

Kalibrierung von Rechenetzmodellen

anhand probabilistischer Bayes'scher Verfahren

Quelle: RBS wave GmbH

Rohrnetzmodellierungen sind ein unverzichtbares Werkzeug, um den **Betrieb eines Rohrnetzes** zu optimieren und konkrete Aufgabenstellungen zu lösen: So können mittels Modellierung z. B. Druck- und Strömungsverhältnisse im Rohrnetz definiert werden. Um präzise Ergebnisse erzielen zu können, ist zuvor jedoch eine Kalibrierung bzw. Anpassung des Rechenetzmodells an die Realität notwendig. In diesem Beitrag wird ein neu entwickeltes Instrument zur probabilistischen Bewertung vorgestellt, das den **Kalibrierungsprozess von Rechenetzmodellen** unterstützt.

von: Juan Salgado, Dr.-Ing. Sergey Oladyshkin (beide: Universität Stuttgart), Dr.-Ing. Esad Osmanovic & Fabian Janotte (beide: RBS wave GmbH)

Ein **Rechenetzmodell** ist ein leistungsfähiges Tool, das von Ingenieur- und Planungsbüros sowie Versorgern sowohl in der Planung als auch im täglichen Praxisbetrieb genutzt wird.¹ Um ein solches Modell korrekt verwenden zu können, ist es jedoch zunächst notwendig, es zu kalibrieren – d. h. die physikalischen und betrieblichen Parameter des bestehenden Rohrnetzsystems zu bestimmen.

¹ Der Beitrag ist ein Auszug der Masterthesis von Juan Salgado.

Die Kalibrierung von Rechenetzmodellen ist einer der entscheidenden Schritte bei der Analyse von Rohrnetzsystemen. Eine falsche Annahme von Kalibrierungsparametern kann beispielsweise zu einem falschen Verständnis des tatsächlichen Verhaltens des Rohrnetzsystems führen. Abhängig von der Komplexität des Systems und den verfügbaren Informationen, kann die Annahme von Kalibrierungsparametern zu einer herausfordernden Aufgabe werden. Darüber hinaus hängt der Kalibrierungsprozess nicht

nur von der Annahme spezifischer Parameter (z. B. der Rauheit der Leitungen) ab, sondern auch von der erfolgreichen Identifizierung von Rohrnetzfehlern, wie z. B. (teil-)geschlossenen Schiebern, Inkonsistenzen mit den Basisinformationen (z. B. Planwerksfehler), dem Innendurchmesser oder der Verfügbarkeit von Daten.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes der RBS wave GmbH und der Universität Stuttgart wurde ein Instrument zur probabilistischen Bewertung entwi-

