automatischen Umschaltung lastabhängig simulierten Verlauf der O_2 -Konzentration (Lauf 2) im Becken 2, welches hier zusammen mit Becken 3 als Steuerstufe (Wechsel gedrosselte Belüftung/ohne Belüftung) betrieben wird im Vergleich zum Dynamischen Konzept 1 (Lauf 1). In Abbildung 1.76 ist die dadurch geregelte NO_3 -N-Konzentration im Ablauf der Denitrifikation (Becken 1) dargestellt.

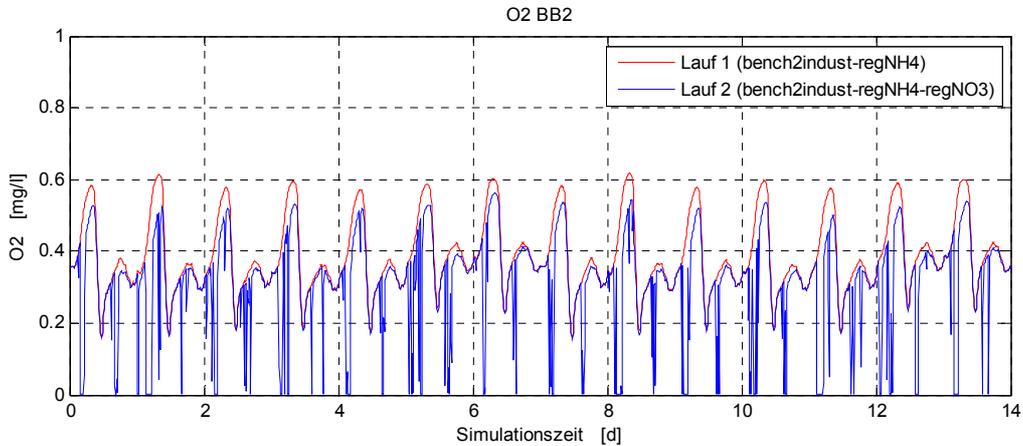


Abbildung 1.75: O_2 -Gehalt Becken 2 (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

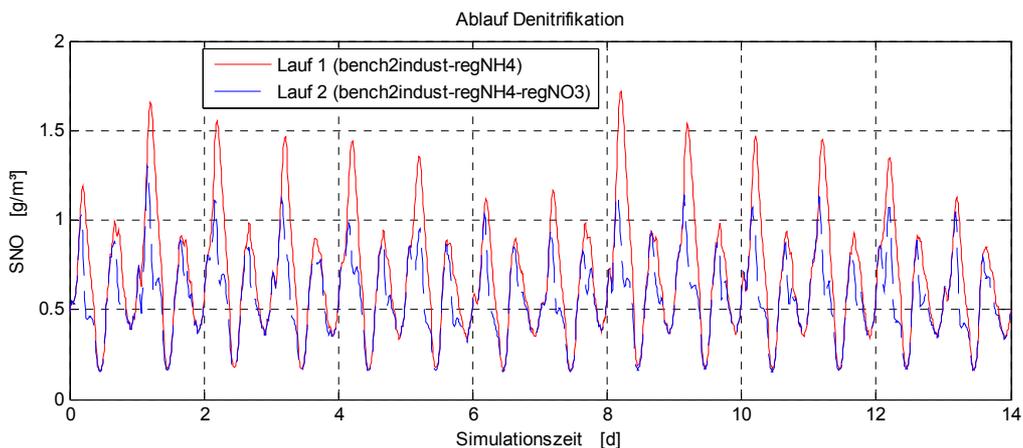


Abbildung 1.76: NO_3 -N Denitrifikation (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Die folgenden Abbildungen zeigen für das Dynamische Konzept 2 (Lauf 2) bei industriellem Abwasseranteil mit dem VD-Modell berechnete Zeitverläufe im Vergleich mit den zuvor beschriebenen Simulationsergebnissen des Dynamischen Konzeptes 1 (Lauf 1).

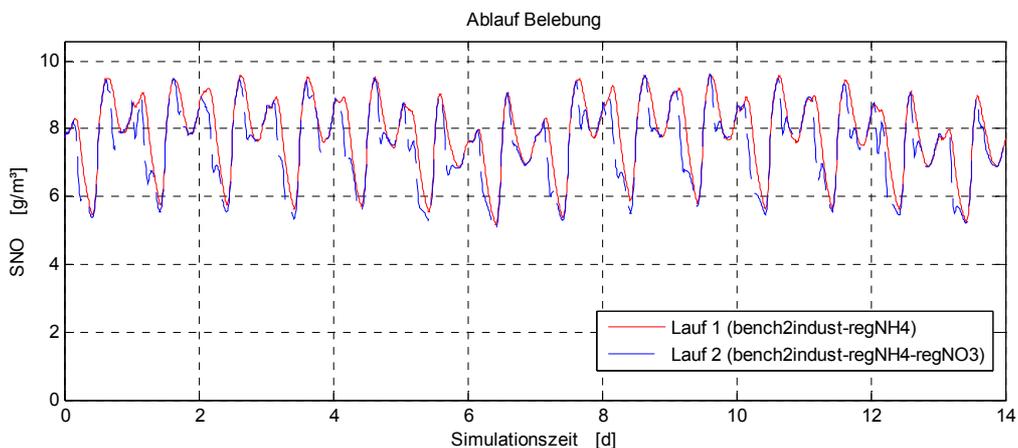


Abbildung 1.77: NO_3 -N Ablauf Belebung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

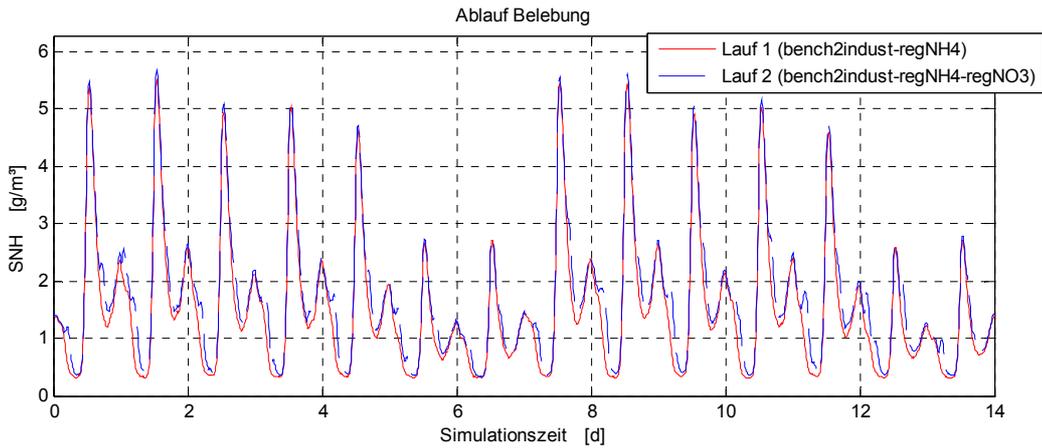


Abbildung 1.78: $\text{NH}_4\text{-N}$ Ablauf Belegung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

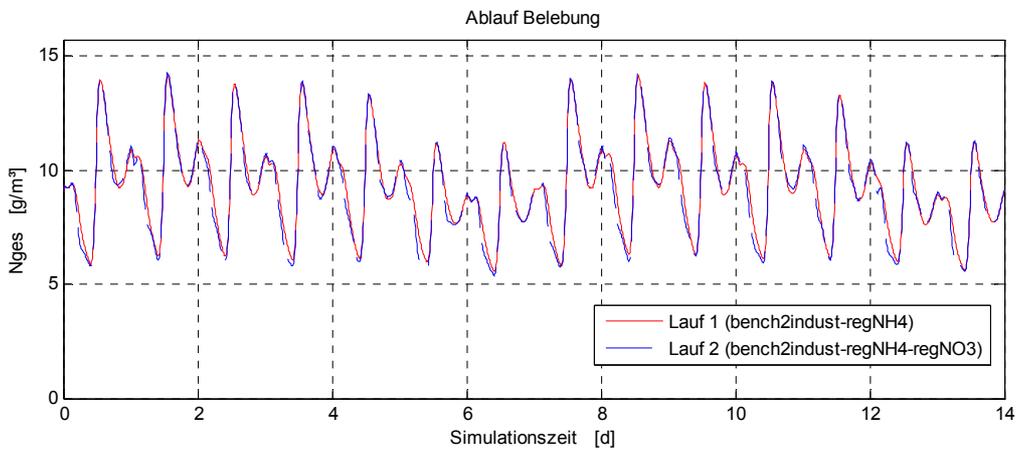


Abbildung 1.79: N_{ges} Ablauf Belegung (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

