

Transformation der ländlichen Abwasserinfrastruktur unter Einfluss des demografischen Wandels

T. C. Dilly^{1,*}, J. Wölle¹, T. G. Schmitt¹, M. Holzhauser²

¹Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Fachbereich Bauingenieurwesen, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

²Technische Universität Kaiserslautern, Arbeitsgruppe Optimierung, Fachbereich Mathematik, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

*Email des korrespondierenden Autors: timo.dilly@bauing.uni-kl.de

Kurzfassung Im Projekt SinOptikom wird die Transformation kommunaler Infrastrukturen in zwei vom demografischen Wandel betroffenen Modellkommunen des ländlichen Raums betrachtet. Dies geschieht mithilfe eines eigens dafür entwickelten softwaregestützten Optimierungs- und Entscheidungssystems, bestehend aus einem Pre-Processing-Tool, einem mathematischen Optimierungsmodell und einem Auswertungs- und Visualisierungstool. Der Anwender kann unterschiedliche Zukunftsszenarien mit individueller Gewichtung einer Zielfunktion berechnen und analysieren. Das Spektrum der Ungewissheiten bei den unterschiedlichen Entwicklungsszenarien ist sehr groß und die Bewertungskriterien haben einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Optimierungslösung. Mögliche Transformationspfade sind die Erneuerung des bestehenden Systems mit lokalen Anpassungen oder ein schrittweiser, dynamisch vollzogener Systemwechsel.

Schlagwörter: Transformationsstrategien, demografischer Wandel, kommunale Abwasserinfrastruktur, ländlicher Raum, Optimierung, Visualisierung

1 EINLEITUNG

Die bestehende Abwasserinfrastruktur in ländlichen Regionen ist zunehmend durch den demografischen und wirtschaftsstrukturellen Wandel in ihrer Funktionalität und ihrem wirtschaftlichen Betrieb beeinträchtigt. Daher kann ein langfristig angelegter, dynamisch vollzogener Systemwechsel erforderlich sein, bei dem die bestehenden zentralen Infrastruktursysteme durch neuartige dezentrale Konzepte der Abwasserreinigung und dezentrale Maßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung ersetzt oder ergänzt werden. Eine Herausforderung besteht dabei darin, die konkrete zeitliche Abfolge der Umsetzung dieses Systemwechsels zu planen und deren Auswirkungen zu bewerten (Kaufmann 2012).

In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme INIS geförderten Projekt „SinOptiKom - Sektorübergreifende Prozessoptimierung in der Transformation kommunaler Infrastrukturen im ländlichen Raum“ werden Transformationsstrategien in Abhängigkeit von wesentlichen Treibern, wie z.B. der siedlungsstrukturellen und demografischen Entwicklung, unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bewertungskriterien entwickelt. Der Fokus bezüglich einer stärkeren Dezentralisierung liegt dabei auf dem Abwassersystem. Für die Trinkwasserversorgung der ländlichen Gemeinden wird eine weitgehende Beibehaltung der zentralen Versorgungsnetze unterstellt.

Im Projekt werden zwei Modellkommunen betrachtet und Optimierungsrechnungen über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren mit unterschiedlichen Gewichtungen von Bewertungskriterien durchgeführt. Dadurch können unterschiedliche Transformationsszenarien der Abwasserinfrastruktur im ländlichen Raum unter Einfluss des demografischen Wandels und deren Einfluss auf die Regenwasserbewirtschaftung dargestellt und bewertet werden.

2 MATERIAL UND METHODEN

Im Projekt werden die vom demografischen Wandel betroffenen Verbandsgemeinden Enkenbach-Alsenborn und Rockenhausen (West- bzw. Nordpfalz, Rheinland-Pfalz) betrachtet. Die untersuchten Gemeinden im Einzugsgebiet der Gruppenkläranlagen Enkenbach-Alsenborn entwässern überwiegend im Mischsystem. In der Verbandsgemeinde Rockenhausen wird die Betrachtung der Abwasserinfrastruktur-

transformation beispielhaft für die gemeinsam an eine Pflanzenkläranlage angeschlossen Gemeinden Gerbach und St. Alban durchgeführt.