Stark, stabil, steckbar

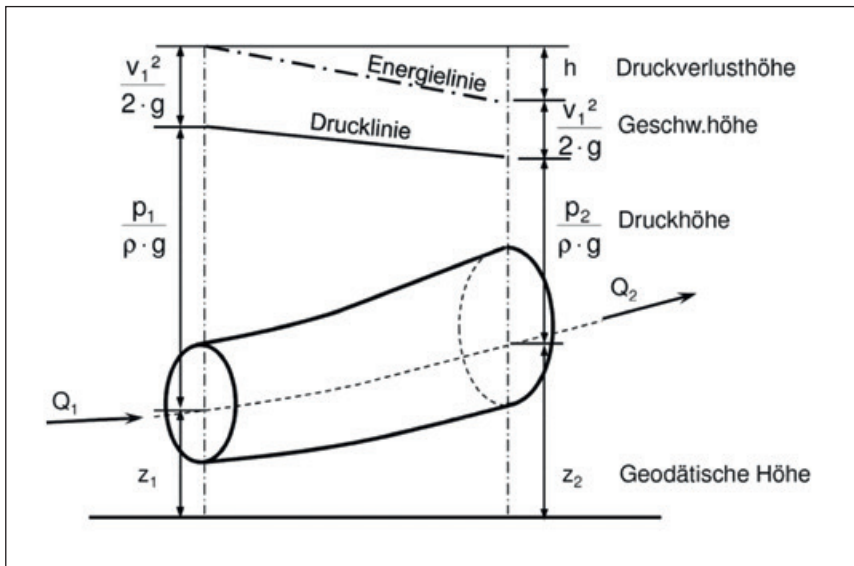


Abb. 1: Druckverluste in geraden Rohren

ckelt, das den Kalibrierungsprozess von Rechnernetzmodellen unterstützt. Mit dem neuen Konzept liefern die Autoren Informationen für die Annahme der primären Kalibrierungsparameter und für die Identifizierung von Rohrnetzeigenschaften. Es zielt darauf ab, einen methodischen Kalibrierungsprozess zu entwickeln, der den Rahmenbedingungen des DVGW-Arbeitsblattes GW 303-1 folgt.

Physikalische Grundlagen der Rohrnetzmodellierung

Die Rohrwandrauheit hat einen großen Einfluss auf die Bewegung von Fluiden in Leitungen. Berücksichtigung findet in diesem Zusammenhang auch die Reynoldszahl (Re), die ihrerseits die kinematische Zähigkeit enthält und den Vorzug hat, eine dimensionslose Zahl zu sein. Als charakteristischer Wert bei Kreisrohren wird der Durchmesser eingesetzt. Die Bewegung des Fluides ist abhängig vom jeweiligen Fließzustand (laminar = gleitend, turbulent = strömend oder schließend). Bei der Rohrnetzberechnung ist es deshalb wichtig festzustellen, welche Bewegungsform vorliegt; die Grenze zwischen beiden Fließformen liegt bei $Re = 2.320$.

Bei realer stationärer Rohrströmung (Abb. 1) entstehen durch Reibung kontinuierliche Druckhöhenverluste (h) von

$$h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

mit h = Druckhöhenverlust [L]

λ = Reibungsbeiwert [-]

L = Rohrlänge [L]

D = Durchmesser [L]

v = Geschwindigkeit [L/T]

g = Erdbeschleunigung [L/T²]

Der Reibungsbeiwert (λ) hängt dabei vom Strömungszustand ($Re < 2.320$ – laminar, $Re > 2.320$ – turbulent) und der relativen Rauheit des Rohres ab.

Strömungszustand und Reynoldszahl (Re)

Welcher Strömungszustand (laminar oder turbulent), d. h. welche Geschwindigkeitsverteilung im Rohrquerschnitt vorherrscht, wird durch die Reynoldszahl gekennzeichnet:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (2)$$

mit Re = Reynoldszahl [-]

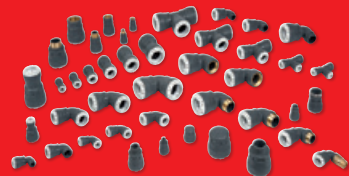
ν = kinematische Viskosität [L²/T]

v = Geschwindigkeit [L/T]

D = Durchmesser [L]

Reibungsbeiwert (λ)

Der Reibungsbeiwert hängt vom Strömungszustand (bestimmt über die Reynoldszahl) und der relativen Rauheit (bestimmt über die Rauheit und den Durchmesser) des Rohres ab (Tab. 1). Er lässt sich über Formeln in Tabelle 2 ermitteln.



PLASSON Steckfittings Serie 19

Das Programm, mit dem Sie auf der sicheren Seite sind.

Unter www.plasson.de erhalten Sie weitere Informationen!

PLASSON
Mensch · Produkt · Service

Die genannten Betrachtungen über die Widerstände in Rohren beziehen sich nur auf gerade Rohrstränge. Die meisten Leitungen bestehen jedoch aus Strängen mit unterschiedlichen Querschnitten, die zudem ihre Richtung ändern und mit Vorrichtungen zur Regelung des Durchflusses und zum gänzlichen Absperren versehen sind. Hierdurch treten besondere Widerstände (lokale Druckhöhenverluste) auf, die sich durch einen Druckabfall bemerkbar machen. Derartige Widerstände entstehen z. B.

