

# Energetische Optimierung von Trinkwassernetzen

Piet Hensel

*Neben dem klassischen Energie-Einsparpotential durch eine optimierte Auslegung der Pumpen kann der Energiebedarf in Trinkwassernetzen durch die gezielte Einrichtung zusätzlicher Druckzonen spürbar reduziert werden. Eine Optimierung der Pumpenfahrweise ermöglicht darüber hinaus eine deutliche Senkung der Energiekosten um bis zu 25 %.*

Energieeffizienz ist ein fester Bestandteil bei Planung und Betrieb von Trinkwassernetzen. Ein erster zentraler Ansatzpunkt der Wasserversorgungsunternehmen (WVU) zur Verbesserung der Energieeffizienz besteht in der Regel in dem Austausch älterer Pumpen durch neue (drehzahlgeregelte) Druckerhöhungsanlagen mit hohem Wirkungsgrad und an die Netzkennlinie angepasster Betriebsweise. Im Forschungsvorhaben ENERWA (gefördert vom BMBF im Rahmen der Programme FONA/NAWAM) wurden weitergehende Optimierungsansätze zur Verringerung des Energiebedarfs und der Energiekosten der Wasserverteilung entwickelt und an realen Netzen angewendet. Der Austausch bzw. die optimale Auslegung der Pumpen war nicht Bestandteil dieses Forschungsvorhabens, sondern wird als gegebene sinnvolle bzw. notwendige Vorarbeit angesehen.

Je nach Konfiguration des Netzes (bzw. der relevanten Druckzonen) bestehen unterschiedliche Optimierungsmöglichkeiten in der Wasserverteilung. In **Bild 1** sind die drei gängigsten und für die energetische Optimierung relevantesten Druckzonenschaltungen schematisch dargestellt.

Die Netze bzw. Druckzonen des Falls 1 werden durch Pumpen (also „von unten“) gespeist und haben keinen Netzgegenbehälter. Der Energiebedarf ist eine Funktion des Produkts aus Wasserabgabe und Förderhöhe. Die benötigte Druckhöhe orientiert sich also an dem Höhenprofil der Kunden. In solchen Druckzonen kann der Energiebedarf gesenkt werden, wenn die höchst gelegenen Kunden dezentral oder in ihrer eigenen Hochzone versorgt werden.

Die Druckzonen des Falls 2 werden ebenfalls von unten gespeist. Im Gegensatz zu Fall 1 wird jedoch gegen einen Hochbehälter gepumpt, was bedeutet, dass der Energiebedarf nicht durch eine Absenkung des Druckniveaus verringert werden kann, da das Druckniveau der Zone durch die Höhenlage des Behälters bestimmt wird. Die Speicherfunktion des Behälters eröffnet dem WVU jedoch eine andere Optimierungsmöglichkeit: die energetische Nutzung des Speichervolumens, um den zeitlichen Verlauf

des Pumpbetriebs unter Berücksichtigung zeitabhängiger Energiekosten anzupassen.

Die Druckzonen des Falls 3 weisen keinen Netzgegenbehälter auf und werden „von oben“ im freien Gefälle gespeist. Für sie fällt kein Energiebedarf für den Betrieb der Reinwasserpumpen an bzw. der Energiebedarf für die Behälterfüllung aus vorgelagerten Zonen lässt sich nicht steuern. Aus dem Höhenprofil der Druckzone bzw. der Höhenlage der Kunden kann es jedoch möglich sein, dass lokale Drucküberschüsse bestehen, die durch eine hydraulische Trennung und die Installation von neuen Turbinen im Netz oder den Ersatz von Druckminderungsventilen durch Turbinen energetisch genutzt werden können.

Für die beschriebenen drei Netzkonfigurationen wurden passende Optimierungsansätze entwickelt. In diesem Beitrag werden jedoch nur die Fälle 1 und 2 betrachtet. Ein weiterer Ansatz den Energiebedarf zu senken, indem man die Fließwiderstände durch die Verlegung größerer Nennweiten reduziert, wird ebenfalls nicht betrachtet, da dies im Regelfall unwirtschaftlich ist und eine Zunahme der Verweildauern nach sich zieht.