Die einzelnen Komponenten des softwaregestützten Optimierungs- und Entscheidungssystems zur systematischen Analyse und multikriteriellen Bewertung möglicher Zukunftsszenarien und Handlungsoptionen sind ein Pre-Processing-Tool, ein mathematisches Optimierungsmodell und ein Auswertungs- und Visualisierungstool (Baron et al. 2015). Dem Anwender des entwickelten Systems ist es damit möglich, selbstständig spezifische Entwicklungsszenarien aufzustellen, für die Optimierung eine individuelle Gewichtung aus einer Auswahl von Bewertungskriterien vorzunehmen und die Ergebnisse der Optimierungsrechnung in einem Visualisierungstool mit integriertem Geoinformationssystem zu analysieren.

2.1 Pre-Processing-Tool

Das Pre-Processing-Tool ermöglicht die Zusammenstellung unterschiedlicher Entwicklungsszenarien in einem Szenario-Manager. Dabei können die wesentlichen Treiber für einen Wandel mit unterschiedlichen Gewichtungen kombiniert werden. Als Treiber wurden für ländliche Räume die ingenieurtechnischen und planerischen Faktoren Wasserbedarf, Energiebedarf, Wasser- und Energiepreise, Kosten, rechtlicher Rahmen, Klimawandel sowie die Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung identifiziert (Worreschk et al. 2015). Der Szenario-Manager greift auf eine Wissensdatenbank zurück, in der die Bestandssituation der ausgewählten Modellkommunen, vorgefertigte Entwicklungsszenarien bezüglich der Treiber und ein Maßnahmenkatalog hinterlegt sind. Dabei wird zur Datenhaltung und -aufbereitung ein Datenbankserver basierend auf dem freien, objektrelationalen Datenbankmanagementsystem PostgreSQL verwendet. Infrastruktur-, Geo- und Liegenschaftsdaten können durch die Erweiterungen PostGIS und PostNAS verarbeitet werden.

Die Bestandssituation ist hauptsächlich durch Kanalnetz- und Flächendaten sowie Aussagen zur Siedlungs- und Bevölkerungsstruktur charakterisiert. Dabei werden Datensätze aus unterschiedlichen Datenquellen und in verschiedenen Datenformaten (z.B. WVY, ISYBAU, NAS, aber auch .xls/.xlsx, .xml, .txt, .pdf usw.) mit Methoden der Informationsintegration zusammengefasst und z.B. über ihre Lage und Attributzuordnungen (z.B. Straßenschlüssel) verknüpft. Für die Optimierung müssen die z.T. komplexen Kanalnetzstrukturen vereinfacht werden, z.B. indem Haltungen mit gleichen Eigenschaften (Gefälle, Rohrdurchmesser, Entwässerungsart) zu Kanaleinheiten zusammengefasst werden.

Des Weiteren sind unterschiedliche Szenarien der Siedlungs- und Bevölkerungsentwicklungen, unterschiedliche Wasserbedarfsprognosen, Strom- und Technologiepreisentwicklungen, Bemessungsreihen und Rahmenbedingungen in der Datenbank hinterlegt und können vom Anwender frei kombiniert werden. Wesentlich bei der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung im ländlichen Raum ist der Einfluss des demografischen Wandels, der zu einem Bevölkerungsrückgang führt. Eine Analyse der Siedlungs- und Milieustruktur auf Ebene einzelner Straßen und Gebäude (Mikroebene) ermöglicht die Aufteilung der betrachteten Siedlungskörper in kleinräumige *Siedlungseinheiten*, für die anhand von drei Szenarien unterschiedliche Zukunftsentwicklungen prognostiziert werden (Baron et al. 2016).