- beim Eintritt des Wassers aus einem Behälter in ein Rohr,
- bei der Änderung der Richtung einer Leitung,
- bei der Änderung des Querschnitts einer Leitung,
- bei Einbauten im Rohr (Schieber, Klappen, etc.) und
- bei Austritt des Wassers aus einem Rohr in einen Behälter oder ins Freie.

Wie beim Widerstand des geraden Rohrstranges werden auch diese Widerstände als Funktionen der Geschwindigkeitshöhe angesetzt:

$$h_l = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

mit h_l = lokaler Druckverlust [L]
 ζ = Koeffizient für lokalen Widerstand [-]
 v = Geschwindigkeit [L/T]
 g = Erdbeschleunigung [L/T²]

Der Koeffizient (ζ) beschreibt die Form des durchströmten Bauteils und kann Tabellenwerken entnommen werden. Bei der Rohrnetzmodellierung ist, neben anderen Modellparametern, der Einsatz der integralen Rauheit als Modellrauheit von besonderer Bedeutung. Die integrale Rauheit berücksichtigt tatsächliche Innendurchmesser, die Rauheit der Rohre und lokale Verluste. Die Ermittlung der integralen Rauheit ist nur durch die Kalibrierung eines Rechnernetzmodells möglich.

Vorgehensweise einer Rohrnetzbe-rechnung

Abbildung 2 zeigt fünf wesentliche Bausteine einer Rohrnetzmodellierung. Deren Zielsetzung ist es, die hydraulische Leistungsfähigkeit eines Rohrnetzes eindeutig zu bestimmen, Schwachstellen zu identifizieren und den notwendigen Handlungsbedarf für den Netzbetreiber aufzuzeigen. Insbesondere die Rohrnetzanalyse, bei der

das Rechnernetzmodell durch eine Druck- und Durchflussmessung sowie eine anschließende Vergleichsberechnung (Vergleich von gemessenen Druckverlusten im Rohrnetz und gerechneten Druckverlusten im Rechnernetzmodell) an die realen Verhältnisse angepasst wird – man spricht auch von der Kalibrierung eines Rechnernetzmodells –, spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da die Ergebnisse direkt in die Rohrnetzberechnung einfließen.

Eine Rohrnetzanalyse besteht aus zwei Phasen: einer Vergleichsmessung (Druck- und Durchflussmessung) und einer zugehörigen Vergleichsberechnung (Kalibrierung eines Rechnernetzmodells). Das DVGW-Arbeitsblatt GW 303-1 fordert z. B. während der Messung einen Druckabfall im Wasserrohrnetz von mindestens 20 Prozent des Ruhedrucks oder mindestens 1,5 bar und gibt für die erforderliche Anzahl der Messpunkte Anhaltswerte in Abhängigkeit von der Netzlänge an.

Für die Auswertung der Druck- und Durchflussmessungen ist es entscheidend, dass die Randbedingungen während der Messung bekannt sind. Deshalb müssen während des Messvorgangs die künstlichen Entnahmemengen an den Standrohren, der Wasserverbrauch im Netz sowie der Wasserverbrauch der Großkunden protokolliert werden. Die dabei gewonnenen Daten können heute zu einem großen Teil über ein Leitsystem erfasst und ausgegeben werden. Falls kein solches Leitsystem vorhanden ist, sollten diese Daten dennoch manuell erfasst werden. Die Druckverhältnisse während den Messungen werden über die im Netz verbauten und mit einem Datenspeicher ausgestatteten Druckmessgerät aufgezeichnet.

