

Vulnerabilitätsmodellierung von Versorgungsinfrastruktur

Dipl.-Ing. Egbert Groß

Institut für Technologie und Management im Baubetrieb, Am Fasanengarten, Universität Karlsruhe (TH), 76128 Karlsruhe.

egbertgross@gmx.de

Telefon: 0721/5042565.

Kurzfassung

Für die Wasserversorgung als eine der so genannten kritischen Infrastrukturen wird ein Ansatz beschrieben, mit dem die etwaigen Auswirkungen betrieblicher Extremsituationen, Naturkatastrophen sowie der Folgen von Terror und Sabotage bezüglich der Häufigkeit und Dauer von Versorgungsunterbrechungen sowie der daraus entstehenden Kosten berechnet werden können.

An Hand eines Beispiels (Rohrbruch in Förderleitung) werden die für die Berechnung relevanten Alarm-, Reaktions-, Reparatur- und Normalisierungszeiten definiert und Hinweise zu den während des Ereignisses unterschiedlichen hydraulischen Systemen gegeben. Anschließend wird für die Verbrauchs- und Behälterfüllstandsganglinien sowie die vorhandene Steuerung die Zeit ermittelt, innerhalb der der für die Versorgung maßgebliche Hochbehälter leer gelaufen und damit die Wasserversorgung unterbrochen worden wäre.

Der Stand der Technik wird bezüglich vorhandener hydraulischer Simulationsmodelle, Bewertungssysteme für Rohrleitungen, Zuverlässigkeitsanalysen und Kostenansätze für Ausfälle und Schäden im Bereich der Wasserversorgung geschildert.

Die Vulnerabilitätsmodellierung umfasst zunächst die Berechnung von Häufigkeit, Dauer und Auftretenszeitpunkt von Versorgungsunterbrechungen sowie der betroffenen Gebiete.

Die dadurch der Bevölkerung sowie Gewerbe und Industrie etc. entstehenden Kosten können vom Anwender detailliert vorgegeben werden. Mit der Vulnerabilitätsmodellierung wird dann für eine Vielzahl möglicher Maßnahmen das Optimum hinsichtlich der aus Betrieb und Versorgungsunterbrechungen resultierenden Kosten gefunden.

Anmerkungen zu Betriebsorganisation und Naturkatastrophenszenarien runden die Arbeit ab.

Stichworte

Vulnerabilitätsmodellierung, Versorgungsinfrastruktur, kritische Infrastrukturen, Zuverlässigkeitsanalysen Wasserversorgung, hydraulische Systeme, Ausfallkosten, Naturkatastrophen.

Motivation

„Kritische Infrastrukturen sind Organisationen und Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden. Nur wenn kritische Infrastrukturen wie Transport und Verkehr, Energie, Gefahrenstoffe, Informationstechnik und Telekommunikation, Finanz-, Geld- und Versicherungswesen, Versorgung, Behörden, Verwaltung und Justiz, Sonstiges ohne wesentliche Beeinträchtigungen verfügbar bzw. vor weit reichenden Schäden geschützt sind, können Staat und Wirtschaft uneingeschränkt ihre Aufgaben erfüllen.“ (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik 2007). Zwischen den oben genannten kritischen Infrastrukturen bestehen intensive Wechselwirkungen (vgl. Peerenboom 2001). Obwohl in Ländern wie der Bundesrepublik Deutschland Ausfälle von Infrastruktureinrichtungen in der Regel auf wenige Stunden im Jahr begrenzt sind, können längerfristige Ausfälle möglich sein – verwiesen wird hier auf die Stromausfälle im Münsterland im November 2005 oder auf die Einschränkungen in der Wasserversorgung nach der Flutkatastrophe im Erzgebirge 2002.

Diese Arbeit richtet den Fokus auf die Vulnerabilität (Verletzlichkeit) der Trinkwasserversorgung. Trinkwasser ist das wichtigste Lebensmittel. Daher ist die Versorgung der Bevölkerung mit qualitativ einwandfreiem Trinkwasser in der erforderlichen Menge und mit ausreichendem Druck in entsprechenden Normen und Verordnungen geregelt (AVBWasserV 1980, DVGW¹ 2000). Neben Naturkatastrophen können auch Terroranschläge und Sabotage von Einrichtungen sowie der Ausfall zentraler Komponenten (Brunnen, Wasserwerke, Pumpstationen), Rohrbrüche in wichtigen Förderleitungen sowie ggf. Wartungs-, Reparatur-, Umbau- und Erweiterungsarbeiten zu Unterbrechungen in der Wasserversorgung führen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Programm zu entwickeln, mit dem Extremsituationen hinsichtlich Dauer und Häufigkeiten etwaiger Versorgungsunterbrechungen rechnerisch nachvollzogen, die dabei dem Wasserversorgungsunternehmen (WVU) und dessen Kunden entstehenden Kosten ermittelt und Maßnahmen zur Erhöhung der Versorgungssicherheit bewertet werden können. Dabei werden lediglich quantitative Aspekte betrachtet, d.h. auf Änderungen der Wasserqualität wird nicht eingegangen.

Beispiel Rohrbruch

Das geplante Vorgehen sowie die dabei zu bewältigenden Aufgaben werden an einem vereinfachten Beispiel eines tatsächlich aufgetretenen Rohrbruchs in einer Förderleitung mit einem Innendurchmesser von 250 mm (DN 250) veranschaulicht (vgl. Bild 1 auf der folgenden Seite).

Beschreibung des Beispiels

An einem Samstagmorgen gegen 2.30 Uhr ereignete sich an der in Bild 1 skizzierten Stelle ein Rohrbruch, durch den schlagartig etwa 110 l/s ausflossen. Das Personal des Bereitschafts-

¹ DVGW: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein.

dienstes (ein Mann in Rufbereitschaft) erhielt gegen 2.45 Uhr² die Meldung „Verbrauch in Zone 2 über Grenzwert“. Nach Ankleiden und Anreise zur Zone 2 wurde die knapp 3 km lange Trasse der Leitung DN 250 zwischen dem Bauwerk mit der Durchflussmessung und dem Hochbehälter (HB) 2 nach Wasseraustritten abgesucht. Auf Grund der besonderen Lage des Rohrbruchs in einem entlang eines Flusses verlaufenden Straßenabschnitt konnte sich das austretende Wasser einen Weg unter der Straße durch zur Flussböschung bahnen und war daher auf den aus dem Fahrzeug einsehbaren Straßen- und Geländeoberflächen nicht feststellbar. Der Rohrbruch konnte dann schließlich lokalisiert werden, indem der Diensthabende im Bereich des zum Fluss parallel verlaufenden Abschnitts in regelmäßigen Abschnitten das Fahrzeug verließ und dann plätscherndes Wasser hörte. Bis zum Schließen der betreffenden Absperrschieber waren 60 Minuten vergangen, der Wasserverlust zwischen 2.30 und 3.30 Uhr betrug etwa 400 m³ bei einem Hochbehälterinhalt von etwa 650 m³.