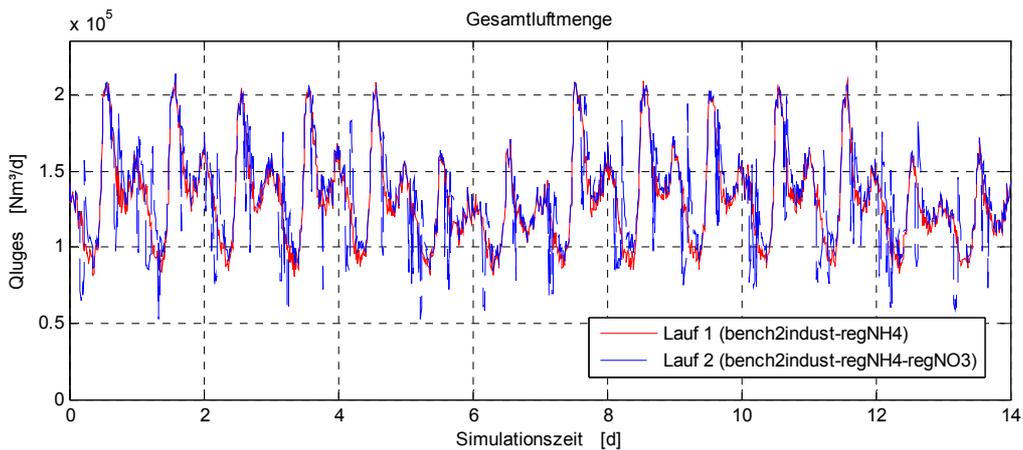


Abbildung 1.80: Gesamt-Luftverbrauch (Dynamisches Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Eine Senkung von N_{ges} ist mit dem Dynamischen Konzept 2 grundsätzlich nur möglich, wenn die Nitrifikation weitgehend vollständig verläuft. Dies ist im gezeigten Beispiel nur während der Schwachlastphasen ansatzweise zu erkennen (z. B. bei $\text{NH}_4\text{-N}$ -Konzentrationen im Ablauf von $< 1 \text{ g/m}^3$). Andernfalls wird eine durch Abschalten der Belüftung in den Steuerstufen verbesserte Denitrifikation mit entsprechenden Einbußen an Nitrifikationsleistung erkauft.

Die folgende Tabelle zeigt eine kurze zusammenfassende Auswertung der Simulation des Dynamischen Konzeptes 2 im Vergleich zum Dynamischen Konzept 1.

| Bewertungskriterien | Ergebnisse |
|--|---|
| Belüftung | Luftverbrauch um ca. 1% erhöht (wegen temporärer Abschaltung der Steuerstufenbelüftung und etwas höheren O ₂ -Konzentrationen in den Nitrifikationsbecken) |
| NH ₄ -N Ablauf Belebung | NH ₄ -N-Spitzen kaum erhöht, NH ₄ -N bei Schwachlast leicht erhöht |
| NO ₃ -N, N _{ges} Ablauf Belebung | NO ₃ -N-Spitzen kaum gesenkt NO ₃ -N bei Schwachlast leicht gesenkt N _{ges} nur bei Schwachlast geringfügig gesenkt |
| Fazit | Aufgrund kaum erzielter Effekte ist das Konzept in dieser Form für dieses Beispiel nicht geeignet und muss hierfür ggf. modifiziert werden (siehe unten). |

Tabelle 1.20: Kurzauswertung Dynamisches Konzept 2 (VD-Modell mit indust. Zulauf)

In diesem Beispiel ist das Potenzial einer automatischen Umschaltung der Steuerstufen für eine Senkung der NO₃-N-Konzentration von vornherein gering, wie aus Abbildung 1.76 ersichtlich wird. Die im Ablauf der Denitrifikation (bzw. in Becken 1) simulierten Nitrat-Konzentrationen schwanken bei dieser Lastsituation - mit günstigem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf - zwischen ca. 0,2 und 1,5 g/m³ und sind damit relativ gering. Bei höherem Nitratgehalt in der Denitrifikation, der hier z. B. durch eine erhöhte interne Rezirkulation herbeigeführt werden kann, ist das Potenzial dieses Konzeptes entsprechend größer.

Obwohl durch die automatische Umschaltung eine Reduzierung der Nitratspitzen in der Denitrifikation um ca. 0,5 g/m³ gelingt, ist eine entsprechende Senkung der NO₃-N-Spitzen im Ablauf der Belebung (siehe Abbildung 1.77 und Abbildung 1.79) nicht zu verzeichnen. Lediglich bei Schwachlast wurde hier eine leichte Reduzierung simuliert. Grund hierfür ist, die beim Vergleich von Abbildung 1.76 und Abbildung 1.77 erkennbare zeitliche Verschiebung der NO₃-N-Spitzen in der Denitrifikation und im Ablauf der Belebung. Die im Ablauf der Belebung simulierten NO₃-N-Spitzen werden durch den Abwasserzulauf mit seinen TKN-Frachtspitzen und der deshalb erhöhten Nitratbildung in den Nitrifikationsbecken verursacht. Der Nitratgehalt in der Denitrifikation ist zum Beginn der Frachtstöße noch sehr gering (< 1 g/m³). Die NO₃-N-Spitzen in der Denitrifikation werden hier durch Rezirkulation des Ablaufes hervorgerufen und treten somit verzögert auf. Die Abschaltung der Steuerstufenbelüftung wird bei den für diesen Lastfall und die betrachtete Anlagenkonfiguration simulierten schnell ansteigenden, kurzen NO₃-N-Ablaufspitzen erst wirksam, wenn die Spitzen bereits wieder abnehmen (siehe Abbildung 1.76).

Die Nitratspitzen im Ablauf der Belebung beeinflussen durch die Rezirkulation als wesentliche Störgröße die automatische Umschaltung der Steuerstufen entsprechend der NO₃-N-Konzentration im Ablauf der Denitrifikation. Im Unterschied zur Implementierung für die Kaskadenanlage (siehe Abschnitt 1.2.3) kann hier auch von einer Regelung (Zweipunktregler) gesprochen werden. Für das betrachtete VD-Modell ist es sinnvoll, diesen Zweipunktregler zur automatischen Umschaltung der Steuerstufen so zu modifizieren, dass anstelle der Nitratkonzentration im Denitrifikationsbecken, der Nitratgehalt im Ablauf der Belebung als Regelgröße dient. Für eine dementsprechende Modifikation wurde deshalb eine Testsimulation durchgeführt, wobei die übrigen Einstellungen dem o. g. Dynamischen Konzept 2 entsprechen. Abbildung 1.81 zeigt exemplarisch den infolge der modifizierten automatischen Umschaltung lastabhängig simulierten Verlauf der O₂-Konzentration (Lauf 2) im Becken 2 im Vergleich zum Dynamischen Konzept 1 (Lauf 1). In Abbildung 1.82 ist die dadurch geregelte NO₃-N-Konzentration im Ablauf der Belebung dargestellt.

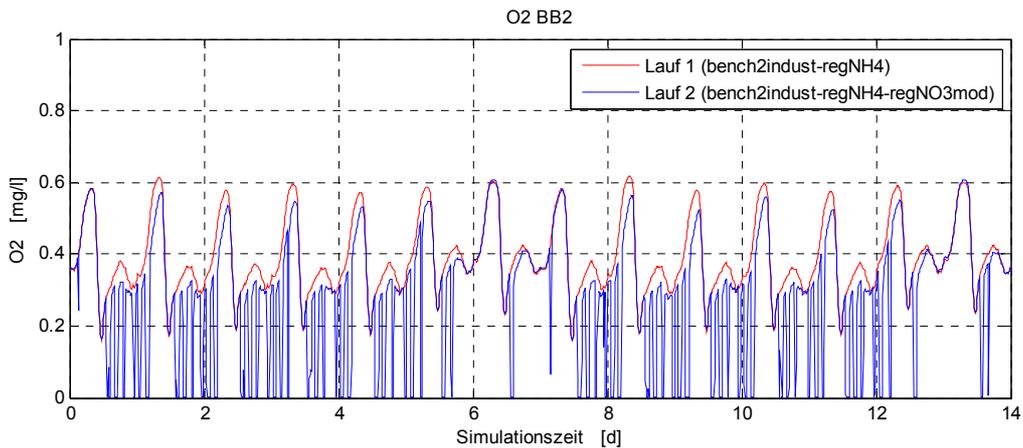


Abbildung 1.81: O₂-Gehalt Becken 2 (modif. Dynam. Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