Im *Basisszenario* werden keine strukturellen Eingriffe in den Siedlungskörper vorgenommen und es werden Bevölkerungsvorausrechnungen mit Standardannahmen, regionale Migrationsbewegungen sowie die bundesdeutsche Sterbetafel und Geburtenziffern zugrunde gelegt. In einem Szenario *Entdichtung und Zersiedlung* wird ein starker Bevölkerungsrückgang in Dorfkernen und eine geringe Bauaktivität in den Randlagen angesetzt. Demgegenüber werden in einem *Dorfkernsanierungsszenario* über eine Aufwertung der Siedlungskörperkernbereiche eine zusätzliche Migrationsbewegung und Neubauaktivitäten fokussiert (Schmitt et al. 2016). Unter der Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen kann ein gleichbleibender, schwach oder stark abnehmender sowie ein benutzerdefinierter Wasserbedarf ausgewählt werden. Für die Kosten der einzelnen Maßnahmen sind Basiswerte bestimmt und zukünftige Investitions-, Reinvestitions- und Betriebskosten werden im Modell mit einer realen Preisänderungsrate belegt. Die reale Preisänderung und der Realzinssatz können vom Nutzer gewählt werden. Außerdem ist es möglich die zukünftigen Investitionskosten für neue, innovative Technologien abzumindern. Unter der Annahme, dass neue Technologien durch eine weitere Verbreitung und Nutzung eine erhebliche Preisreduzierung erfahren, sind Preisanpassungskurven für die entsprechenden Technikkomponenten in der Datenbank hinterlegt. Der Stromverbrauch einzelner Maßnahmen wird über

die Betriebskosten abgebildet und Strompreisänderungen werden bei der Energieerzeugung durch Biogas berücksichtigt.

2.2 Maßnahmenkatalog als Modellinput

Der Maßnahmenkatalog zur Festlegung der Handlungsoptionen umfasst die in Tabelle 1 dargestellten Bereiche Siedlungsentwässerung, Regenwasserbewirtschaftung, Abwasserbehandlung, Stoffstromtrennung und Ressourcenrückgewinnung. Jeder Maßnahme sind Eigenschaften zur Bewertung der Kriterien Kosten, Flexibilität, Wasserhaushalt, Emissionen, Wasserrecycling, Energieeffizienz und Akzeptanz zugeordnet. Die Bewertungskriterien lassen sich über Schieberegler unabhängig voneinander gewichten. So kann der Nutzer für jede Optimierung eine Zielfunktion mit individuellen Prioritäten festlegen. Im Kapitel 2.3 wird näher auf die Zusammensetzung und die Bedeutung der Bewertungskriterien eingegangen.

Tabelle 1: Maßnahmenkatalog im Projekt SinOptiKom

Siedlungsentwässerung	Regenwasserbewirtschaftung	Abwasserbehandlung	Stoffstromtrennung und Ressourcenrückgewinnung
<ul style="list-style-type: none"> • Mischwassersysteme • Trennsysteme: Freispiegelkanäle Schmutzwasser, Grauwasser und Regenwasser • Vakuum- und Drucksysteme • Regenwasserableitung in oberirdischen Rinnen • sonstige Maßnahmen (Hochdruckspülverfahren, Kanalsanierung, Kanalstilllegung) 	<ul style="list-style-type: none"> • Dachbegrünung • Flächenentsiegelung • Muldenversickerung • Regenwassernutzung im Haus • Regenwassernutzung zur Gartenbewässerung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kleinkläranlagen (SBR-Verfahren) • Kleinkläranlagen (MBR-Verfahren) • Kleinkläranlagen (Pflanzenkläranlage) • Technische Kläranlage • Zentrale Pflanzenkläranlage • Stilllegung der zentralen Kläranlage 	<ul style="list-style-type: none"> • 2-Stoffstromtrennung im Haus: Schwarz- und Grauwasser-trennung (Spültoilette) • Grauwasserrecycling im Haus • Öffentliche Grauwasserbehandlung • Nährstoffrückgewinnung • Co-Vergärung von Schwarzwasser • Biogasanlage (Energiegewinnung aus Schwarzwasser)

2.3 Mathematisches Optimierungsmodell

Die im Fokus stehenden Transformationsstrategien werden auf Basis eines mathematischen Optimierungsmodells erzeugt, welches über einen gewählten Betrachtungszeitraum (z.B. 50 Jahre) optimale strategische Entscheidungen zur Weiterentwicklung der Infrastruktursysteme berechnet. Dabei wird eine Vielzahl von Bedingungen berücksichtigt, welche die Kombinierbarkeit der einzelnen Maßnahmen und Systeme festlegen. Außerdem werden obere und untere Funktionsgrenzen definiert, die eine Anpassung des Systems erzwingen.