Ab etwa 4.00 Uhr waren mehrere Personen sowie ein Bagger vor Ort, um die Leitung zu reparieren. Diese konnte dann gegen 12.20 Uhr wieder in Betrieb genommen werden. Der Behälterwasserstand im HB 2 erreichte gegen 14.30 Uhr wieder die Hälfte des maximalen Wasserstands.

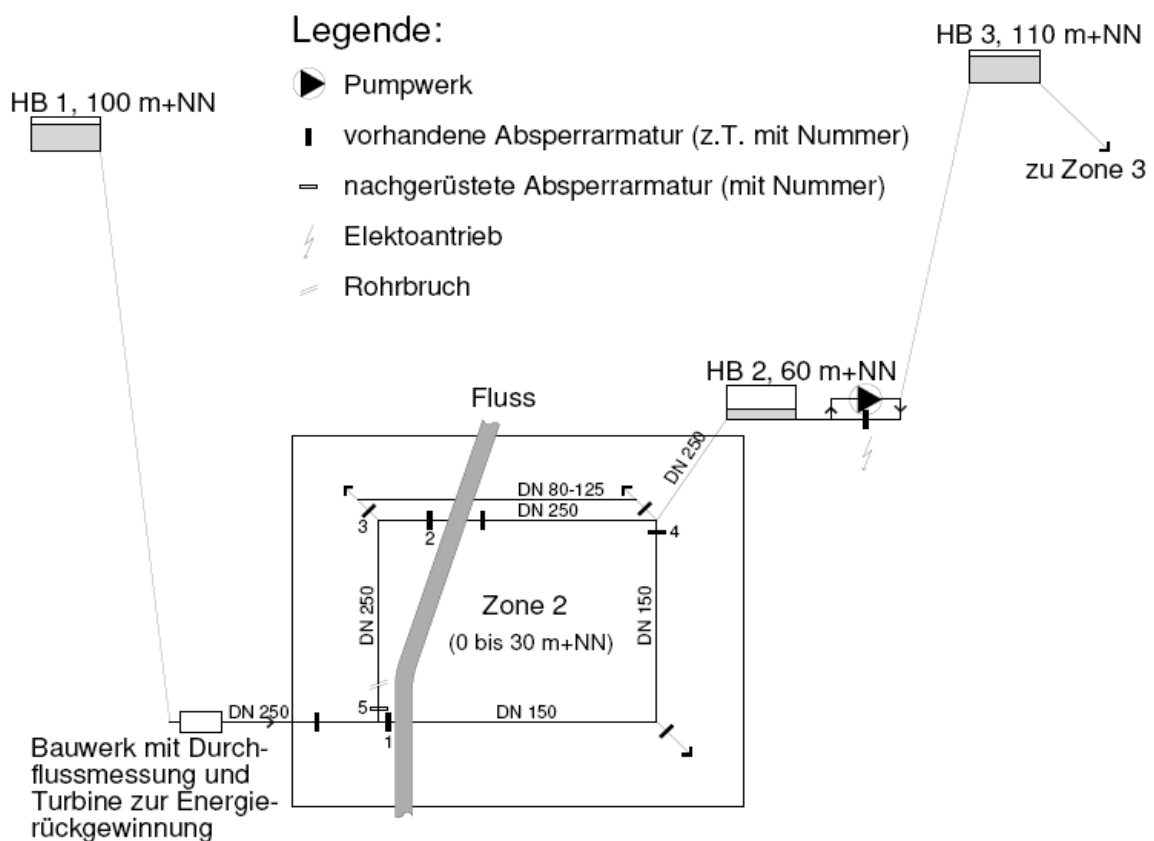


Bild 1: Schematische Darstellung des Beispielnetzes mit einem Rohrbruch in einer Leitung DN 250.

² Bei diesem WVU erfolgen Alarmmeldungen erst dann, wenn die Verbrauchsgrenzwerte länger als 15 Minuten überschritten werden. Dieses Vorgehen wurde gewählt, um die für jede Verbrauchszone separat wählbaren Grenzwerte möglichst gering einstellen zu können, ohne dass bei kurzzeitigen Verbrauchsspitzen Alarmmeldungen ausgegeben werden.

Während der Reparaturarbeiten konnte der HB 2 wegen der fehlenden Absperrarmatur Nr. 5 auf Bild 1 nicht über die Leitung DN 150 aus dem HB 1 befüllt werden, da Schieber 1 wegen des Rohrbruchs geschlossen werden musste. Ein Leerlaufen des HB 2 infolge des Wasserverbrauchs der Bevölkerung während der Reparaturzeit konnte jedoch verhindert werden, weil eine Rückspeisemöglichkeit aus HB 3 besteht.³