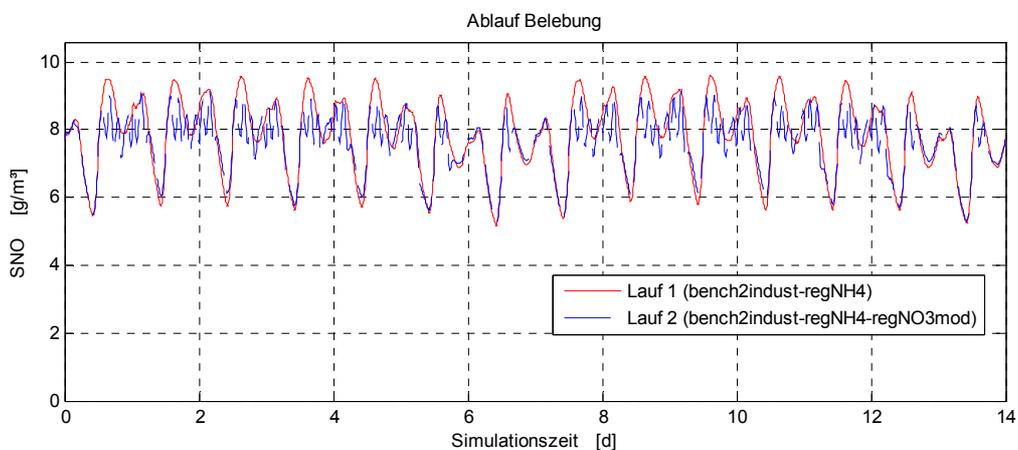


Abbildung 1.82: NO₃-N Ablauf Belebung (modif. Dynam. Konzept 2, VD-Modell mit indust. Zulauf)

Es ist zu erkennen, dass mit der Regelgröße Nitrat im Ablauf Belebung ein im Vergleich zum Messort Ablauf Denitrifikation (vgl. Abbildung 1.75 und Abbildung 1.76), früheres Abschalten der Belüftung von Becken 2 erfolgt. Somit gelingt auch im Unterschied zum zuvor beschriebenen Konzept eine Reduzierung der Nitrat-Spitzen im Ablauf der Belebung. Diese Reduzierung kann auch bei dem modifizierten Dynamischen Konzept 2 aufgrund des generell sehr geringen NO₃-N-Gehaltes in der Denitrifikation nur gering ausfallen, und es ist aufgrund der begrenzten Nitrifikationsleistung keine Reduzierung der N_{ges}-Ablaufspitzen möglich.

Im Rahmen von Simulationsstudien für Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation können die Anwendbarkeit der hier beschriebenen automatischen Umschaltung der Steuerstufen und/oder ggf. mögliche Modifikationen detaillierter untersucht werden.

1.3.6 Auswertung zur Prüfung der Übertragbarkeit

Die am Beispiel des VD-Modells durchgeführten Untersuchungen haben eine Übertragbarkeit der in diesem Projekt entwickelten statischen und dynamischen Konzepte zur optimierten Belüftung auf Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation bestätigt und gleichzeitig auch erforderliche Rahmenbedingungen für deren Anwendung aufgezeigt. Anwendbarkeit und Effektivität der Konzepte hängen stark von der Auslastung der Kläranlage und von der Beschaffenheit des Abwasserzulaufes, insbesondere vom TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf, ab. Grundsätzlich hat sich in diesem Zusammenhang Folgendes herausgestellt:

- hohe Effektivität der Konzepte bei einer für den Betrieb kommunaler Kläranlagen mit Nitrifikation und Denitrifikation **in Deutschland üblichen mäßigen Belastung** von im Mittel z. B.: CSB-Schlammbelastung = 0,1...0,2 g CSB/g TS/d, Gesamt-Schlammalter = 10...25 d, TKN : CSB im Zulauf Belebung $\approx 1 : 9$, $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf Belebung $< 1 \text{ g/m}^3$
 \Rightarrow wird durch das Modell der Beispielanlage (Klärwerk Magdeburg/Gerwisch) beschrieben
- bei einer generell überdurchschnittlich **hohen Belastung** der Kläranlage (sowohl CSB- als auch TKN-Fracht erhöht), d. h. im Mittel z. B.: CSB-Schlammbelastung = 0,3 g CSB/g TS/d, Gesamt-Schlammalter $< 10 \text{ d}$, $\text{NH}_4\text{-N}$ im Ablauf Belebung $> 1 \text{ g/m}^3$, verändern sich die Auswirkungen der Konzepte (z. B. wird bei zusätzlichem belüfteten Volumen deutlich mehr nitrifiziert und der Luftverbrauch entsprechend höher)
 \Rightarrow wird durch das VD-Modell mit Original-BSM1-Trockenwetterzulauf beschrieben, für deutsche Verhältnisse eher untypisch
- bei einer generell überdurchschnittlich **hohen TKN-Belastung** der Kläranlage und geringer Denitrifikationskapazität, d. h. hohes TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf zur Belebung (z. B. $1 : 7$) und geringes Denitrifikationsvolumen ($\text{NO}_3\text{-N}$ bereits im Ablauf Denitrifikation erhöht), ist die Anwendbarkeit der Konzepte eingeschränkt, weil mit einer deutlichen Erhöhung von N_{ges} im Ablauf gerechnet werden kann
 \Rightarrow trifft ebenfalls auf das VD-Modell mit Original-BSM1-Trockenwetterzulauf zu
- eine generell überdurchschnittlich **hohe CSB-Belastung** der Kläranlage (mit ausreichendem leicht abbaubaren Anteil) und einer ausreichenden Denitrifikationskapazität, d. h. niedriges oder mäßiges TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf zur Belebung und genügend Denitrifikationsvolumen wirkt sich günstig auf die Anwendbarkeit der Konzepte aus (Senkung von Luftverbrauch sowie $\text{NH}_4\text{-N}$ und u. U. auch N_{ges} im Ablauf Belebung)
 \Rightarrow wird hier durch das VD-Modell mit industriellem Abwasseranteil aus der kartoffelverarbeitenden Industrie beschrieben

Das BSM1 bildet eine hoch- bzw. schon überlastete Belebtschlammkläranlage ab. Ist die Kapazität einer Anlage zu sehr limitiert, ist auch das Potenzial einer Anwendung von Steuerungen und Regelungen begrenzt. MSR-Konzepte sollten einen Kompromiss zwischen Qualität der Ablaufwerte und Betriebskosten anstreben. Um jedoch die Leistung einer sehr hoch belasteten Kläranlage zu steigern, ist ein höherer Energieeinsatz erforderlich [Jep07].

Die o. g. Aussagen zur Übertragbarkeit gelten sowohl für Kläranlagen mit vorgeschalteter als auch mit Kaskadendenitrifikation. Eine differenzierte Betrachtung ist bei einer Implementierung der vorgeschlagenen automatischen Umschaltung der Steuerstufen erforderlich. Hier hat sich speziell für die vorgeschaltete Denitrifikation gezeigt, dass infolge der internen Rezirkulation eine signifikante und zeitverzögerte Beeinflussung von $\text{NO}_3\text{-N}$ in der Denitrifikation erfolgt und somit auch die direkte Nutzung einer Online-Messung von $\text{NO}_3\text{-N}$ im Ablauf der Belebung als Regelgröße zielführend sein kann.

Die Anwendung der Konzepte auf kommunalen Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation oder Kaskadendenitrifikation ist also grundsätzlich möglich. Die Übertragbarkeit auf Kläranlagen mit überdurchschnittlich hoher Stickstoffbelastung und hohem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf ist jedoch eingeschränkt. Dies trifft auf kommunale Kläranlagen mit infolge industriellen oder gewerblichen Einflusses (z. B. Schlachthöfe, fleischverarbeitende Betriebe) stark erhöhter Stickstofffracht im Zulauf zu. Für industrielle oder industriell bzw. gewerblich beeinflusste kommunale Kläranlagen, in denen Abwasser mit relativ hohem CSB-Gehalt mit ausreichendem leicht abbaubaren Anteil anfällt, ist eine Übertragbarkeit gegeben. Dies wurde im Vorhaben am Beispiel des VD-Modells mit einem Abwasseranteil aus der kartoffelverarbeitenden Industrie gezeigt.