Bei der Vergleichsberechnung werden die vor Ort durchgeführten Messungen im Wasserrohrnetz im Rechnernetzmodell simuliert, an den Messpunkten ergeben sich die errechneten Druckverluste. Anhand der Abweichungen von errechneten zu gemessenen Druckverlusten kann die betriebliche

Tabelle 1: Reibungsbeiwert

Strömungszustand	Bereich	Abhängigkeit Reibungsbeiwert
Re < 2.320 (laminar)	-	Re
	hydraulisch glatt	Re (k < viskose Unterschicht)
Re > 2.320 (turbulent)	Übergangsbereich	Re, k/D
	hydraulisch rau	k/D (k > viskose Unterschicht)

Quelle: KIT

Tabelle 2: Formelermittlung des Reibungsbeiwertes

Strömungszustand	Ermittlung Reibungsbeiwert
Re < 2.320 (laminar)	$\lambda = \frac{64}{Re}$ Hagen-Poiseuille
Re > 2.320 (turbulent)	
hydraulisch glatt	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \cdot \frac{Re \cdot \sqrt{\lambda}}{2,51} = 2 \lg \cdot (Re \cdot \sqrt{\lambda}) - 0,80$ Prandtl-Kármán
Übergangsbereich	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \cdot \left(\frac{2,51}{Re \cdot \sqrt{\lambda}} + \frac{k}{D \cdot 3,71} \right)$ Prandtl-Colebrook
hydraulisch rau	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \cdot \frac{3,71 \cdot D}{k} = 1,14 - 2 \lg \cdot \frac{k}{D}$ Prandtl-Kármán

Quelle: KIT

Kompakt, Kompromisslos, Klasse



PLASSON Klemmfittings
Serie 18

Vielfältige Anschlussmöglichkeiten
sind auch bei diesem Programm
selbstverständlich.

Lassen Sie sich überzeugen!

PLASSON
Mensch · Produkt · Service

PLASSON GmbH

Krudenburger Weg 29
46485 Wesel

Telefon: 0281 / 952 72-0

Telefax: 0281 / 952 72-27

E-Mail: info@plasson.de

Internet: www.plasson.de

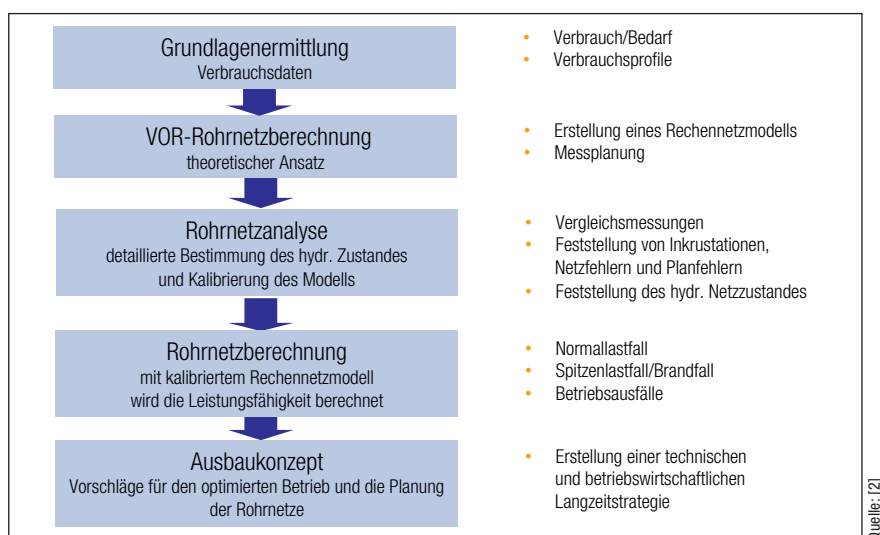


Abb. 2: Wesentliche Bausteine einer Rohrnetzmodellierung

Rauheit der Leitungsabschnitte über eine sogenannte Vergleichsberechnung ermittelt und die Reduzierung der Leistungsfähigkeit genau bestimmt werden.