Definition Alarm-, Reaktions-, Reparatur- und Normalisierungszeit

Die **Alarmzeit** (im Beispiel 15 Minuten) umfasst den Zeitraum zwischen dem Ereignis und der Abgabe des Alarms und hängt stark von der Mess-, Steuer- und Regeltechnik (MSR) des Wasserversorgungssystems bzw. der betroffenen Zone ab. In Deutschland üblich sind Durchfluss- (Meldung bei Überschreitung eines Grenzwertes), Füllstands- (Meldung bei Absinken des Wasserspiegels unter einen Grenzwert) und Druckmessungen (Druck unterschreitet Vorgaben an ausgewählten Punkten im Netz) bzw. Kombinationen davon. Zusätzlich sind Hinweise aus der Bevölkerung zu beachten.⁴ Die **Reaktionszeit** umfasst die Zeit zwischen Erhalt des Alarms und der Einleitung erster Maßnahmen (im Beispiel 45 Minuten). Diese können von der Anlagensteuerung vollautomatisch oder bei zeitweise oder ständig besetzten Leitwarten ferngesteuert eingeleitet werden, sofern z.B. Armaturen mit entsprechenden Antrieben versehen sind. Vielfach ist bei Rohrbrüchen jedoch eine Anfahrt zum Ort des Ereignisses sowie ggf. sogar wie im oben geschilderten Beispiel das Ermitteln der Schadstelle und das anschließende manuelle Schließen der Absperrarmaturen erforderlich. Während der **Reparaturzeit** (im Beispiel nahezu 9 Stunden) müssen i.d.R. Geräte, Werkzeuge, Ersatzteile und zusätzliches Personal antransportiert, die Leitung repariert und wieder gefüllt werden. Alarm- und Reaktionszeit haben meist eine Dauer zwischen Sekunden bis zu einer oder einigen Stunden; für (zumindest provisorische) Reparaturen sind meist einige Stunden anzusetzen. In einigen Fällen besteht auch nach Ende der Reparaturarbeiten die Möglichkeit eines Systemversagens, wenn z.B. dann Zeiträume auftreten, in denen der Wasserverbrauch über der maximal möglichen Einspeisung in die Wasserbehälter einer Versorgungszone liegt. Die **Normalisierungszeit** (im Beispiel ca. 2 Stunden) kann ebenfalls mehrere Stunden andauern.

Auswertung des Beispiels

Da im Tagesverlauf sowohl der Wasserverbrauch als auch jeweils die Menge des in den Behältern gespeicherten Wassers variiert, wurde der zuvor geschilderte Rohrbruch an Hand der vor Ort realisierten Steuerung sowie der ortsüblichen Verbrauchsganglinie jeweils stündlich zur vollen Stunde angesetzt.

Der HB 2 wird vorrangig zwischen 21 und 6 Uhr (niedrigere Strompreise) sowie zwischen 6 und 9 Uhr, 11 und 13 Uhr und 17 und 18.30 Uhr befüllt. Während dieser Zeitspannen wird der Wasserspiegel ständig zwischen 3,50 und 4,00 Meter gehalten. In den sonstigen Zeiten wird bei Unterschreitung von 2,70 Meter Wasserstand der Behälter wieder auf dann aber nur 3,00 Meter gefüllt. Die Berechnungen erfolgten mit Ausgangsfüllmengen im HB 2 von minimal 463 bzw. 444 m³ (um 17 bzw. 21 Uhr) bzw. maximal 645 m³ (nachts) und einem Wasser-

³ Bei Normalbetrieb wird der HB 3 über das in HB 2 eingebaute Pumpwerk befüllt. Für Notfälle wurde jedoch der erwähnte Bypass geschaffen. Da bei sehr seltenen Fließrichtungswechseln Ablagerungen mitgerissen werden (Braunwasser), wird hier über die Steuerung automatisch einmal wöchentlich für einige Minuten die elektrisch angetriebene Armatur in HB 2 geöffnet, so dass Wasser aus HB 3 in den HB 2 zurückfließt.

⁴ Bei geringem Versorgungsdruck, Unterdruck, Entdecken von Wasseraustritten, bei Schäden wie Straßeneinbrüchen oder überfluteten Kellern kann es zu Meldungen aus der Bevölkerung kommen, wenn die Person, die entsprechende Feststellungen macht, das WVU informiert.

verbrauch zwischen 5,7 (zwischen 3 und 4 Uhr) und 56,6 m³/Stunde (zwischen 7 und 8 Uhr). Die Summe aus Alarm- und Reaktionszeit wurde unabhängig von der Tageszeit mit 60 Minuten angesetzt, daraus folgt ein rohrbruchbedingter Wasserverlust von 396 m³. Dieser beträgt zwischen 61 und 89% des bei Rohrbruchbeginn vorhandenen Speichervolumens. Daraus folgt bereits, dass die Alarm- und Reaktionszeit in diesem Beispiel erheblichen Einfluss darauf haben, ob der Rohrbruch zu einer Unterbrechung der Wasserversorgung führt.⁵

Die Befüllung des HB 3 aus dem HB 2 wurde zu den Zeiten berücksichtigt, in denen sie stattfindet – jedoch nur solange der HB 2 mehr als zu 50% gefüllt ist. Danach schaltet die Pumpe automatisch ab.

In nachfolgender Tabelle werden die bis zum vollständigen Leerlaufen des HB 2 ermittelten Zeitdauern ohne sowie mit Rückspeisung aus HB 3 dargestellt. Die Rückspeisung wurde während der 2. Stunde nach Ereignisbeginn mit 17,3 m³/h, während der 3. bis 8. Stunde mit 37,4 m³/h angesetzt. Dieser Ansatz entspricht exakt den Mengen, die während des tatsächlich stattgefundenen Ereignisses zurückgespeist wurden. Anschließend wurde keine Rückspeisung mehr angenommen, da die Kapazitäten des HB 3 ebenfalls endlich sind und dieser vorrangig der Versorgung der Zone 3 dient.

Tabelle 1: Ermittelte Zeitdauern bis zum Leerlaufen des HB 2 aus Bild 1 mit Simulation eines Auftretens des Rohrbruchs jeweils zur vollen Stunde. Die Spalten „Dauer 1“ wurde ohne, die Spalten „Dauer 2“ mit der oben beschriebenen Rückspeisung berechnet.