1.4 Großtechnische Erprobung ausgewählter Konzepte

1.4.1 Sauerstoffprofilmessungen in Voruntersuchungen

Auch bei einer Regelung des Sauerstoffgehaltes im Belebungsbecken, auf der alle in Abschnitt 1.2 beschriebenen Konzepte zur optimierten Belüftung basieren, gibt es immer räumliche Differenzen bezüglich der O_2 -Konzentration. Bei Kaskadenanlagen mit längs durchströmten Becken treten solche O_2 -Konzentrationsprofile besonders ausgeprägt über den Fließweg des Abwassers aber auch über Breite und Tiefe des Beckens auf. Die Ausbildung dieser Profile ist zudem stark abhängig von verschiedenen Randbedingungen (Zulauftracht, Lufteintrag, Strömungsverhältnisse, etc.). Somit lässt sich kaum ein für alle Bedingungen repräsentativer Messort für O_2 -Online-Messungen festlegen.

Deshalb wurde im Rahmen umfangreicher Voruntersuchungen die gesamte räumliche Verteilung der Sauerstoffkonzentration im Nitrifikationsbecken einer Kaskade des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch durch Messen an jeweils neun Längen, fünf Breiten und vier Tiefen ermittelt. Dies geschah in insgesamt neun Messkampagnen für jeweils einen definierten Betriebszustand. Insgesamt wurden hierbei 4 860 Messwerte aufgenommen, archiviert und anschließend ausgewertet. Diese Messungen erstreckten sich über einen Zeitraum im Herbst von knapp zwei Monaten. Die Messkampagnen wurden bei Trockenwetter für fünf verschiedene Luftvolumenströme, welche je Kampagne als konstante Luftzufuhr zur Kaskade vorgegeben wurden, durchgeführt. Vier Messreihen erfolgten vormittags, während fünf Kampagnen nachmittags - wobei es zu einer gewissen Vergleichmäßigung hinsichtlich der Zulauflast („Trockenwetter-Frachtplateau“) und der Sauerstoffprofile kommt - durchgeführt wurden.

Weitere Details zur Durchführung und Auswertung dieser Messungen können [Sei06b] entnommen werden. An dieser Stelle werden nur exemplarisch an einem typischen Trockenwetternachmittag gemessene Sauerstoffprofile in der Draufsicht und im Querschnitt grafisch dargestellt. Abbildung 1.83 zeigt das über die Tiefe gemittelte O_2 -Profil der Nitrifikationszone der ersten Kaskade in der Draufsicht (Abwasserzulauf von Denitrifikation unten links, -ablauf rechts, \bullet => Position O_2 -Online-Messsonde).

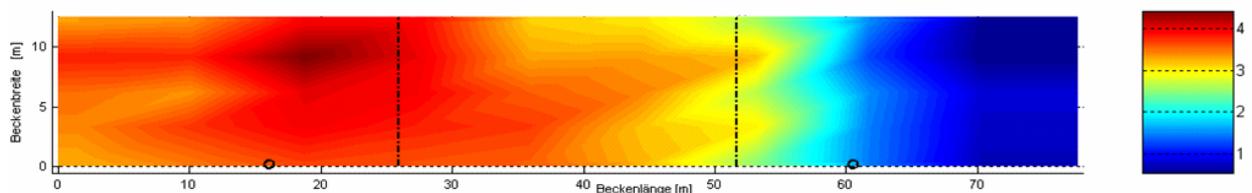


Abbildung 1.83: Exemplarisches O_2 -Profil der Nitrifikation einer Kaskade in der Draufsicht

Abbildung 1.84 zeigt das entsprechende über die Länge gemittelte O_2 -Profil der Nitrifikationszone der ersten Kaskade im Querschnitt (Betrachtung mit der Durchflussrichtung des Abwassers, \bullet => Position O_2 -Online-Messsonde).

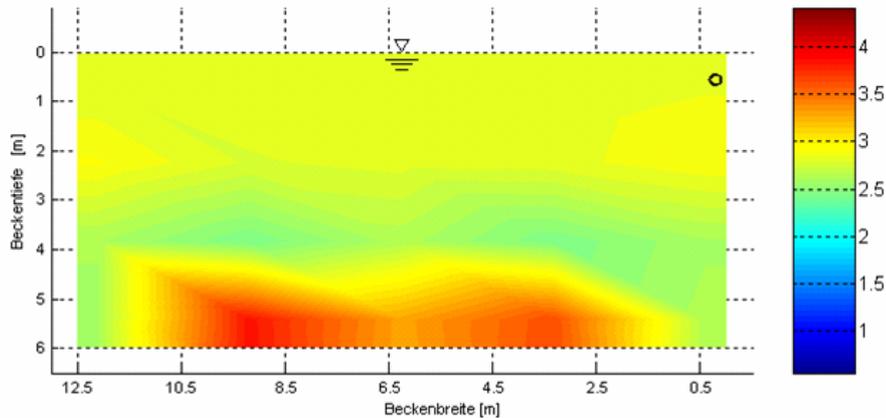


Abbildung 1.84: Exemplarisches O₂-Profil der Nitrifikation einer Kaskade im Querschnitt

Die Beispiel-Darstellungen verdeutlichen, dass der Gradient in Längs- bzw. Fließrichtung weitaus größer als über die Tiefe und die Breite des Nitrifikationsbeckens ist. Jedoch erfolgte in dieser Zeit eine dauerhafte Drosselung der Absperrklappen in den einzelnen Fallleitungen zu den vorderen Belüftergittern. Die Referenzsimulationen beziehen sich bereits auf diese neue Fahrweise, alle hier entwickelten Konzepte werden also an der bereits verbesserten Einstellung gemessen (siehe Abschnitt 1.2).

1.4.2 Erprobung auf dem Klärwerk Magdeburg/Gerwisch

Zur Erprobung der vorgeschlagenen statischen Konzepte wurden auf dem Klärwerk Magdeburg/Gerwisch in allen Kaskaden beider Straßen verschiedene Versuche vorgenommen [SWM06]. Im Anschluss an Vorversuche wurde ein „Großversuch“ mit Einstellungen, die im Wesentlichen der empfohlenen Maßnahmen-Kombination 2 (MK2) entsprechen, durchgeführt. Ein wichtiger Unterschied zum ursprünglichen Vorschlag der MK2 ist jedoch die Wahl eines etwas höheren Sauerstoffsollwertes während des Großversuches, um eine zusätzliche Sicherheit insbesondere bei Regenereignissen zu erreichen. Im Anschluss an den Großversuch erfolgte ein „Referenzversuch“ mit für den Sommerbetrieb typischen Parametern [SWM06]. Während des Referenzversuches wurden folgende O₂-Sollwerte eingestellt: 2,75 g/m³ in der ersten; 2,5 g/m³ in der zweiten und 2,25 g/m³ in der dritten Kaskade (wie auch bei den Referenzsimulationen, vgl. Tabelle 1.1). Der im Großversuch in allen Kaskaden gleichermaßen auf 2,5 gesetzte O₂-Sollwert entspricht somit dem Mittelwert der Sollwerte des Referenzversuches. Sowohl der Groß- als auch der Referenzversuch liefen über jeweils drei Wochen, was in etwa einem Schlammalter entspricht. Über beide Versuchszeiträume wurde ein TS-Gehalt zwischen 3 300 und 3 400 g/m³ in Kaskadenstufe 3 gefahren. Auch die weiteren relevanten Einstellungen wurden für beide Versuche aufeinander abgestimmt (z. B. Zulaufaufteilung, Wichtung der Sauerstoffmessungen, statische Luftaufteilung). Die Abwassertemperatur in der Belebung lag zwischen ca. 20 und 22°C.

Während der Versuche wurden an jeweils drei Nachmittagen auch die Längsprofile der Sauerstoffkonzentrationen in beiden Kaskadenstraßen erfasst. Die nachfolgende Abbildung zeigt für den Großversuch die sich bei Mittelwertbildung über die einzelnen Messreihen und über beide Straßen ergebenden Sauerstoffkonzentrationen im Längsprofil der Kaskadenanlage (vgl. Profildarstellungen in den Abschnitten 1.2.2 und 1.4.1).