## Senkung des Energiebedarfs durch die Bildung neuer Hochzonen

Ziel der Bildung von Hochzonen ist die Absenkung des Einspeisedrucks der zentralen Reinwasserförderung auf ein Druckniveau, das für den Großteil der Kunden ausreichend ist. Kunden mit einem höheren Druckbedarf, die dann nicht mehr mit einem ausreichenden Druck (unter Berücksichtigung der Reibungsdruckverluste) versorgt würden, müssen hydraulisch getrennt und über zusätzliche Druckerhöhungsanlagen (DEA) versorgt werden. Die hydraulische Trennung führt zur Einrichtung von Hochzonen.

Das entwickelte Verfahren bildet ausgehend von dem Kunden mit dem höchsten Druckbedarf iterativ eine Hochzone, die durch den schrittweisen Anschluss des jeweils nächsten Druckschlechtpunktes kontinuierlich wächst. Topologieroutinen stellen dabei sicher, dass die ermittelte Hochzone nicht zu einer Abtrennung einzelner

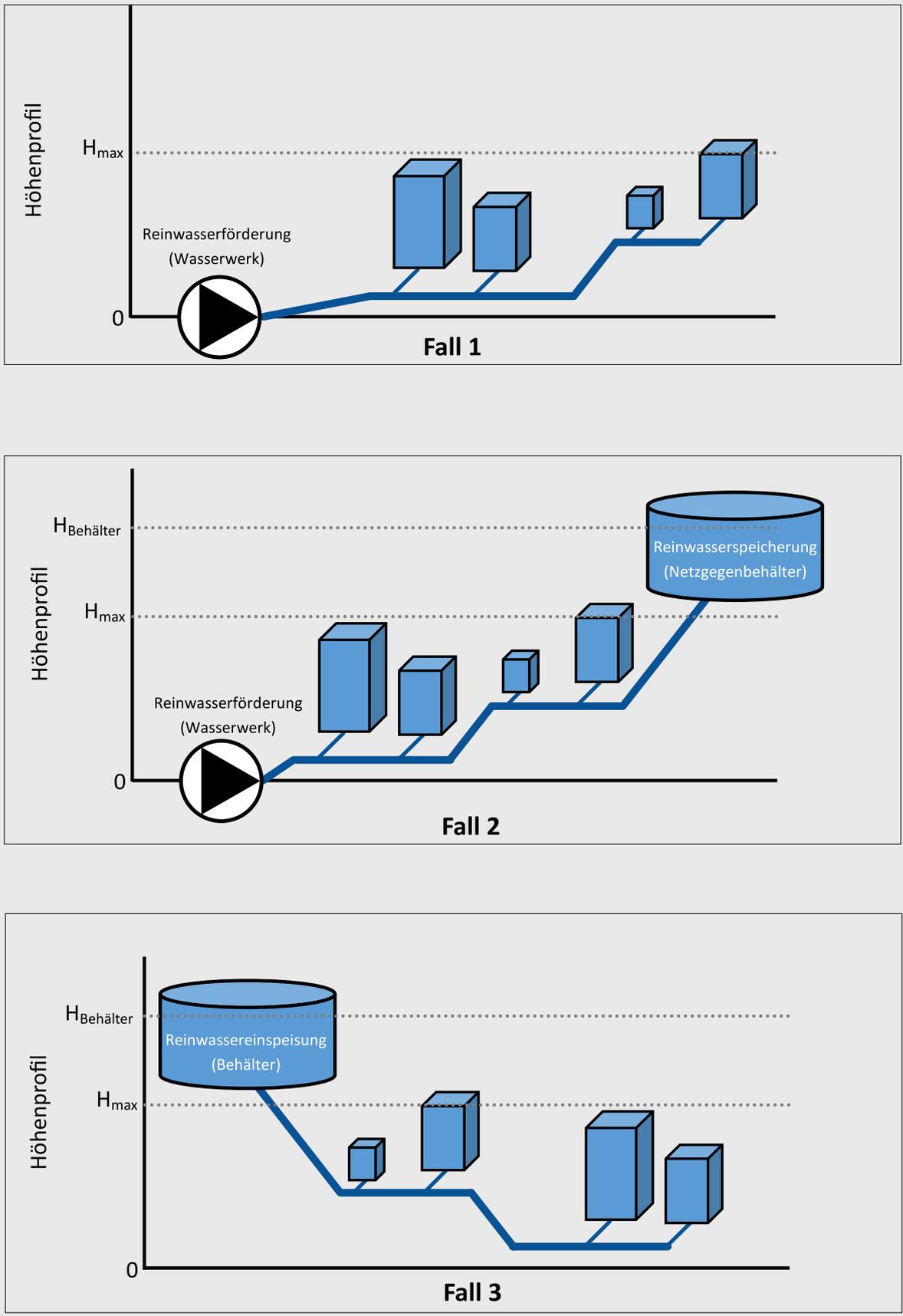
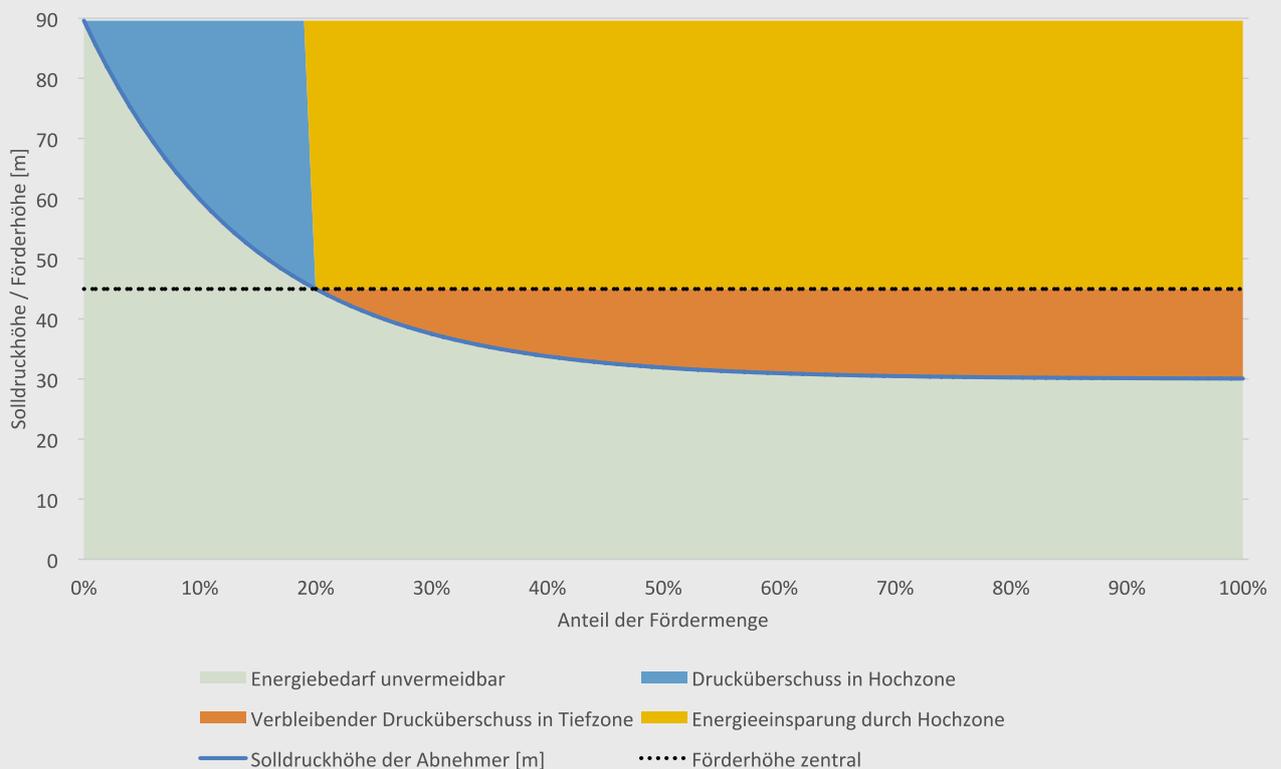