Rohrbr. (Uhr)	Dauer 1 (hh:mm)	Dauer 2 (hh:mm)	Rohrbr. (Uhr)	Dauer 1 (hh:mm)	Dauer 2 (hh:mm)	Rohrbr. (Uhr)	Dauer 1 (hh:mm)	Dauer 2 (hh:mm)
0	8:38	14:19	8	5:39	11:49	16	3:16	15:09
1	8:31	14:19	9	5:42	12:17	17	1:48	13:48
2	8:05	13:57	10	4:16	10:39	18	4:00	14:46
3	6:41	12:30	11	2:48	8:58	19	8:42	15:09
4	5:56	11:47	12	3:42	10:58	20	6:42	14:01
5	5:08	11:00	13	4:53	17:08	21	1:55	12:13
6	4:43	10:39	14	6:12	17:47	22	8:51	14:03
7	5:01	11:03	15	4:43	16:28	23	9:17	14:54

Tabelle 1 zeigt, dass die im schlechtesten Fall zur Reparatur zur Verfügung stehende Zeit (bezogen auf den Beginn des Rohrbruchs) durch die Rückspeisung von ca. 1 ¾ auf etwa 9 Stunden erhöht wird. Besonders zu beachten ist, dass bei der Variante ohne Rückspeisung weder ein Rohrbruch zur Zeit des höchsten Verbrauchs (zwischen 7 und 8 Uhr) noch ein Rohrbruch zum Zeitpunkt des geringsten Behälterinhalts (21 Uhr), sondern ein Rohrbruch um 17 Uhr am schnellsten zum Leerlaufen des HB 2 und damit zum Ausfall der Wasserversorgung führt. Dieses gilt entsprechend auch für die Variante mit Rückspeisung, bei der ein Rohrbruch um 11 Uhr maßgeblich wird.

Hydraulisch gesehen liegen zwei unterschiedliche Systeme vor: Vor Schließen der Armaturen neben der Wasserentnahme der Bevölkerung der Rohrbruch mit der maximal möglichen Ausflussmenge, verbunden mit erheblichem Druckabfall (evt. auch Unterdruck) in größeren Teilen der Versorgungszone. Anschließend durch die nach Schließen der Armaturen nicht mehr

⁵ Ohne die vor einigen Jahren installierte Durchflussüberwachung wäre der Alarm erst bei Unterschreiten eines Grenzwasserspiegels im Hochbehälter abgegeben worden. Bei einem üblichen Grenzwert von 50% des maximalen Wasserspiegels wäre der Hochbehälter dann 49 Minuten nach Abgabe des Alarms leer gelaufen gewesen.

nutzbaren Leitungsabschnitte ein völlig anderes hydraulisches Restsystem, hier mit der konkreten Randbedingung, dass der HB 2 nicht mehr auf dem üblichen Weg gefüllt werden kann.

Bei Betrachtung der Kostenseite stellen sich auf Grund des Beispiels u.a. Fragen bezüglich des finanziellen Nutzens der durchflussabhängigen Alarmierung sowie der Rückspeisemöglichkeit aus HB 3 in HB 2, durch deren Kombination ein Leerlaufen des HB 2 und damit eine Unterbrechung der Wasserversorgung vermieden wurde. Verallgemeinert kann man entsprechende Kosten- Nutzenrechnung für einen längeren Zeitraum von z.B. 20 Jahren sowie für die nach dem Rohrbruch ergänzte Absperrarmatur (vgl. Bild 1) anstellen.

Stand der Technik

Hydraulische Simulation

Für die hydraulische Simulation von Betriebszuständen von Trinkwasserversorgungsnetzen stehen diverse Netzanalyseprogramme zur Verfügung. Diese bilden das reale Netz mit Knoten und Strängen⁶ ab, berücksichtigen den Wasserbedarf innerhalb des Netzes, Einspeisungen, Pumpen, die Wasserspeicherung in Behältern und ermitteln die Flussverteilung im Netz sowie die Druckhöhen an den einzelnen Knoten. Mit nahezu allen Programmen können Tagesganglinien der Einspeisungen, des Pumpenbetriebs, der Verbräuche, Flussverteilungen und Druckhöhen berechnet werden. Spezialanwendungen sind in der Lage, weitergehende Fragestellungen wie Druckstoßberechnungen, Rohrbrüche, Wasserqualitätsuntersuchungen (konstant bleibender Parameter wie z.B. Härte oder Nitrat sowie veränderlicher Parameter wie z.B. Chlor) oder die oft komplexe Anlagensteuerung zu bearbeiten.

Stationäre Berechnungen bilden lediglich eine Momentaufnahme des Netzzustandes ab. Quasistationäre Berechnungen verketteten mehrere stationäre Berechnungen und berücksichtigen z.B. den zeitlichen Verbrauch im Laufe der Zeit, Einspeisungen aus Brunnen und Wasserwerke ins Netz sowie Zu- und Abflüsse der Speicherbehälter. Typische quasistationäre Berechnungen erfolgen z.B. über einen Verbrauchstag. Druckstoßberechnungen dagegen erfordern sehr kurze Berechnungsschritte während des Ereignisses.

Zur Verminderung der Rechenzeit sind Netzvereinfachungen sinnvoll bzw. erforderlich wie z.B. von Deuerlein (2006) beschrieben.

Obwohl in obigem Beispiel der Rohrbruch modelltechnisch lediglich an einem Strang auftrat, musste in der Praxis dennoch in 5 Strängen der Durchfluss unterbunden werden. Dies liegt daran, dass bei der Netzmodellierung die Knoten in aller Regel bei Verzweigungen, Änderungen des Leitungsdurchmessers, -werkstoffs etc., Entnahmepunkten oder Bauwerken gesetzt werden. Die Absperrarmaturen sind jedoch – wenn vorhanden – nahezu immer neben den Verzweigungen angeordnet. Sobald bei der Simulation von Rohrbrüchen die zu schließenden Armaturen vom Programm automatisch erkannt werden sollen, sind die Armaturen modelltechnisch wie z.B. von Walski et al. (2006) beschrieben zu berücksichtigen.^{7 8}

⁶ Stränge sind Leitungsabschnitte. An Strängen werden die Druckverluste und die Durchflüsse berechnet. Knoten begrenzen und verbinden die Stränge, an Knoten werden die Drücke ermittelt.

⁷ Nur so können mit vertretbarem Aufwand z.B. Rohrbrüche in allen Strängen ab einer festgelegten Nennweite (z.B. 150 mm) automatisch simuliert werden.

⁸ In der Praxis sind Absperrarmaturen z.T. schwergängig oder gar nicht mehr funktionsfähig; außerdem können sie je nach Lage im Verkehrsraum schwer oder gar nicht zugänglich (z.B. zugeparkt) sein. Diese Sachverhalte können ggf. zur Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit mit unterschiedlichen Kennungen berücksichtigt werden.