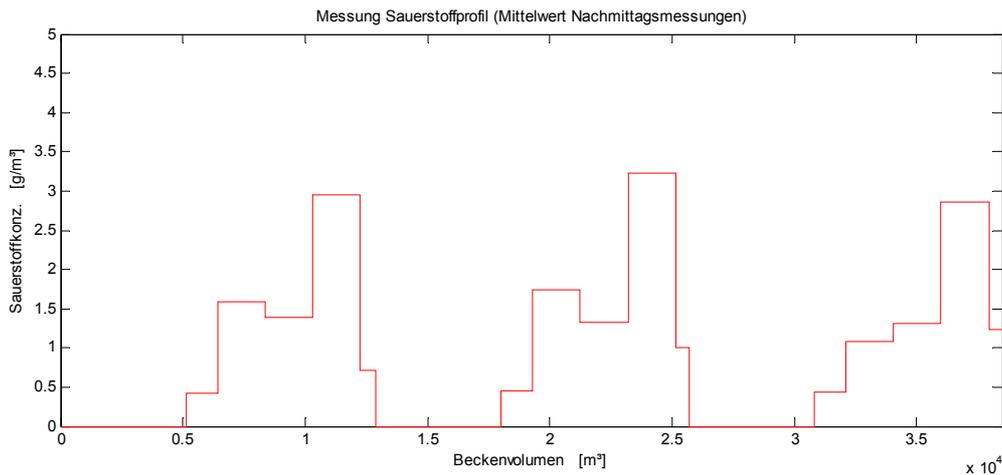


Abbildung 1.85: Während des Großversuches erfasste Sauerstofflängsprofile

Tabelle 1.21 zeigt die wesentlichen, für den jeweils dreiwöchigen Versuchszeitraum zusammengefassten Ergebnisse von Groß- und Referenzversuch im Vergleich. Die Ermittlung des Energieverbrauches für die in die Kaskadenanlage eingebrachten Luftmengen (ohne Rührwerke) erfolgte für beide Versuche über den Faktor 0,031 kWh/Nm³ Luft [SWM06].

| Größe | Großversuch | Referenzversuch |
|--|-------------|-----------------|
| BSB ₅ -Abbau, je 21 d [kg BSB ₅] | 213 152 | 190 216 |
| CSB-Abbau, je 21 d [kg CSB] | 635 435 | 560 560 |
| Luftmenge Kaskadenanlage, je 21 d [Nm ³] | 7 653 855 | 7 299 862 |
| Energie Belüftung Kaskadenanlage, je 21 d [kWh] | 237 270 | 226 296 |
| Spezifische Energie Belüftung Kaskadenanlage [kWh/kg CSB] | 0,3734 | 0,4037 |
| Jahresverbrauch (normiert auf CSB-Abbau Referenzversuch) [kWh/a] | 3 638 061 | 3 933 276 |

Tabelle 1.21: Zusammenfassung Ergebnisse Groß- und Referenzversuch

Die BSB₅- und CSB-Abbauraten lagen in beiden Versuchen bei 99 % bzw. 95 %. Die durchschnittlichen Tageszuläufe während des Großversuches waren höher als beim Referenzversuch. Diese Differenz spiegelt sich ebenfalls in den Frachten wider, die CSB- bzw. BSB₅-Durchschnittsfracht war höher als beim Referenzversuch. Es wird sichtbar, dass trotz der höheren Zulauffrachten im Großversuch, bezogen auf den spezifischen Energieverbrauch für den Abbau von einem kg CSB weniger Energie verbraucht worden ist [SWM06]. Der im Großversuch ermittelte spezifische Energieverbrauch war verglichen mit dem Ergebnis des Referenzversuches um 7,5 % niedriger - trotz des im Mittel gleichen O₂-Sollwertes. Dazu kommt der in dieser Berechnung noch nicht enthaltene Spareffekt durch die ermöglichte Abschaltung der Rührwerke in den zusätzlich belüfteten Mischzellen.

Generell wurde vom Betreiber festgestellt, dass mit den Einstellungen des Großversuches, zumindest im Sommerbetrieb, eine sehr gute Anlagenstabilität erreicht wurde. Deshalb wurde im Ergebnis der Auswertung eine Umstellung auf die Betriebsweise des Großversuches empfohlen. Bei einer Senkung der O₂-Sollwerte (wie z. B. in der Simulation von MK2 auf 2 g/m³, vgl. Abschnitt 1.2.2) ist natürlich mit einer noch größeren Einsparung an Belüftungsenergie (ca. 10...15 %) zu rechnen.

1.4.3 Empfehlungen zur praktischen Umsetzung geeigneter Konzepte

Nachfolgend werden am Beispiel des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch Empfehlungen zur praktischen Umsetzung der entwickelten Konzepte - speziell der statischen Maßnahmen-Kombinationen – auf Kaskadenbelebungsanlagen gegeben.

Die Maßnahmen-Kombination MK1 ist am Schnellsten praktisch realisierbar und kann - zunächst ohne Variation zusätzlicher Parameter (z. B. Sauerstoffsollwerte) - kurzfristig auf beiden Kaskadenstraßen wie folgt umgesetzt werden:

- Exemplarische Kontrolle des durch Simulation für alle Lastfälle berechneten Nitratgehaltes von rd. 0 g/m^3 im Ablauf der Denitrifikation der ersten Kaskadenstufe, d. h. Erfassung $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalt durch Stichprobe(n) in unbelüfteter Steuerstufe (Messung im Beckenabschnitt vor Nitrifikationszone); diese Messungen können z. B. vor und während des Trockenwetter-Frachtplateaus (z. B. 8:00 und 14:00) erfolgen
- Zuschalten der Belüftung der Steuerstufe in der ersten Kaskadenstufe und Drosselung der Belüftung mit Hilfe der entsprechenden Absperrklappen, bis sich bei TW ein O_2 -Gehalt in der betreffenden Steuerstufe von im Mittel ca. $0,5 \text{ g/m}^3$ einstellt (Erfassung z. B. über Feldmesssonde, für Trockenwetter-Frachtplateau am Nachmittag)
- optional kann in einem weiteren Schritt zudem eine moderate Senkung der O_2 - Sollwerte in den Kaskaden erwogen werden

Die Maßnahmen-Kombination MK2 mit gedrosselt belüfteten jeweils hinteren Steuerstufen in allen Kaskaden sollte, um das Einsparpotenzial bzgl. der Belüftungsenergie weiter auszu-schöpfen, wenn möglich in Verbindung mit einer Senkung der O_2 -Sollwerte zur Anwendung kommen. Das Vorgehen bei der Umstellung auf diese Betriebsweise kann angelehnt an die oben für MK1 beschriebenen Schritte auch für die Kaskaden 2 und 3 erfolgen. Jedoch wäre in diesem Zusammenhang im Vorfeld eine genaue Abschätzung der Auswirkung der Maßnahmen auf die Denitrifikationsleistung sinnvoll. Denn im Gegensatz zur Kaskade 1 ist in den (unbelüfteten) Steuerstufen der folgenden Kaskaden möglicherweise noch Nitrat vorhanden. Deshalb wären diese Maßnahme-Kombinationen zunächst auch nur auf einer Kaskadenstraße zu testen. In der Simulationen von MK2 wurde durch die Drosselung der Belüftung der Steuerstufen z. T. sogar eine insgesamt gesteigerte Denitrifikationsleistung errechnet. Jedoch sollten die Randbedingungen vor einer praktischen Umsetzung dieser Maßnahmen-Kombination genauer untersucht werden, als es für MK1 erforderlich ist. Durch die im vorhergehenden Abschnitt beschriebene großtechnische Erprobung auf der Beispielanlage hat sich auch MK2 als geeignet erwiesen. Deshalb wird seitdem auf dem Klärwerk eine entsprechende Grundeinstellung angewandt (vgl. Abschnitt 1.4.2).

Lassen die Randbedingungen auf der Anlage (speziell aus Sicht der N-Elimination) eine Anwendung von MK2 nicht ohne weiteres zu, kann auch die gedrosselte Belüftung der Steuerstufen nur in der ersten und zweiten Kaskade erwogen werden. Dies stellt einen Kompromiss zwischen dem höheren Luftesparpotenzial von MK2 und der Reduzierung von N_{ges} im Ablauf mit Hilfe von MK1 dar. Auch könnte sie als Übergangslösung und zum Test im Vorfeld einer möglicherweise beabsichtigten Realisierung von MK2 dienen.

Eine Steigerung der N-Eliminationsleistung durch Einrichtung einer internen Rezirkulation vom Ablauf der dritten zur ersten Kaskade oder auch durch Zugabe von Substrat oder Abwässern mit hohem Gehalt an abbaubarem CSB in den Zulauf würde sich prinzipiell auch günstig auf die Einsatzmöglichkeiten aller hier vorgeschlagenen Konzepte auswirken.