Bild 1: Schematische Darstellung der gängigsten Druckzonenschaltungen



**Bild 2:** Fördermenge eines Netzes absteigend nach der Solldruckhöhe (Geodätische Höhe + Gebäudehöhe) der Kunden

Netzbereiche führt, sondern sämtliche Kunden weiterhin versorgt werden können. Daher beinhaltet die Hochzone teilweise auch Kunden mit geringerem Druckbedarf. Mit zunehmender Größe der Hochzone kann die Förderhöhe der zentralen Reinwasserpumpen schrittweise gesenkt werden, wodurch der Energiebedarf der zentralen Druckerhöhung sinkt. Gleichzeitig steigt die Fördermenge der DEA für die Hochzone, wodurch der Energiebedarf dieser Pumpen steigt. Das energetische Optimum ist zunächst unbekannt, kann jedoch ex post bestimmt werden. Die mit der Einrichtung der neuen Hochzone einhergehende Verringerung der Drucküberschüsse, die zur Reduzierung des Energiebedarfs genutzt werden, geht schematisch aus **Bild 2** hervor.

Die Energieersparnis ist dabei zum einen abhängig von der Absenkung der zentralen Förderhöhe, zum anderen von dem Anteil der Fördermenge der Hochzone an der gesamten Fördermenge. Nur wenn die zentrale Förderhöhe deutlich gesenkt werden kann und die Fördermenge der Hochzone im Verhältnis gering ist, können signifikante Energieeinsparungen realisiert werden, die die Kosten für die Installation einer (oder mehrerer) zusätzlicher DEA für die Versorgung der Hochzone(n) decken.

In den untersuchten Netzen der Praxispartner lag die Energieeinsparung durch Absenkung des zentralen Druckniveaus zwischen 10 % (große Transportzone) und 60 % (kleine Verteilzone). In absoluten Zahlen kann der Ener-

giebedarf um ca. 45 MWh/a (kleine Verteilzone) bzw. ca. 950 MWh/a (große Transportzone) gesenkt werden. Die geringere absolute Energieeinsparung der Verteilzone ist auf die erheblich kleinere Fördermenge zurückzuführen. Bei Energiekosten von ca. 20 ct/kWh entspricht dies einer jährlichen Reduktion der Energiekosten von 9.000 € bzw. 190.000 €. Bei einem Kalkulationszinssatz von 3 % ergibt dies über eine technische Lebensdauer der DEA von 20 Jahren einen Barwert von ca. 135.000 € (kleine Verteilzone) bzw. 2,8 Mio. €. Dieser Barwert muss für eine Wirtschaftlichkeit der Maßnahme mindestens der Investition in die DEA zzgl. der abgezinsten Betriebskosten entsprechen.

## Senkung der Energiekosten durch zeitliche Verschiebung des Pumpetriebs

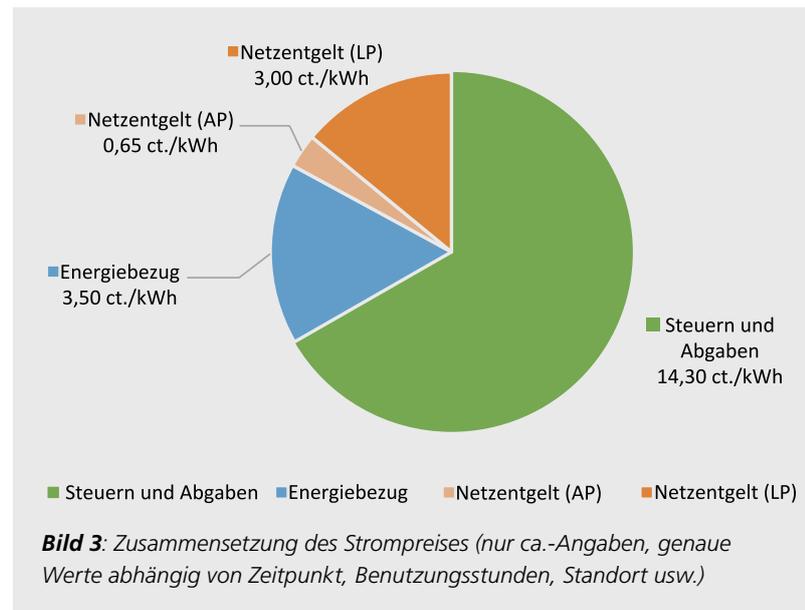
Mit steigendem Anteil volatiler erneuerbarer Stromerzeugung werden die Schwankungen der Strompreise am Spotmarkt langfristig zunehmen. Gleichzeitig wird zur besseren Integration der erneuerbaren Energieerzeugung das Demand-Side-Management, also die zeitliche Anpassung von Stromverbrauchern an die Stromerzeugung an Bedeutung gewinnen. Durch Nutzung der Speicherfähigkeit der Wasserbehälter können sich die WVU diese Entwicklung zunutze machen, um ihre Energiekosten zu senken. Dabei stehen ihnen drei Möglichkeiten offen:

1. Senkung der Strombezugskosten durch Verlagerung des Pumpbetriebs in Zeiten mit geringem Strompreis (Spotmarktpreis)
2. Reduktion der Netznutzungsentgelte durch Verringerung der Bezugsleistung in Hochlastzeiten (Atypische Netznutzung)
3. Erschließung von Erlöspotentialen durch Teilnahme am Regelenenergiemarkt

Für die ersten beiden Optionen, die auch kombiniert genutzt werden können, wurde ein allgemeines Gemischt-Ganzzahliges lineares Optimierungsmodell entwickelt, das die optimale Betriebsweise des Netzes bestimmt. Die Optimierungsaufgabe wird mit den Entscheidungsvariablen „zeitlicher Fahrplan (Durchfluss) des Pumpbetriebs“ und der Zielfunktion „Minimierung der Gesamtkosten“ unter Einhaltung versorgungstechnischer Randbedingungen formuliert. Aufgrund der hohen zeitlichen Auflösung sowie der komplexen hydraulischen Berechnung vermaschter Netze, wird die mathematische Optimierung der Fahrweise auf ein Ersatzmodell reduziert, das aus der Einspeisung (Reinwasserbehälter), der Netzkennlinie (Druckverlust als Funktion der transportierten Wassermenge) als ein virtueller Strang sowie dem Netzgegenbehälter besteht. Die Integration der Regelenenergiebereitstellung in das Optimierungsmodell ist vorgesehen, wird hier jedoch aufgrund der Stochastik des Regelenenergieabrufs ausgeklammert. Zu beachten ist bei einer dynamischen Fahrweise, dass konzentriertes Pumpen zu Zeitpunkten mit geringen Strompreisen aufgrund der quadratisch steigenden Reibungsdruckverluste zu einem steigenden Energiebedarf führt. Eine Optimierung der Betriebsweise muss diesen Effekt berücksichtigen, da sonst der steigende Energiebedarf die geringeren spezifischen Strombezugskosten überkompensieren kann. Dies ist umso mehr von Bedeutung, wenn man sich die Zusammensetzung des Strompreises vor Augen führt (siehe **Bild 3**). Selbst wenn 100 % des Strombezugs am Spotmarkt erfolgen, können bei heutiger Gesetzeslage lediglich ca. 15 % der Kosten des Strombezugs beeinflusst werden. Die verbleibenden 85 % beinhalten die Netzentgelte sowie Steuern und Abgaben. Durch die optimierte Fahrweise können in den betrachteten Beispielnetzen die reinen Energiebezugskosten (bei ausschließlicher Spotmarktbezug) gegenüber dem Status-Quo um ca. 20 % reduziert werden. Aufgrund des beschriebenen hohen Fixkostenanteils ist, bezogen auf die gesamten Strombeschaffungskosten, lediglich eine Kostensenkung von ca. 5 % möglich. Bei Preisganglinien, die für das Jahr 2035 prognostiziert werden, liegt die mögliche Kostenersparnis trotz einer höheren Volatilität nur geringfügig höher.