Bewertungssysteme für Wasserrohrnetze, Zuverlässigkeitsanalysen

Ziel der Bewertungssysteme (Mischner et al. 2006, siehe auch DVGW 2006a) ist, an Hand von Schadensstatistiken etc. den wirtschaftlich optimalen Zeitpunkt zur Erneuerung einer Rohrleitung anzugeben. Dabei werden die mit dem Alter ansteigende Häufigkeit von Rohrbrüchen und Leckagen⁹ einschließlich jeweils deren Reparaturkosten und Wasserverluste auf der einen Seite mit den Kosten für Leitungserneuerungen verglichen. Als Nebenbedingung gestatten einige Programme, die hydraulische Bedeutung einer konkreten Leitung mit in die Ermittlung des optimalen Rehabilitationszeitpunktes aufzunehmen. So gestatten z.B. die Programme Failnet-Reliab (Cemagref Bordeaux), RelNet (TU Brunn) und Aquarel (SINTEF Trondheim) die Ermittlung der betroffenen Gebiete, wobei lediglich bei Aquarel die Hochbehälterinhalte und eine durchschnittliche sowie maximale Reparaturzeit berücksichtigt werden können (vgl. Eisenbeis et al. 2002, 2003 und 2004).¹⁰

Kosten

Auf der Kostenseite werden die direkten Reparatur- und Erneuerungskosten für Rohrleitungen z.B. von den zuvor genannten Bewertungssystemen erfasst. Für die Maschinen- und Elektrotechnik liegen ebenfalls Berechnungsmethoden vor (vgl. DVGW 2006b).

Ein Ansatz der American Water Works Association (2002) unterscheidet zwischen den Kosten, die dem WVU direkt entstehen (Rechtsansprüche, Wasserverluste, Verkehrssicherung, Reparatur, Ersatzwasserversorgung, Ersatzanlagen), den regelmäßigen sozialen Kosten (Verkehrsstaus infolge von Rohrbrüchen und deren Reparatur, finanzielle Folgen der Versorgungsunterbrechung für die Kunden) sowie seltenen sozialen Kosten (Gesundheit, Überflutungsschäden an Gebäuden und Autos, fehlende Löschwasserversorgung). Sämtliche genannte Einzelkosten können mit Hilfe der beigefügten Exceldateien quantifiziert werden. Ohne Verknüpfung dieses Ansatzes mit einem hydraulischen Programm müssen z.B. die Anzahl der betroffenen Anwesen, Häufigkeit und Dauer der Versorgungsunterbrechungen etc. jeweils von Hand in die Excel-Dateien eingetragen werden. Dieses Vorgehen ist allenfalls bei Betrachtung einzelner Leitungen praktikabel. Sollen ganze Netze betrachtet werden, muss eine Koppelung an Programme erfolgen, die Zuverlässigkeitsanalysen ermöglichen.

Geplante Weiterentwicklung

Zielsetzung

Die „Allgemeinen Versorgungsbedingungen Wasser“ (AVBWasserV 1980) legen fest:

Das Wasserversorgungsunternehmen (WVU) ist verpflichtet, Wasser im vereinbarten Umfang jederzeit am Ende der Anschlussleitung zur Verfügung zu stellen. Dies gilt nicht soweit zeitliche Beschränkungen zur Sicherstellung der öffentlichen Wasserversorgung erforderlich oder

⁹ In diesem Zusammenhang sollen Rohrbrüche als Ereignisse betrachtet werden, bei denen der Wasserverlust so hoch ist, dass unverzügliche Reparatur erforderlich ist (hoher Wasserverlust, geringer oder fehlender Netzdruck). Als Leckagen werden dagegen kleinere Undichtheiten bezeichnet, die vorwiegend durch den ständigen Wasserverlust Kosten verursachen, wegen der Gefahr, dass bei anderweitigen Netzentleerungen an diesen Stellen Schmutz in die dann drucklose Leitung gelangen kann, aber gesucht und repariert werden müssen.

¹⁰ Programme wie Relnet, Aquarel und Failnet-Reliab ermitteln relativ pauschal den Anteil der Versorgungsunterbrechungen (z.B. 0,4%). Dabei werden weder die noch nutzbaren Behältervolumina noch die Tatsache berücksichtigt, dass z.B. der Ausfall einer Leitung lediglich tagsüber bei höherem Wasserverbrauch zu Versorgungsunterbrechungen führen kann.

sonst vertraglich vorbehalten sind und soweit und solange das Unternehmen durch höhere Gewalt oder sonstige Umstände, deren Beseitigung ihm wirtschaftlich nicht zugemutet werden kann, gehindert ist.

Daraus ergibt sich, dass eine hohe Versorgungssicherheit unter der Randbedingung der Wirtschaftlichkeit gefordert wird. Hier nicht explizit genannt, aber ebenfalls einzuhalten sind Randbedingungen bezüglich der Wasserqualität und der Nachhaltigkeit. Letztlich führt der Zielkonflikt zwischen hoher Versorgungssicherheit zu möglichst geringen Kosten dazu, dass bei nahezu allen betrieblichen Fragestellungen die möglichen Varianten entsprechend bewertet werden müssen.

Ermittlung von Häufigkeit und Dauer von Unterbrechungen der Wasserversorgung

Jedes Bauteil einer Wasserversorgung von der einzelnen Rohrleitung über Behälter, Pumpen, Armaturen, Maschinen- und Elektrotechnik sowie Stromversorgung und Telekommunikationsinfrastruktur haben jeweils spezifische Ausfallwahrscheinlichkeiten. Während Rohrbrüche jederzeit möglich sind, können gewisse Schäden z.B. an Pumpen nur während deren Betriebszeiten auftreten. Das Ausfallrisiko der Stromversorgung hängt z.B. von den unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten und der Witterung ab.

Ob der Ausfall eines Bauteils letztlich zu einer Unterbrechung der Wasserversorgung führt, ist beispielsweise abhängig vom Vorhandensein direkter Ersatzsysteme (z.B. bei Pumpen meist vorhanden), den Alarm-, Reaktions-, Reparatur- und Normalisierungszeiten, den Wasserverlusten infolge von Rohrbrüchen oder z.B. nach Ausfall der Steuerung überlaufenden Behältern, der Lage der vorhandenen (und funktionsfähigen) Absperrarmaturen und den in Notfällen einsetzbaren Ersatzsysteme (z.B. stationäre oder mobile Notstromaggregate, oberirdisch verlegbare Notleitungen, Rückspeisungen, Notbrunnen, Handsteuerungen entfernter Außenstationen).