Durch Untersuchungen mit dynamischer Simulation hat sich gezeigt, dass die gedrosselte Belüftung aller Steuerstufen in Kombination mit dynamischen Konzepten noch effektiver ist. Die dadurch bei statischer Einstellung (MK3) zu erwartenden höheren $\text{NO}_3\text{-N}$ -, bzw. N_{ges} -Konzentrationen im Ablauf lassen sich durch lastflexible Konzepte vermeiden. Eine Implementierung der vorgeschlagenen dynamischen Konzepte erfordert jedoch zusätzliche Investitionskosten, eine praktische Erprobung der lastflexiblen Konzepte war deshalb im Zeitraum dieses Vorhabens nicht möglich.

2 Diskussion der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung

Im Vorhaben sollten für eine Kläranlage mit längs durchströmten Belebungsbecken (Beispiel Kaskadenbelebung des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch) verschiedene Konzepte für die Belüftung besonders im Hinblick auf ihre Eignung zur Einsparung von Energie, bei Erhalt oder Verbesserung der Betriebssicherheit und der Reinigungsleistung, entwickelt sowie mit dynamischer Simulation analysiert und bewertet werden. Weiterhin waren Untersuchungen zur Übertragbarkeit der entwickelten Konzepte auf andere Kläranlagen sowie die großtechnische Erprobung geeigneter Konzepte auf der Beispielanlage vorzunehmen.

Im Projekt wurden im Hinblick auf die Zielsetzung folgende wesentliche Ergebnisse erzielt:

- Entwicklung und Bewertung von statischen Konzepten zur optimierten Belüftung für die Beispielanlage unter Ausnutzung von auf der Anlage gegebenen Möglichkeiten (keine zusätzlichen MSR-Einrichtungen):
 - die Kombination einer kontinuierlichen, aber gedrosselten Belüftung von ausgewählten Steuerstufen (fakultativ belüftete Beckenabschnitte) bei gleichzeitiger Senkung der O₂-Sollwerte in den Nitrifikationszonen ist sehr wirksam (Reduzierung Luftmenge um ca. 10...15 %)
 - das sind relativ einfache aber effektive Maßnahmen-Kombinationen für die gleichzeitige Reduzierung des Luftverbrauches und von NH₄-N im Ablauf Belebung bei Erhalt der Denitrifikationsleistung (Ausnutzung der simultanen Denitrifikation in den Steuerstufen)
- Entwicklung und Bewertung von dynamischen (lastflexiblen) Konzepten zur optimierten Belüftung für die Beispielanlage:
 - die entwickelten lastflexiblen Strategien basieren grundsätzlich auf den o. g. statischen Konzepten, dadurch wird der Einsatz lastflexibler Konzepte effektiver
 - Regelung von NH₄-N im Ablauf Belebung zur lastflexiblen Führung der O₂-Sollwerte vor allem in Kombination mit gedrosselt belüfteten Steuerstufen ist gut geeignet für die weitere Reduzierung des Luftverbrauches und von NH₄-N im Ablauf Belebung
 - automatische Umschaltung der Steuerstufen (d. h. Abschalten der Steuerstufenbelüftung bei Überschreitung eines Grenzwertes für NO₃-N im Ablauf der Denitrifikation) ist gut geeignet zur Reduzierung von NO₃-N- und N_{ges}-Spitzen im Ablauf Belebung; Kombination mit Regelung von NH₄-N im Ablauf Belebung ist besonders sinnvoll
- die hergeleitete Kenngröße „Verlustluftmenge“ eignet sich zur Einschätzung und Lokalisierung des Potenzials zur Reduzierung der Luftmengen für die einzelnen belüfteten Abschnitte von längs durchströmten Belebungsbecken:
 - eine gezielte Reduzierung der gesamten Verlustluftmenge, d. h. eine effizientere Belüftung (Senkung des Luftverbrauches ohne die Reinigungsleistung zu beeinträchtigen) konnte, durch im Fließweg über die belüfteten Abschnitte ansteigende O₂-Konzentrationen, erreicht werden
 - ein Ansatz zur Einbindung der Kenngröße Verlustluftmenge in ein innovatives MSR-Konzept (Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen im Längsprofil) sollte weiter verfolgt werden
- Über die ursprüngliche Zielsetzung hinausgehend wurden im Vorhaben anhand der Beispielanlage auch Konzepte zur lastflexiblen Zulaufaufteilung für Kaskadenanlagen untersucht; speziell eine Regelung von NH₄-N im Ablauf Belebung zeigte sich als viel versprechender Ansatz zur Reduzierung von NH₄-N-Ablaufspitzen bei Frachtstößen.

- Prüfung der Übertragbarkeit der in diesem Projekt entwickelten statischen und dynamischen Konzepte zur optimierten Belüftung auf Kläranlagen mit vorgeschalteter Denitrifikation in längs durchströmten Belebungsbecken:
 - die Anwendung eines Modells einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation als weit verbreitetes Abwasserreinigungsverfahren (VD-Modell) auf Basis des international eingeführten Benchmark-Modells BSM1 (siehe www.benchmarkWWTP.org) ist ein geeigneter Weg, um die Übertragbarkeit zu untersuchen
 - Rahmenbedingungen und Grenzen für die Anwendung der im Projekt entwickelten Konzepte wurden durch Simulation mit dem Original-BSM1-Zulauf aufgezeigt ⇒ nur bedingte Anwendbarkeit bei generell sehr hoher Belastung (überdurchschnittlich hohe CSB-Belastung, geringes Schlammalter) und gleichzeitig deutlich erhöhtem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf ⇒ damit ist auch die Übertragbarkeit auf industrielle oder industriell bzw. gewerblich beeinflusste kommunale Kläranlagen mit überdurchschnittlich hoher Stickstoffbelastung (z. B. von Schlachthöfen, fleischverarbeitenden Betrieben) nur eingeschränkt möglich
 - Einfluss von Industrieabwasser am Beispiel des VD-Modells mit Abwasseranteil aus der kartoffelverarbeitenden Industrie wurde aufgezeigt (separates Fraktionierungsmodell erstellt) ⇒ gute Übertragbarkeit auf industrielle oder industriell beeinflusste kommunale Kläranlagen, in denen Abwasser mit relativ hohem CSB-Gehalt mit ausreichendem leicht abbaubaren Anteil anfällt
 - bei der in deutschen kommunalen Kläranlagen üblichen CSB- und TKN-Belastung ist eine Übertragbarkeit gegeben
- großtechnische Erprobung der statischen Konzepte auf der Beispielanlage:
 - Empfehlungen zur Umsetzung der vorgeschlagenen statischen Konzepte
 - Erprobung auf der Beispielanlage führte zur Bestätigung der Simulationsuntersuchungen ⇒ Reduzierung der erforderlichen Luftmenge, sehr gute Anlagenstabilität (Ablaufwerte)
 - seitdem wird die Beispielanlage mit entsprechenden Einstellungen gefahren

Der Vergleich der Ergebnisse der Arbeitspakete mit der ursprünglichen Zielsetzung hat keine relevanten Abweichungen ergeben. Die Projektziele wurden erreicht. Sie haben sich innerhalb des angegebenen Berichtszeitraumes gegenüber dem ursprünglichen Antrag grundsätzlich nicht geändert. Darüber hinaus wurde im Vorhaben neben kommunalem auch industrielles Abwasser berücksichtigt, und es wurden verschiedene Strategien zur lastflexiblen Zulaufaufteilung für Kaskadenanlagen untersucht.

3 Bewertung der Ergebnisse

3.1 Technologische Bewertung

Im Vorhaben wurde gezielt nach Maßnahmen zur Betriebsoptimierung der Belüftung von längs durchströmten, d. h. pfropfen- oder kaskadenförmig durchströmten, Belebungsbecken gesucht. Derartige Becken sind in den verschiedensten Bauformen anzutreffen (z.B. lange Rechteckbecken und auch Umlaufbecken oder Ringbecken bei geringem Umlaufstrom). Oft werden solche Belebungsbecken auch durch Trennwände in mehrere hintereinander geschaltete, durchmischte Abschnitte unterteilt, wobei sich das Übertragungsverhalten mit steigender Reaktoranzahl dem eines pfropfenförmig durchströmten Reaktors annähert.

Längs durchströmte Belebungsbecken werden sehr häufig bei folgenden Verfahren der biologischen Abwasserreinigung eingesetzt:

- Kaskadendenitrifikation,
- vorgeschaltete Denitrifikation;

für welche die zu entwickelnden statischen und lastflexiblen Konzepte zur Optimierung der Belüftung in erster Linie anwendbar sein sollen. Bei der Entwicklung dieser Konzepte hatte die Einsparung von Belüftungsenergie bei gleichzeitiger Erhöhung oder wenigstens Erhalt der Betriebssicherheit, unter Berücksichtigung der Reinigungsleistung Priorität.