In der Vergleichsberechnung wird durch systematisches Verändern der Eingabedaten des Netzmodells eine Anpassung der gerechneten an die gemessenen Druckverluste vorgenommen. Die Messvergleichsberechnung wird erst dann beendet, wenn eine weitgehende Übereinstimmung der Druckverluste von Messung und Berechnung erzielt ist. Hohe Differenzen zwischen dem gerechneten und dem gemessenen Druckverlust weisen auf Netzfehler, wie z. B. geschlossene oder teilgeschlossene Schieber, und Fehler im Planwerk hin.

Zielvorgabe des vorgestellten Forschungsprojektes ist es, die Vergleichsmessungen und die zugehörigen Vergleichsberechnungen unter Anwendung

des Bayes'schen Verfahrens (Probabilistische Identifikation) zu optimieren.

Stochastische Kalibrierung eines Rechnernetzmodells

Das entwickelte Konzept wird nach stochastischen Prinzipien der Monte-Carlo-Simulation (**Abb. 3**) durchgeführt. Dabei werden verschiedene Kombinationen von Kalibrierungsparametern (z. B. betriebliche Rauheit) ausgewertet, um die Messdaten so genau wie möglich zu replizieren. Im Projekt wurden die Grenzwerte mithilfe der Erfahrungswerte in **Tabelle 3** festgelegt, die hauptsächlich auf Basis des Rohrmaterials und – wenn möglich – auf Basis des Baujahres definiert werden.

Das Grundprinzip der Bayes'schen Statistik besteht darin, die posteriore Verteilung der unbekannten Parameter sowohl anhand der Daten als auch einer vorherigen Wahrscheinlichkeitsdichte für diese Parameter zu erzeugen. Die Bayes'sche Statistik liefert ein umfassenderes Bild über die Schätzung der Unsicherheiten der unbekannten Parameter. Das Bayes-Theorem ist eine nützliche Methode, um unbekannte Parameter anhand von Messdaten zu bestimmen, jedoch Unsicherheiten bei den Daten und bei den im Bayes'schen Rahmen durchgeführten Schätzungen. Daher wird für den Hypothesentest die Likelihood-Estimationsgleichung verwendet.

Tabelle 3: Betriebliche Rauheit (kb) nach Rohrmaterial

Rohrmaterial	kb [mm]
GG (1. Gen.)	1,0–5,0
GG (2. Gen.)	1,0–5,0
Stahl	0,1–5,0
PVC/PE/AZ	0,1–2,0
GGG (1. Gen.)	1,0–10,0
GGG (2. Gen.)	1,0–5,0