### Atypische Netznutzung

Zumindest kurzfristig gibt es eine wesentlich interessantere und einfachere Möglichkeit die Energiekosten zu senken. Diese besteht in der Reduktion der Netznutzungsentgelte durch die Vermeidung eines hohen Strombezugs während der vom Stromnetzbetreiber veröffent-



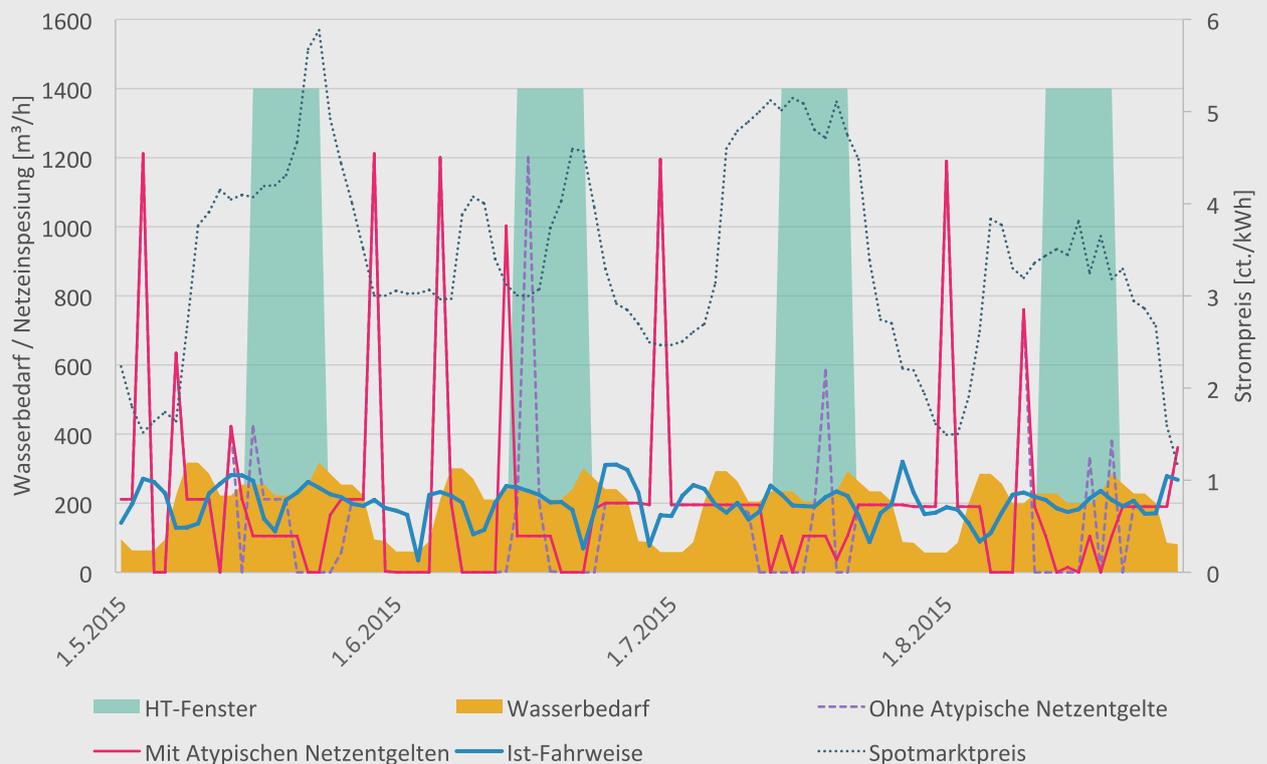
lichten Hochlastzeitfenster. Diese werden quartalsweise definiert und treten je nach Saison und Netzgebiet zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf.

Bei dieser sogenannten Atypischen Netznutzung (§ 19 Abs. 2 Satz 1 StromNEV) entfällt das Leistungsentgelt nur auf die während der Hochlastzeitfenster aufgetretene Jahreshöchstlast. Gelingt es, diese im Vergleich zur absoluten Jahreshöchstlast gering zu halten, können die Netzentgelte um bis zu 80 % reduziert werden. Diese Untergrenze ergibt sich aus der Zusammensetzung der Netzentgelte aus Arbeits- und Leistungspreis.

Folgendes Rechenbeispiel eines WVU mit einem Leistungsbedarf von 1 MW und einem Strombedarf von 3 GWh/a (= 3.000 Jahresbenutzungsstunden) verdeutlicht den monetären Effekt der atypischen Netznutzung. Bei regulären Netzentgelten fällt für das betrachtete WVU ein Arbeitspreis von 6,5 €/MWh und ein Leistungspreis von 83 €/kW x a) an, woraus sich jährliche Netzentgelte von 102.500 € (83.000 € Leistungspreis + 19.500 € Arbeitspreis) errechnen.