Mit dem zu erstellenden Programm soll dann für jedes Bauteil, welches ausfallen kann, unter Beachtung der oben genannten Punkte berechnet werden, ob dessen Ausfall zu Einschränkungen oder Unterbrechungen der Wasserversorgung führt und in diesem Fall das betroffene Gebiet sowie die zugehörige Dauer ermittelt werden.

Die Berechnungen bauen auf einer quasistationären Berechnung des vorhandenen Systems auf, bilden die in der realen Anlage des WVU implizierte Steuerung ab und simulieren z.B. die Auswirkungen der Ereignisse jeweils zur vollen Stunde.

In den Berechnungen müssen z.B. bei Rohrbrüchen die Wasserverluste und der verminderte Netzdruck vor sowie das verbliebene Netz nach Schließen der Absperrarmaturen für die dann noch versorgten Kunden jeweils für unterschiedliche hydraulische Systeme berücksichtigt werden.

Setzt man für die einzelnen Bauteile Ausfallwahrscheinlichkeiten an, die z.B. für Rohrleitungen aus Programmen zu deren Rehabilitation (ggf. ergänzt um die Wahrscheinlichkeit der Beschädigung bei anderweitigen Bauarbeiten etc.) oder allgemein aus Schadensstatistiken (vgl. DVGW 1998) oder Literaturangaben entnommen werden können, so erhält man als Integral aus Ausfallwahrscheinlichkeiten und den Auswirkungen des Ausfalls letztlich für jeden Netzknoten Angaben über Häufigkeit und Dauer des Ausfalls der Wasserversorgung.

Die Darstellung besonders gefährdeter Gebiete zeigt ggf. schnell den Handlungsbedarf auf. Mittels einer getrennten Auswertemöglichkeit für die verschiedenen Tagesstunden können die Tageszeiten ermittelt werden, während der Schadensereignisse besonders häufig zu Proble-

men führen. Dies wird vielfach erste Hinweise für mögliche Gegenmaßnahmen geben, insbesondere, wenn Änderungen im Anlagenbetrieb bereits zu deutlichen Verbesserungen führen. Zur Verringerung der Rechenzeit sind geeignete Verfahren der Netzvereinfachung anzuwenden. Aus Vereinfachungsgründen wird für die Standardberechnungen angenommen, dass immer nur ein Bauteil gleichzeitig ausfallen kann. Außerdem können Ausfallberechnungen auch auf bestimmte Komponenten (z.B. Leitungen ab einem festzulegenden Mindestdurchmesser) vorgesehen werden.

Zur Berechnung konkreter Szenarien reicht es dann aus, die Ausfallwahrscheinlichkeit eines oder auch mehrerer gleichzeitig ausfallender Bauteile auf 1, die aller anderen Komponenten auf 0 zu setzen.

Durch diverse Modifikationen, z.B. von Alarm-, Reaktions- und Reparaturzeit, können z.B. die sich aus der konkreten Anlagensteuerung und –überwachung ergebenden maximalen Reparaturzeiten ermittelt werden. Im Falle unbefriedigender Ergebnisse können mögliche Abhilfemaßnahmen bzgl. deren Wirksamkeit untersucht werden. Zusätzlich können große Umbauten zuvor geplant werden; so kann z.B. der optimale Beginn von Umbauarbeiten und der dann zur Verfügung stehende Zeitraum ermittelt werden. Weiter werden Übungen oder Simulationen von Gefahrenereignissen ermöglicht. Tatsächlich aufgetretene betriebliche Sondersituationen oder Störfälle können nachvollzogen werden. Durch Änderung von Eingangsparametern können auch z.B. die Einflüsse der Witterung, der Wochentage, der Verfügbarkeit von Personal, Geräten und Ersatzteilen etc. bewertet werden.

Kosten

Die bestehenden Ansätze für Investitions- und Betriebs-, sowie Wartungs- und Reparaturkosten und der Kosten und Schäden, die das WVU betreffen, können übernommen werden.

Eine Berücksichtigung der durch Versorgungsunterbrechungen entstehenden Kosten für Industrie, Handwerk, Gewerbe, öffentliche Einrichtungen soll dem Anwender über geeignete Programmierung durch die Möglichkeit der Eingabe ihm geeignet erscheinender Parameter ermöglicht werden. Mit der geplanten Anbindung an ein Geoinformationssystem (GIS) können z.B. bei entsprechender Ortskenntnis für die einzelnen Knoten unterschiedliche Ansätze getroffen werden. So kann zwischen Wohnbevölkerung und Gewerbe/Industrie unterschieden und auch z.B. der zeitlich variable Wasserbedarf¹¹ berücksichtigt werden. Analog zum Ansatz der American Water Works Association (2002) wird die Möglichkeit vorgesehen, außer den zeitabhängigen auch von der Dauer der Versorgungsunterbrechung unabhängige Kosten (z.B. für Herunterfahren und Wiederinbetriebnahmen von Maschinen und Prozessen in der wasserabhängigen Industrie) zu berücksichtigen.

Bei Wohngebäuden können die Kosten¹² – zumindest in Industriestaaten mit eher geringen Unterschieden beim Wasserverbrauch innerhalb der Bevölkerung – ggf. vereinfacht proportional zu der Wassermenge, die nicht entnommen werden konnte, angesetzt werden.

Allgemein sind unangekündigte problematischer als angekündigte Versorgungsunterbrechungen, daher wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben, hier unterschiedliche Werte vorzugeben.

¹¹ So benötigt der Bäcker Wasser vorwiegend in den frühen Morgenstunden, der Friseur tagsüber, die Kneipe eher abends/nachts, der durchgehend produzierende Industriebetrieb rund um die Uhr.

¹² Ansätze sind vom Benutzer zu wählen. Im Umkehrschluss kann man auch fragen, welcher jährlichen Wasserpreiserhöhung ein Privathaushalt zustimmen könnte, wenn durch dadurch finanzierte Baumaßnahmen z.B. Anzahl oder Dauer der Versorgungsunterbrechungen um ein bestimmtes Maß reduziert werden könnten.

Vulnerabilitätsmodellierung

Mit der Vulnerabilitätsmodellierung werden die durch ein hydraulisches Netzanalyseprogramm ermittelten Häufigkeiten und Dauern von Versorgungsunterbrechungen mit den daraus resultierenden Folgekosten für das WVU und dessen Kunden zusammengeführt.