Quelle: eigene Darstellung

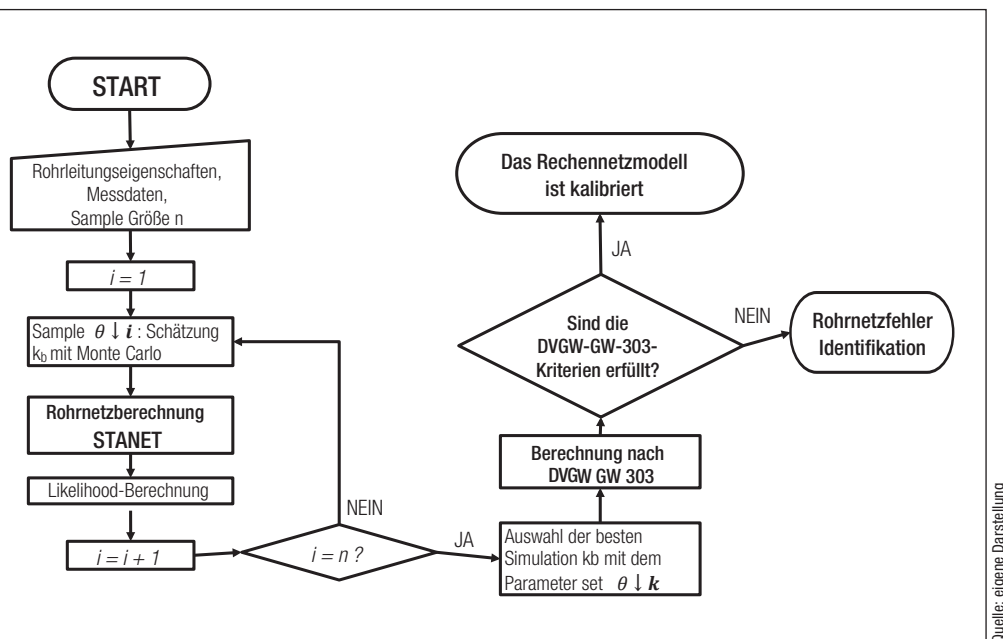


Abb. 3: Flussdiagramm für den Kalibrierungsprozess unter Verwendung der direkten Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Simulation (Abb. 3) errechnet die betriebliche Rauheit der einzelnen Leitungsabschnitte nach dem Zufallsprinzip und stellt mithilfe der Berechnungssoftware STANET die während der Messung vorliegenden Zustände (d. h. künstliche Entnahmemenge, aktueller Netzverbrauch und Wasserstand im Hochbehälter) nach, um die Messdaten an jedem Drucklogger (berechneter Druck) zu replizieren. Obwohl mehrere Simulationen die Messdaten nicht genau reproduzieren können, liefern sie wertvolle Informationen, die für die Durchführung eines statistischen Prozesses nach dem Bayes'schen Prinzip erforderlich sind.

Nach Abschluss der Simulationen wertet das Konzept alle Kombinationen von Kalibrierungsparametern aus und wählt, unter Verwendung der Maximum-Likelihood-Gleichung, die Kombination aus, die die Messdaten so wiedergegeben hat. Obwohl diese Methodik sehr flexibel ist und in relativ kurzer Rechenzeit zufriedenstellende Ergebnisse liefern kann, wird das Konzept keine praktikable Lösung finden, wenn das Wasserrohrnetz Fehler aufweist. Die Identifizierung und Lokalisierung von Rohrnetzfehlern stellt daher eine der größten Herausforderun-

gen bei der Kalibrierung von Rechnetzmodellen dar. Vor diesem Hintergrund ist es eine große Motivation bei der Konzeptentwicklung, objektive Informationen zur Verfügung zu stellen, um mögliche Rohrnetzfehler zu lokalisieren und zu identifizieren. Dafür wurde die Lokale-Model-Evidence (LME)-Methodik angewendet, die auf den Bayes'schen Prinzipien basiert.

Das Bayes'sche Verfahren schätzt die Gesamtleistung des Modells. Das vorgestellte Konzept wird jedoch die Leistung des Rechnetzmodells in einem lokalen Maßstab abschätzen; die LME wird also die Fähigkeit des Rechnetzmodells bewerten, die gemessenen Daten bei jedem Drucklogger zu replizieren. Die Berechnung der LME ist durch die folgenden Gleichungen möglich:

$$l_{i,j}(p_j^*|p_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_j^2}} * \exp\left(-\sum_{i=1}^n \frac{(p_i - p_j^*)^2}{2\sigma_j^2}\right)$$

$$LME_j = \langle l_{i,j}(p_j^*|p_i) \rangle_j \approx \frac{\sum_i l_{i,j}(p_j^*|p_i)}{n} \quad (4)$$

Dabei ist $(p_i - p_j^*)^2$ die Differenz zwischen dem gemessenen (p_j^*) und dem berechneten (p_i) Druck für einen gegebenen Parametersatz und σ_j die Standardabweichung der Messdaten. Gleichung 4 zeigt die Berechnung für die lokale LME für eine Simulation (i) an einem Messpunkt (j). Die LME berechnet im Gegensatz zum Maximum-Likelihood-Estimator die lokale Wahrscheinlichkeit an einem Messpunkt (j). Um schließlich den LME-Faktor an einem Messpunkt (j) zu berechnen, ist es notwendig, den Durchschnitt der lokalen LME zu ermitteln.