Sofern es das WVU schafft, seinen Strombezug während der Hochlastzeiten vollständig zu vermeiden, entfällt das Leistungsentgelt vollständig und die Netzentgelte reduzieren sich auf den Arbeitspreisanteil von 19.500 € (ca. -80 %). Würde die Höchstlast des WVU während der Hochlastzeitfenster lediglich um 50 % auf 500 kW reduziert werden, ergäbe sich eine Reduktion der Netznutzungsentgelte um immerhin 41.500 €/a (ca. -40 %).

**Bild 4** verdeutlicht diesen Effekt anhand der Optimierung eines realen Wassernetzes für das Jahr 2015. Die Ist-Fahrweise (blaue Kurve) ist relativ gleichmäßig und orientiert sich vorwiegend am Wasserbedarf und betrieblichen Aspekten (Sicherheitsreserve usw.). Die Hochlastzeitfenster werden nicht gesondert berücksichtigt, ebenso wenig der Spotmarktpreis. Die gestrichelte Kurve stellt die optimale Betriebsweise bei ausschließlicher Berücksichtigung



**Bild 4:** Optimierte Betriebsweise unter Berücksichtigung des Spotmarktpreises und atypischer Netznutzung

der Spotmarktpreise und Vernachlässigung der Netzentgelte dar. Zu Zeiten geringer Spotmarktpreise werden die Behälter innerhalb kurzer Zeit gefüllt, unabhängig davon, ob dies während der Hochlastzeitfenster oder nicht passiert. Die grüne Kurve wiederum entspricht dem Gesamtoptimum, das sowohl die zeitlichen Schwankungen des Strompreises berücksichtigt, als auch versucht, die Netzentgelte möglichst gering zu halten.

Bei Vernachlässigung der Netznutzungsentgelte in der Optimierung können die Energiekosten zwar um 4 % gesenkt werden, allerdings zu Lasten der Netzentgelte, die aufgrund neuer Bezugsspitzen so stark steigen würden, dass die Gesamtkosten um 18 % zunehmen würden. Unter Berücksichtigung der Netznutzungsentgelte und der Möglichkeiten zur atypischen Netznutzung ist hingegen eine Reduktion der Gesamtkosten um 24 % möglich, wobei knapp 4 % auf die Energiekosten (Spotmarktbezug) und ca. 20 % auf die Reduktion der Netzentgelte entfallen.

### Fazit

Im Rahmen des Forschungsvorhabens ENERWA wurden neue Optimierungsverfahren entwickelt, die es den WVU ermöglichen, ihren Energiebedarf zu senken und die Energiekosten zu reduzieren. Als flexible Verbraucher können sie zudem zukünftig an der verbesserten Integration fluktuierender erneuerbarer Stromerzeuger mitwirken.

Anhand realer Netz- und Betriebsdaten der Praxispartner wurde nachgewiesen, dass der Energiebedarf für die Versorgung der untersuchten Netze vor allem durch die gezielte Einrichtung neuer Hochzonen im Idealfall um bis 60 % gesenkt werden kann. Die Senkung der Energiekosten durch Lastverschiebung ermöglicht in den untersuchten Netzen ein vergleichsweise geringes Einsparpotential von ca. 5 % (bei vollständigem Strombezug am Spotmarkt). Eine deutlichere Senkung der Strombezugskosten um etwa 20 % ist bei der derzeitigen Gestaltung der Stromnetztarife durch Vermeidung eines hohen Strombezugs während der vom Stromnetzbetreiber veröffentlichten Hochlastzeitfenster möglich.

**SCHLAGWÖRTER:** Netzoptimierung, Trinkwassernetze, Einsparpotential, Energiekostensenkung, Druckzonen

### AUTOR



Dr. **PIET HENSEL**  
 Rechenzentrum für Versorgungsnetze Wehr  
 GmbH, Düsseldorf  
 Tel. +49 211 601273-04  
 hensel@rzvn.de