Als Ergebnisse erhält man die Bereiche des Versorgungssystems, in denen die Wahrscheinlichkeit von Versorgungsunterbrechungen besonders hoch sind, die Gebiete, in denen durch den zeitweisen Ausfall der Versorgung die höchsten Kosten entstehen, die Auswirkungen des Ausfalls von Bauteilen bzgl. Versorgungsunterbrechungen und Kosten und für die Knoten jeweils Angaben, bei welchen Ereignissen die Versorgung ausfallen kann.

Nach Erkennen der Schwachstellen eines Systems können mögliche Abhilfemaßnahmen untersucht werden. Letztlich ist dann die Maßnahme bzw. das Maßnahmenpaket zu wählen, wodurch mittel- bis langfristig die Summe der Kosten für das WVU und der der Allgemeinheit entstehenden Kosten minimiert wird.

Letztlich geht der vorgeschlagene Ansatz über das hinaus, was in den bisher vorliegenden Programmen zur Netzanalyse bzw. in Bewertungssystemen für Wasserrohrnetze möglich ist. So sollen die Auswirkungen von Maßnahmen zur Reduktion der Alarm-, Reaktions- und Reparaturzeiten sowie zur Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit von Komponenten (Leitungen, Pumpen etc., z.B. deren Ersatz) bewertet werden. Gleiches gilt für die Optimierung der Anlagensteuerung (hinsichtlich Energiekosten **und** Ausfallrisiko), Schaffung von Redundanzen, Anschaffung und Einsatz von Ersatzanlagen wie z.B. Notstromaggregaten und Maßnahmen wie z.B. die vorgestellten Rückspeisemöglichkeiten, die bei betrieblichen Extremsituationen die Wahrscheinlichkeit von Unterbrechungen der Wasserversorgung verringern.

Zusätzlich ist der Konflikt zwischen Wasserqualität (geringe Verweildauern in Wasserbehältern sowie geringe Leitungsdurchmesser sind anzustreben) und Versorgungssicherheit (Speicherung größerer Mengen in Behältern und insbesondere für die Löschwasserversorgung größere Leitungsdurchmesser) zu lösen. Falls beim Strombezug Hoch- und Niedrigtarifzeiten zu berücksichtigen sind, so gibt es ebenso Konflikte zwischen niedrigen Energiekosten (Betrieb von Pumpen etc. möglichst ausschließlich nachts, tagsüber Abwirtschaften des in Behältern gespeicherten Wassers) einerseits und hoher Versorgungssicherheit (Vorhalten ausreichender Behältervolumina) andererseits.

Anmerkungen bezüglich der Betriebsorganisation der WVU

Die Aufgabe der Wasserversorgungsunternehmen besteht darin, jederzeit die benötigte Trink- sowie oft auch Löschwassermenge mit ausreichendem Druck und in einwandfreier Qualität bei einem möglichst geringem Wasserpreis zu liefern, ohne die Instandhaltung der Anlagen zu vernachlässigen. Daraus resultierende Zielkonflikte umfassen z.B. Fragen der unternehmensinternen Ablauforganisation (z.B. Mehrspartenbetrieb, vgl. Fassnacht et al. 2006), der Vorhaltung von Personal, Geräten und Ersatzteilen, der Organisation des Bereitschaftsdienstes, der Vergabe von Arbeiten an Dritte bzw. des Zusammenschlusses kleinerer WVU, der Vorsorge für Sonderfälle wie größere Störfälle, Stromausfall, Naturkatastrophen, Terror und Sabotage. Angaben zur Organisation des Bereitschaftsdienstes sowie zur Vorbereitung auf Störfälle und Naturkatastrophen können den Arbeitsblättern und Hinweisen des DVGW (DVGW 2003, DVGW 2002) entnommen werden. Nicht zuletzt hat das Technische Komitee Wasser-

verteilung des DVGW das Risikomanagement als einen der künftigen Themenblöcke mit hoher Priorität definiert (Zenz et al. 2007).

Die im Rahmen der Betriebsorganisation in Frage kommenden Alternativen führen häufig außer auf der Kostenseite auch zu Konsequenzen bzgl. des Ausfallrisikos, z.B. durch dann andere Reaktions- und Reparaturzeiten.¹³

Ausfallberechnungen bei Naturkatastrophen-Szenarien

Diese Szenarien bauen berechnungstechnisch auf den oben beschriebenen betrieblichen Szenarien auf. Anlagen des WVU sind u.a. direkt betroffen bei Hochwasser (Überschwemmung von Brunnen oder Wasserwerken bzw. der Zerstörung von Brückenleitungen oder parallel zu Flüssen verlegten Leitungsabschnitten), Sturm (entwurzelte Bäumen reißen Strom- und Steuerkabel ab) und Erdbeben (zerstörte Leitungen, infolge von Bränden erhöhtem Löschwasserbedarf). Zusätzlich dazu ist ein großflächiger Ausfall der allgemeinen Infrastruktur (z.B. Strom, Telekommunikation, Verkehrswege) möglich.¹⁴

Im Vergleich zu den oben beschriebenen betrieblichen Szenarien sind die Annahmen für Alarm-, Reaktions- und Reparaturzeiten sowie ggf. Wasserbedarf zu ändern. So können Alarmmeldungen bei Ausfall von Telekommunikation und/oder betriebseigener Übertragungswege (Steuerkabel) nicht immer abgegeben werden, das Erreichen der Schadstellen sowie von Material und Geräten sowie Beschaffung nicht selbst vorgehaltener Ersatzteile ist unmöglich oder erschwert, Bagger etc. von Baufirmen werden für andere Arbeiten benötigt und sind nicht verfügbar; Reparaturtrupps der EVUs und Telekommunikationsfirmen sind überlastet; eigenes Personal ist ggf. verletzt oder aus anderen Gründen nicht verfügbar; Hilfe von Nachbarunternehmen ist nicht möglich, da diese selbst Schäden reparieren müssen.