Die Besonderheit des gewählten Ansatzes besteht darin, dass eine Optimallösung nicht explizit hergeleitet, sondern implizit durch Variablen, Nebenbedingungen und Zielfunktionen „generiert“ wird. Dabei wurde eine Einschränkung auf lineare Nebenbedingungen und Zielfunktionen vorgenommen, um eine effiziente Lösbarkeit der mathematischen Optimierungsaufgabe sicherzustellen. Da sich allgemeine Funktionen durch stückweise lineare Funktionen beliebig gut approximieren lassen, stellt dies keine Einschränkung dar.

Eine weitere Besonderheit des Modells ist die simultane Berücksichtigung von acht Bewertungskriterien. Alle im Siedlungskörper umgesetzten Maßnahmen beeinflussen den Grad der Zielerreichung auf Grundlage ihrer hinterlegten Eigenschaften, sodass bei dem vorhandenen multikriteriellen Optimierungsproblem eine einheitliche Skalierung der Bewertungskriterien notwendig wird. Dadurch werden die einzelnen Kriterien miteinander vergleichbar und es kann eine optimierte Kompromisslösung erzeugt werden. Im Folgenden wird auf die Hintergründe der einzelnen Bewertungskriterien eingegangen.

Die in der Datenbank hinterlegten Kosten sind entweder dem privaten (d.h. einzelnen Anwohnern) oder dem öffentlichen (d.h. der gesamten Kommune) Bereich zugeordnet. Beim Neubau von Kanälen werden die Kosten in Abhängigkeit vom verbauten Material, dem Kanaldurchmesser, der Verlegetiefe und der Kanallänge bestimmt. Bei Anpassungsmaßnahmen der Regenwasserbewirtschaftung, Abwasserbehandlung oder Ressourcenrückgewinnung errechnen sich die Kosten über die Bezugsgrößen Einwohnerzahlen, Anzahl der Wohneinheiten oder den entsprechenden Flächenangaben.

Der Flexibilitätswert einer Maßnahme errechnet sich aus der Nutzungsdauer, der Anpassungsfähigkeit an Veränderungen (z.B. Bevölkerung) und der Robustheit gegenüber Veränderungen (z.B. Belastungsschwankungen). Das Kriterium Wasserhaushalt bewertet naturnahe Abfluss-, Verdunstungs- und Versickerungsraten positiv. Einen großen Einfluss auf den Wasserhaushalt haben die Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen Muldenversickerung, Flächenentsiegelung, Dachbegrünung und Regenwassernutzung. Zusätzlich wird eine Verdunstung bei offenen Rinnen berücksichtigt.

Bei dem Bewertungskriterium Emission erfolgt eine Bilanzierung der Gewässerbelastungen anhand des Summenparameters Chemischer Sauerstoffbedarf und der Nährstoffe Stickstoff und Phosphor. Bei einem Transformationsergebnis, welches zu einem Wegfall des Schmutzwasserabflusses im Zulauf von Sonderbauwerken führt, kann das Regenwasser über die ehemaligen Mischwasserüberläufe ins Gewässer eingeleitet werden. Beim Wasserrecycling fließen die Maßnahmen Regenwassernutzung und das Grauwasserrecycling mit in die Bewertung ein.

Beim Bewertungskriterium Nährstoffrecycling wird der Parameter Phosphor in den Mittelpunkt gestellt. Phosphor gilt es durch technische Verfahren zurückzugewinnen und für die Düngemittelproduktion verwertbar zu machen. Es wird davon ausgegangen, dass technische Anlagen für Nährstoffrecycling nur bei großen Anschlussbelastungen wirtschaftlich umsetzbar sind. Bei dem Kriterium Energieeffizienz wird das Potenzial der Biogaserzeugung anhand der CSB-Fracht bilanziert.