Bewusst wurde dabei von einfachen, praktikablen und robusten Konzepten ausgegangen, um die Anwendbarkeit und Übertragbarkeit zu begünstigen. Mit optimierten Grundeinstellungen der Belüftung ausgewählter Abschnitte der Belebung (statische Konzepte), die einfach und kostengünstig realisiert werden können, sowie mit einfachen Regelungen (lastflexible Konzepte), die auf den häufig vorhandenen Ablaufmessungen basieren, kann für die vorherrschenden Lastsituationen der Energieverbrauch auf vielen Kläranlagen deutlich gesenkt und gleichzeitig die Reinigungsleistung verbessert werden. Für die Beispielanlage (Kaskadendenitrifikation) wurde je nach Lastfall ein Rückgang des Luftverbrauches um ca. 10...15 % simuliert. Vor allem die vorgeschlagenen statischen Konzepte, können ohne zusätzliche Investitionen mit sehr geringem Aufwand kurzfristig in die Praxis umgesetzt werden, wie anhand der Beispielanlage gezeigt wurde (siehe Abschnitt 1.4).

Im Projekt hat sich gezeigt, dass eine Anwendung der Ergebnisse auf kommunalen Kläranlagen mit Kaskadendenitrifikation oder vorgeschalteter Denitrifikation grundsätzlich möglich ist. Mit dem Modell einer Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation (VD-Modell) und industriellem Zulaufanteil (Beispiel: kartoffelverarbeitende Industrie) wurden ebenfalls Einsparungen in der o. g. Größenordnung berechnet, ohne die $\text{NH}_4\text{-N}$ und N_{ges} -Ablaufwerte zu verschlechtern. Die Übertragbarkeit auf Kläranlagen mit überdurchschnittlich hoher Stickstoffbelastung und hohem TKN : CSB-Verhältnis im Zulauf ist jedoch eingeschränkt. Dies trifft auf kommunale Kläranlagen mit infolge industriellen oder gewerblichen Einflusses stark erhöhter Stickstofffracht im Zulauf zu. Für industrielle oder industriell bzw. gewerblich beeinflusste kommunale Kläranlagen, in denen Abwasser mit relativ hohem CSB-Gehalt mit ausreichendem leicht abbaubaren Anteil anfällt, ist eine Anwendung der Ergebnisse sinnvoll.

3.2 Ökologische und ökonomische Bewertung

Die Belüftung benötigt ca. zwei Drittel des Energieeinsatzes auf Belebungsanlagen [ATV95] und stellt somit im Rahmen des Kläranlagenbetriebes einen der wichtigsten Ansatzpunkte zur Einsparung von Energie und damit zur Umweltentlastung infolge Verminderung des Treibhauseffektes durch Verringerung der CO₂-Emission dar [Mül99].

Die entwickelten Konzepte zur optimierten Belüftung besitzen in mehrfacher Hinsicht ein deutliches Potenzial zur Entlastung der Umwelt durch die Kläranlage, was sich in folgenden Punkten widerspiegelt:

- langfristig verringerte CO₂-Emission (Reduzierung Global Warming Potential - GWP) infolge Senkung des Energieverbrauchs der Belüftung
- Erhöhung der Betriebssicherheit durch Sicherstellung der geforderten Reinigungsleistung, insbesondere der Nitrifikation (z. B. Verringerung von Ammoniumspitzen im Ablauf bei Regenereignissen)
- Steigerung der Reinigungsleistung infolge Verringerung der langfristigen Emissionen (mittlere Frachten) aus dem Klärwerksablauf (Ammonium- bzw. Nitrat-Stickstoff)

Nachfolgend ist das Umweltentlastungspotenzial einer Anwendung der entwickelten Konzepte, infolge einer möglichen Einsparung von Belüftungsenergie, anhand einer überschlägigen Beispielrechnung aufgeführt. Als Beispiel dient eine Kläranlage mit 400 000 Einwohnerwerten (Größenklasse 5, gemäß Abwasserverordnung [ABWW04]):

| Beispielrechnung für das Potenzial zur Energie- und Kosteneinsparung sowie zur Umweltentlastung (Kläranlage Größenklasse 5, 400 000 EW) | | |
|--|--|---|
| Überschlagsrechnung Energieverbrauch (Stand der Technik) | <ul style="list-style-type: none"> - Einwohnerspezifische BSB₅-Fracht (nach Kurzvorklä rung): 45 g BSB₅/(E·d) [ATV00b] ⇒ Mittlere BSB₅-Fracht im Zulauf Beleb ung bei 400 000 EW: 18 000 kg BSB₅/d - Spezifischer Stromverbrauch (abhängig von Anlagengröße und Reinigungsverfahren): 1,5...3 kWh/kg BSB₅ [ATV95] - Annahme: spezifischer Stromverbrauch Kläranlage: 2 kWh/kg BSB₅ - Anteil Beleb ung am Stromverbrauch: 70...80 %, davon Belüftung ca. 75 % [ATV99] - ⇒ jährlicher Strom- bzw. Energieverbrauch für Belüftung: 18 000 kg BSB₅/d x 2 kWh/kg BSB₅ x 0,75 x 0,75 x 365 d/a ≈ 7,39 Mio kWh/a | |
| Beispiel MK2 | Energieeinsparung | <ul style="list-style-type: none"> - Einschätzung des praktischen Energieeinsparpotenzials für Anwendung der entwickelten Konzepte: ca. 10...15 % - Beispiel statisches Konzept MK2 für dreistufige Kaskadenanlage mit zwei Straßen (siehe Abschnitte 1.2.2 und 1.3.1): Reduzierung der benötigten Luftmenge um 11 % - ⇒ Einsparpotenzial Belüftungsenergie: 7,39 Mio kWh/a x 0,11 ≈ <u>812 900 kWh/a</u> - + Einsparpotenzial Rührwerke (Annahmen: spezifische Leistung 2 W/m³, Reduzierung unbelüftetes Volumen 1 300 m³ je Kaskade): 2x3 Kaskaden x 0,002 kW/m³ x 1 300 m³ x 8 760 h/a ≈ <u>136 600 kWh/a</u> - ⇒ Einsparpotenzial (Energie): 812 900 + 136 600 = <u>949 500 kWh/a</u> |
| | Kosteneinsparung | <ul style="list-style-type: none"> - Annahme Stromtarif (Großabnehmer): 0,05 €/kWh - ⇒ Einsparpotenzial (Kosten): 949 500 kWh/a x 0,05 €/kWh = <u>47 475 €/a</u> |
| | Umweltentlastung (Senkung GWP) | <ul style="list-style-type: none"> - Annahme: Energie aus Braunkohle-Kraftwerk, Dampfturbinen, 300 MW (siehe [GEM06] „Braunkohle-KW-DT-gross-generisch“) - ⇒ Spezifische CO₂-Emission (für 1 TJ gelieferte Elektrizität): 258 155 kg CO₂-Äquivalent/TJ [GEM06] - ⇒ Reduktion CO₂-Emission: 949 500 kWh/a x 3 600 kJ/kWh x 258 155 kg CO₂-Äquivalent/TJ / 10⁹ kJ/TJ ≈ <u>882 430 kg CO₂-Äquivalent/a</u> |

4 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die Zielsetzung, wesentliche Arbeitsschritte und erste Untersuchungsergebnisse wurden bereits im Mai 2006 den deutschsprachigen Anwendern des Simulationssystems SIMBA im Abwasserbereich präsentiert und in der Zusammenstellung der Vortragsunterlagen des 13. SIMBA-Anwendertreffens als Foliensatz abgebildet. Die jährlichen SIMBA-Treffen von Experten der Siedlungswasserwirtschaft, von Hochschulen, Universitäten, Kläranlagenbetreibern, Behörden und Vertretern der Regelungstechnik sind eine Plattform des ungezwungenen Gedanken- und Erfahrungsaustausches zu Modellgrundlagen, Simulationspraxis, Anwendungserfahrungen, Forschung und Lehre.

Im September 2006 wurden Ergebnisse der Optimierung der Belüftung auf dem Klärwerk Magdeburg/Gerwisch im Band 5 der Schriftenreihe Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte veröffentlicht. Diese Schriftenreihe wird vom Institut für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie im Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft der Hochschule Magdeburg-Stendal (FH) herausgegeben.

Auf der Gemeinschaftstagung „Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen“ der DWA und der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) im November 2007 in Wuppertal wurden die Ergebnisse des Projektes in einem Vortrag, mit einem Poster und mit einem Artikel im Tagungsband vorgestellt.