In Schadensfällen (z.B. Rohrbruch) ist das sich ergebende Restnetz nach Schließen der noch zugänglichen Absperrarmaturen oft anders als bei normalen Verhältnissen. Wird z.B. von einem Hochwasser führenden Fluss eine Brücke mit angehängter Brückenleitung zerstört, so sind in der Regel die beidseits der Brücke im Vorlandbereich angebrachten Absperrarmaturen wegen Überflutung nicht mehr zugänglich, so dass wesentlich größere Gebiete abgesperrt und daraus folgend wesentlich mehr Armaturen geschlossen werden müssen.

In manchen Fällen (Bränden nach Erdbeben, Reinigungsarbeiten nach Hochwasserereignissen¹⁵) erhöhen Naturkatastrophen den Wasserbedarf.

Zusätzlich dazu sind die möglichen Maßnahmen der Katastrophenvorsorge (vgl. u.a. DVGW 2002) wie das Vollhalten der Wasserbehälter, ggf. vorbeugende Außerbetriebnahme besonders gefährdeter Leitungsabschnitte, vorbeugender Antransport von Geräten und Material zu voraussichtlichen Einsatzstellen und die Erhöhung des verfügbaren Personals – in jedem Fall oder in Variantenberechnungen – zu berücksichtigen.

Bei Katastrophenszenarien wird man eher den Ausfall bestimmter Bauteile vorgeben.

¹³ Ein simples Beispiel dafür wäre das Schließen eines Betriebshofes eines größeren WVU. Die Kosten für das WVU würden höchstwahrscheinlich sinken, Häufigkeit und Dauer von Versorgungsunterbrechungen z.B. durch längere Anfahrtszeiten von einem anderen Betriebshof steigen.

¹⁴ In manchen Fällen sind die Übergänge zwischen betrieblichen Szenarien und Naturkatastrophen fast fließend. Als sicher sehr extremes Beispiel wird ein Rohrbruch an einer schon im Sommer schwer zugänglichen Stelle in einem Steilhang im alpinen Raum bei 1-2 Meter Schneehöhe und einer Temperatur von -10°C angeführt.

¹⁵ So ergibt sich für jeden Schlauch, mit dem z.B. Straßen gereinigt werden, bei einer Entnahmemenge von 5 l/s (= 18 m³/h) und einer angenommenen Nutzungsdauer von 10 Stunden täglich ein Wasserbedarf von 180 m³/d. Dagegen verbrauchen 1.000 Einwohner mit einem spezifischen täglichen Wasserbedarf von 125 l lediglich 125 m³/d.

Bei einer interdisziplinären Bearbeitung von Großschadensereignissen z.B. in einer Forschergruppe, in der z.B. andere Fachleute Ausfälle der Strom-, Telekommunikations- und Verkehrsinfrastruktur untersuchen, kann das Programm die Auswirkungen (einschließlich des zeitlichen Verlaufs) auf die Wasserversorgung bestimmen bzw. während der Katastrophe dazu beitragen, die Reaktionen des WVU zur Schadensminimierung zu optimieren.

Literatur

- AVBWasserV Verordnung über Allgemeine Bedingungen für die Versorgung mit Wasser vom 20. Juni 1980. <http://www.gesetze-im-internet.de/avbwasserv/index.html>. Zitiert am 22.05.07.
- American Water Works Association (AWWA), AWWA Research Foundation (2002) Costs of Infrastructure Failure.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik <http://www.bsi.de/fachthem/kritis/index.htm>. Zitiert am 25.05.07.
- Deuerlein J. (2006) Efficient supply network management based on linear graph theory, Fachbeitrag auf dem 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium; Cincinnati, Ohio, USA.
- DVGW¹⁶ (1998) DVGW-Merkblatt W 395 „Schadensstatistik für Wasserrohrnetze“.
- DVGW (2000) DIN 2000 „Zentrale Trinkwasserversorgung; Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen; Technische Regel des DVGW“.
- DVGW (2002) DVGW-Hinweis W 1050 „Vorsorgeplanung für Notfälle in der öffentlichen Trinkwasserversorgung“.
- DVGW (2003) DVGW-Arbeitsblatt GW 1200 „Grundsätze und Organisation des Bereitschaftsdienstes für Gas- und Wasserversorgungsunternehmen“.
- DVGW (2006a) DVGW-Arbeitsblatt W 400-3 „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 3: Betrieb und Instandhaltung“.
- DVGW (2006b) DVGW-Merkblatt W 618 (Entwurf) „Lebenszykluskosten für Förderanlagen in der Trinkwasserversorgung“.
- Eisenbeis P., Le Gat Y., Poulton M. (2002) Schadensvorhersagemodelle und hydraulische Zuverlässigkeitsmodelle als Entscheidungshilfe bei der Sanierung – Fachbeitrag auf der 1. CARE-W Konferenz Computergestützte Rehabilitation von Wassernetzen CARE-W, Dresden, Deutschland, 101-111.
- Eisenbeis P., Laffrèchine K., Le Gauffre P., Le Gat Y., Røstum J., Tuhovcak L., Valkovic P. (2003) WP2 Description and Validation of technical tools D4 Report on Tests and Validation of Technical Tools. <http://www.care-unife.it/pdf/D3.pdf>. Zitiert am 10.05.2007.
- Eisenbeis P., Poulton M., Laffrèchine K., Le Gauffre P. (2004) WP2 Description and Validation of technical tools D5 Guidelines for the use of technical tools. <http://www.care-unife.it/pdf/D5.pdf>. Zitiert am 10.05.2007.
- Fassnacht A., Hannemann H., Hildebrandt R., Schiffmann L., Tietke D., Schulz W. (2006) Erwerb, Sicherung und Ausbau der Mehrspartenqualifikation. – energie wasser-praxis 11/2006:50-53.
- Mischner J., Roscher H. (2006) Vergleich von Bewertungssystemen für Wasser- und Gasrohrnetze. – energie wasser-praxis 3/2006:80-85.
- Peerenboom J. (2001) Infrastructure Interdependencies: Overview of Concepts and Terminology. NSF Workshop, June 2001. http://pnwer.org/pris/peerenboom_pdf.pdf. Zitiert am 10.05.2007.
- Walski, T.M., Weiler, J.S., Culver, T. (2006) Using criticality analysis to identify impact of valve location. – Fachbeitrag auf dem 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA.
- Zenz, T., Gröschl F. (2007) Betriebliche Themenstellungen im Fokus. - energie wasser-praxis 4/2007:69.

¹⁶ DVGW: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e.V. Technisch-wissenschaftlicher Verein.