Der Akzeptanzwert einer Maßnahme wird durch die Kriterien Bedienungskomfort, Betriebsaufwand, Geruch, Lärm, Anpassungsaufwand, Platzbedarf im privaten Bereich, Ungezieferbelastung und die Wohnumfeldverbesserung definiert.

Das Ergebnis der Optimierung wird aufgearbeitet, in Post-Processing-Schritten vervollständigt, im JSON-Format gespeichert und an das Visualisierungstool weitergegeben.

2.4 Visualisierungstool

Die Ergebnisse der bisherigen Optimierung können mithilfe der Kartendarstellung des integrierten Geoinformationssystems (basierend auf NASA World Wind) analysiert werden. Dabei werden die unterschiedlichen Haltungsarten, deren Material, Alter und Füllstände für jeden Zeitschritt der Optimierungsrechnung dargestellt. In dieser Darstellung werden die Freispielkanäle Mischwasser, Schmutzwasser, Grauwasser und Regenwasser sowie Regenrinnen und die Druckabflusssysteme Schmutzwasser, Mischwasser und Schwarzwasser unterschieden. Jede Haltung hat Informationen zum Bau- und Sanierungsjahr, der Haltungslänge, dem Durchmesser, der Schubspannung, den Füllständen, den Stoffströmen und den enthaltenen Fremd-, Grau-, Schmutz- und Regenwasserabflüssen hinterlegt. Mithilfe eines Schiebereglers ist es möglich die einzelnen Zeitschritte der Optimierung anzusteuern und die Transformation direkt zu beobachten. Außerdem sind im digitalen Geländemodell die *Siedlungseinheiten*, spezifische Maßnahmen und eine Vielzahl von Zusatzinformationen (z.B. Knotenpunkte, Flurstücksgrenzen, Wohngebäude) direkt erkennbar. Eine Ökonomieansicht ermöglicht eine detaillierte chronologische Ansicht über die Maßnahmenumsetzung, deren Kosten und Lebensdauern sowie eine Gebührenausswertung und die monetäre Pro-Kopf-Belastung. In der Ökologieansicht ist für jede Siedlungseinheit die prozentuale Bevölkerungsentwicklung, die Wohneinheitenentwicklung, die CSB-, N- und P- Emissionswerte sowie eine chronologische Übersicht der umgesetzten Maßnahmen aufgeführt. Außerdem werden alle Informationen zur Gruppenkläranlage gebündelt dargestellt.

3 ERGEBNISSE

Eine Auswertung der bisherigen Optimierungsergebnisse zeigt, dass sich die Ausprägungen der drei aufgestellten Szenarien der Bevölkerungs- und Siedlungsentwicklung nur gering auf die Transformationslösungen auswirken. Einen weitaus größeren Einfluss haben die Auswahl und die Gewichtung der Bewertungskriterien. Bei einer alleinigen Berücksichtigung des Bewertungskriteriums Kosten ist ein Beharrungsvermögen der bestehenden Abwasserinfrastrukturen bei gleichzeitiger Umsetzung von Regenwasserbewirtschaftungsmaßnahmen erkennbar. Dennoch lässt sich feststellen, dass in einzelnen *Siedlungseinheiten* eine Transformation von einer zentralen hin zur dezentralen Abwasserbehandlung vollzogen wird. Diese *Siedlungseinheiten* sind in den aufgestellten Szenarien besonders stark vom Bevölkerungsrückgang betroffen und befinden sich in Randgebieten der Siedlungskörper.