Weitere Publikationen in wissenschaftlichen und branchenspezifischen Zeitschriften sind in Vorbereitung.

Da die ifak system GmbH Aussteller auf einer Reihe für die Branche Abwasserreinigung wichtiger Messen im In- und Ausland (IFAT 2008 in München,ACHEMA in Frankfurt, Essener Tagung, Hannover Messe Industrie, Veranstaltungen der GVC, Veranstaltungen der DWA u. a. m.) ist, bestehen günstige Möglichkeiten, die Ergebnisse insbesondere auch kleinen und mittelständischen Unternehmen direkt vorzustellen.

Fazit

Am Beispiel einer Kaskadenanlage wurden verschiedene Grundeinstellungen zur Optimierung der Belüftung untersucht. Dabei hat sich insbesondere die Kombination einer kontinuierlichen, aber gedrosselten Belüftung von Steuerstufen bei gleichzeitiger Senkung der O_2 -Sollwerte in den Nitrifikationszonen als wirksam erwiesen. Durch solche statischen Konzepte ließ sich in der Simulation die erforderliche Luftmenge deutlich reduzieren und damit dauerhaft Energie sparen sowie infolge verringerter CO_2 -Emission die Umwelt entlasten. Gleichzeitig konnten die NH_4 -N-Spitzen im Ablauf der Kaskadenanlage gesenkt und die Denitrifikationsleistung erhalten werden. Durch großtechnische Erprobung ausgewählter Konzepte auf dem Klärwerk wurden diese Ergebnisse bestätigt. Darauf aufbauend haben sich am Simulationsmodell eine lastflexible Anpassung der Sauerstoffsollwerte in den Kaskaden und ein Umschalten der Steuerstufenbelüftung nach NO_3 -N im Ablauf der Denitrifikation jeder Kaskade als sinnvoll gezeigt.

Die gefundenen energiesparenden und umweltschonenden Belüftungsstrategien wurden auch auf eine Kläranlage mit vorgeschalteter Denitrifikation, auch unter Berücksichtigung von Industrieabwässern, übertragen und getestet. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass trotz verfahrens- und belastungsbedingter Einschränkungen ein interessantes Verbesserungspotenzial durch optimierte Grundeinstellungen und durch steuerungs- und regelungstechnische Konzepte auch auf diesem Typ Kläranlagen vorhanden ist.

Die Ergebnisse sind auf andere Anlagen übertragbar, sie erfordern aber fundierte Untersuchungen zur genauen Ausprägung eines „sparsamen“ aber noch ausreichenden Sauerstoffprofils für jede einzelne Anlage. Um das jeweils optimale O_2 -Profil einzustellen und damit eine effiziente Belüftung zu gewährleisten, wird für das weitere Vorgehen empfohlen, ein allgemeingültiges Konzept zur lastabhängigen Steuerung der Sauerstoffkonzentrationen zu entwickeln und in der breiten Praxis zu testen.

Literaturverzeichnis

- [ABW04] *Abwasserverordnung – Anhang 1 „Häusliches und kommunales Abwasser“*. Bundesgesetzblatt – Teil 1, Nr. 28, 22.06.2004.
- [Ale01] Alex, J.; Tschepetzki, R.: *Prädiktive Steuerung und Regelung der Stickstoffelimination in biologischen Kläranlagen*. at – Automatisierungstechnik 49, H. 10, S. 436-448, 2001.
- [ATV00a] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): *Regelung der Sauerstoffzufuhr beim Belebungsverfahren*. Merkblatt M 265, März 2000.
- [ATV00b] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK): *Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen*. Arbeitsblatt A 131, Mai 2000.
- [ATV99] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): *Energiebilanzierung auf Kläranlagen*. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 3.1.1 "Stabilisierungskennwerte, Energie- und Emissionsbilanzen", Hennef, 1999.
- [ATV97] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): *ATV-Handbuch – Biologische und weitergehende Abwasserreinigung*. 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 1997.
- [ATV95] Abwassertechnische Vereinigung e.V. (ATV): *ATV-Handbuch – Betriebstechnik, Kosten und Rechtsgrundlagen der Abwasserreinigung*. 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 1995.
- [Bor98] Bornemann, C.; Freund, M.; Londong, J.; Nowak, O.; Otterpohl, R.; Rolfs, T.: *Hinweise zur dynamischen Simulation von Belebungsanlagen mit dem Belebtschlammmodell Nr.1 der IAWQ*. Korrespondenz Abwasser 45 (1998), Nr. 3.
- [Cop02] Copp, J.B. (ed.) *The COST Simulation Benchmark — Description and Simulator Manual. a product of COST Action 624 & COST Action 682*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg. 2002
- [DWA05] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA): *Abwasser aus der Kartoffelverarbeitung*. Merkblatt M 753, Oktober 2005.
- [GEM06] *GEMIS 4.3 Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme*. Version 4.3. Computermodell und Datenbasis – siehe <http://www.oeko.de/service/gemis/>, Öko-Institut - Institut für angewandte Ökologie e.V.
- [Hen87] Henze, M.; Grady Jr, C.P.L.; Gujer, W.; Marais, G.v.R.; Matsuo, T.: *Activated Sludge Model No. 1*. IAWPRC Scientific and Technical Report No. 1, IAWPRC task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, London, 1987.
- [Jep07] Jeppsson, U.; Pons, M.-N.; Nopens, I.; Alex, J.; Copp, J.B.; Gernaey, K.V.; Rosen, C.; Steyer, J.-P.; Vanrolleghem, P.A.: *Benchmark Simulation Model No 2 - General Protocol and Exploratory Case Studies*. Water Science and Technology; (2007) 56(8):67-78.
- [Jep04] Jeppsson, U.; Pons, M.-N.: *The COST 624 benchmark simulation model – current state and future perspective*. Editorial. Control Engineering Practice, 12(3), 299-304. 2004.
- [Mül99] Müller, E.A.; Kobel, B.; Künti, T.; Pinnekamp, J.; Seibert-Erling, G.; Böcker, K.: *Energie in Kläranlagen*. Handbuch, Herausgeber Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, September 1999.

- [Sei06a] Seick, I.; Kuhn, B.: *Optimierung der Belüftung der Kaskadenbelebungen auf dem Klärwerk Magdeburg/Gerwisch durch Simulation von statischen Maßnahmen*. In: Kuhn, B.; Lüderitz, V. (Hrsg.): Technische, ökologische und soziale Aspekte moderner Abwasserbehandlung. Schriftenreihe „Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte“ Band 5 des Institutes für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie Magdeburg, Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [Sei06b] Seick, I.; Kuhn, B., Tiedge, J.: *Aufnahme von Sauerstoffprofilen im Belebungsbecken des Klärwerkes Magdeburg/Gerwisch*. In: Kuhn, B.; Lüderitz, V. (Hrsg.): Technische, ökologische und soziale Aspekte moderner Abwasserbehandlung. Schriftenreihe „Magdeburger Wasserwirtschaftliche Hefte“ Band 5 des Institutes für Wasserwirtschaft und Ökotechnologie Magdeburg, Shaker Verlag, Aachen, 2006.
- [SIM07] SIMBA 5.2 Simulation der biologischen Abwasserreinigung. Handbuch, Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg.
- [Svar05] Svardal, K.; Nikolavcic, B.; Lindtner, S.: *In-situ-Aktivitätsmessung im Belebungsbecken - Sauerstoffzufuhrregelung zur Optimierung der Stickstoffentfernung*. Fachtagung Mess- und Regelungstechnik in abwassertechnischen Anlagen - Konzepte, Erfahrungen, Trends. VDI/VDE-GMA und DWA, 22.-23.11. 2005, Wuppertal, VDI-Berichte Nr. 1890, VDI Verlag, Düsseldorf 2005, Tagungsband, S. 259 – 265.
- [SWM06] Jahnel-Duve, A.: *Auswertung Großversuch Optimierung Belüftung Kaskadenbelebungsanlage KW Magdeburg/Gerwisch*. Städtische Werke Magdeburg. Dezember 2006.
- [SWM04] Städtische Werke Magdeburg. *Daten und Fakten zur Abwasserentsorgung*. Informationsbroschüre. Dezember 2004.
- [Tak91] Takács, I.; Patry, G.G.; Nolasco, D.: *A dynamic model of the clarification thickening process*. Water Research, Vol. 25 (1991), No. 10, pp. 1263-1271.
- [Van96] Vanhooren, H.; Nguyen, K.: *Development of a simulation protocol for evaluation of respirometry-based control strategies*. Report University of Gent and University of Ottawa (1996).