Bei einer hohen Gewichtung der Kosten und einer gleichzeitigen erhöhten Gewichtung der übrigen Bewertungskriterien werden vermehrt schrittweise, dynamisch vollzogene Systemwechsel als Lösung erzeugt. Eine solche Lösung erhält man beispielsweise bei der Optimierung einer einzelnen Gemeinde mit einer starken Gewichtung der Kosten und einer moderaten Gewichtung der Kriterien Wasserrecycling und Energieeffizienz. Dabei sind das Bestandsszenario, ein gleichbleibender Wasserbedarf, gleichbleibende Stromkosten, ein Bemessungsregen anhand von Kostra-Daten und eine zukünftige Kostenreduktion für die Umsetzung neuartiger Systemlösungen angesetzt. Bei der optimierten Lösung werden unmittelbar Muldenversickerungen umgesetzt und Rohrsanierungen sowie der Neubau von Kanälen durchgeführt. In den Jahren 2020 und 2045 wird jeweils eine einzelne Siedlungseinheit am Rande des Siedlungskörpers vom Schmutzwasserkanal abgetrennt und mit dezentralen Abwasserbehandlungssystemen ausgestattet. Ab dem Jahr 2050 wird ausgehend von der Kläranlage eine Transformation der restlichen *Siedlungseinheiten* durchgeführt, die im Jahr 2055 abgeschlossen wird. Dabei wird in diesen *Siedlungseinheiten* eine 2-Stoffstromtrennung etabliert. Das Grauwasser wird dezentral behandelt, das Schwarzwasser wird im Drucksystem zur Co-Vergärung auf der Gruppenkläranlage abtransportiert, das Regenwasser wird vermehrt in offenen Rinnen abgeleitet und an den ehemaligen Mischwasserüberläufen wird es in die vorhandenen Gewässer eingeleitet.

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Zur Lösung der komplexen Fragestellung mit einer Vielzahl von Variablen und Eingangsgrößen ist die mathematische Optimierung als Tool zur strategischen schrittweisen Erneuerung oder Transformation der Abwasserinfrastruktur geeignet. Dabei ist die Einteilung der Siedlungsstruktur in Siedlungseinheiten und eine Szenarienerstellung auf Mikroebene maßgebend für die Abfolge der Erneuerung, Anpassung oder Transformation, wobei die Ungewissheiten über das Spektrum der unterschiedlichen Entwicklungsszenarien sehr groß sind. Mit Hilfe der multikriteriellen Bewertung kann die Gesamtheit der Präferenzen abgebildet werden und durch die freie Kombinierbarkeit der Bewertungskriterien lässt sich eine repräsentative Auswahl an Lösungen erzeugen. Die Ergebnisse können von Planern, Ingenieuren und politischen Entscheidungsträgern in aktuelle Überlegungen bei Abwasserinfrastrukturprojekten im ländlichen Raum mit einfließen und als Entscheidungshilfe für langfristige, strategische Ausrichtungen bei der Infrastrukturentwicklung dienen. Der Bevölkerungsrückgang im ländlichen Raum erfordert eine aktive Gestaltung der Ortsentwicklung.

5 REFERENZEN

- Baron S., Holzhauser M., Schöffel S., Schwank J., Wölle J., Kaufmann Alves I., Schmitt T.G. (2015): Modelling Optimized Transformation Strategies of Urban Drainage Systems. Proceedings of the 10th International Conference on Urban Drainage Modelling, September, 2015, 20-23, Mont-Sainte-Anne, Québec, Canada
- Baron, S.; Hoek, J.; Kaufmann Alves, I.; Herz, S. (2016): Comprehensive scenario management of sustainable spatial planning and urban water services. IWA Publishing, Water Science & Technology, 73.5, 2016, 1141-1051
- Kaufmann Alves, I. (2012): Strategieentwicklung zur Integration ressourcenorientierter Abwasserbewirtschaftung durch mathematische Optimierung. Dissertation. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft. Kaiserslautern
- Schmitt, T. G.; Dilly, T. C.; Wölle, J.; Hoek, J. (2016): Entwicklungsszenarien für Transformationsräume in ländlichen Siedlungen. Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft, Lehrstuhl Stadtplanung. INIS Abschlusskonferenz. 20./21.04.2016. Berlin
- Worreschk, S.; Hoek, J.; Kaufmann Alves, I.; Herz, S.; Bellefontaine, R. (2015): Szenarien-Management für die Transformation von Wasserinfrastrukturen unter Berücksichtigung der Siedlungsentwicklung. DVGW energie | wasser-praxis 4/2015, 25-27