Darüber hinaus wird die LME-Analyse objektive statistische Informationen liefern, um Bereiche im Rohrnetz zu identifizieren und zu lokalisieren und so Rohrnetzfehler ((teil-)geschlossene Schieber, Planwerksfehler, etc.) zu finden. Schließlich gibt der LME-Wert an, ob das analysierte Rechnetzmodell mit seinen aktuellen Eigenschaften und Konfigurationen kalibriert werden kann, wenn die Kalibrierungsparameter innerhalb der Bandbreiten der Rohrrauheit geändert werden.

Obwohl der LME-Faktor keine direkte physikalische Bedeutung hat, ist er bei der Transformation in eine relative Skala ein guter Indikator dafür, wo mögliche Rohrnetzfehler, wie z. B. Rauheit außerhalb der definierten Schwellenwerte, geschlossene/teilweise geschlossene Schieber und Inkonsistenzen in der grundlegenden Rohrnetzkonfiguration, gefunden werden können.

Abbildung 4 zeigt den relativen Maßstab, der zur Durchführung der LME-Analyse verwendet wird. Der Logger (j) mit dem höchsten berechneten LME-Wert entspricht dem Referenz-LME-Wert (d. h. LME von 100 Prozent). LME-Werte über 20 Prozent in der relativen Skala entsprechen Abschnitten des Rohrnetzes, in denen die gemessenen Daten unter Änderung der Kalibrierungsparameter reproduziert werden können. Im Gegensatz dazu stehen LME-Werte unter 20 Prozent, in denen die gemessenen Daten nicht reproduziert werden können, wodurch die Kalibrierungsparameter geändert werden. Daher ist es erforderlich, eine Fehlererkennung für das Rohrnetz durchzuführen.

LME	
	$80 \% < \text{LME} \leq 100 \%$
	$60 \% < \text{LME} \leq 80 \%$
	$40 \% < \text{LME} \leq 60 \%$
	$20 \% < \text{LME} \leq 40 \%$
	$0 \% < \text{LME} \leq 20 \%$

Quelle: eigene Darstellung

Abb. 4: Relative Skala der LME-Analyse

Das entwickelte Konzept wurde zur Kalibrierung von mehreren Rechnernetzmodellen implementiert und die Ergebnisse mit dem RBS wave GmbH-Verfahren verglichen. Nachfolgend

werden die Ergebnisse von einem Rechnernetzmodell kurz präsentiert.

Rechnernetzmodell des Wasserrohrnetzes T1

Das Wasserrohrnetz T1 besteht aus einer Nieder- und einer Hochzone, jede Druckzone versorgt sich über einen eigenen Hochbehälter. Die Länge des Rohrnetzes beträgt ca. 75 km, davon bestehen ca. 95 Prozent aus GGG-Leitungen. Insgesamt wurden 67 Logger im Netz installiert und sechs Messungen durchgeführt.

Im Anschluss an die beschriebene Methodik wurden 1.000 Monte-Carlo-Simulationen für die sechs Vor-Ort-

Messungen und die LME-Analyse zur Identifizierung von Rohrnetzfehlern durchgeführt. Die Ergebnisse für die Fehlererkennung im Rohrnetz wurden mit Untersuchungen vor Ort durch den Netzbetreiber verglichen. Aufgrund der Rohrdimensionen des Rechnernetzmodells wurden die Ergebnisse in den verschiedenen markierten Netzbereichen der **Abbildung 5** dargestellt.

Für den westlichen Teil des Netzes sind die niedrigen LME-Werte um den Drucklogger Ha48 auf Inkonsistenzen zwischen dem Rechnernetzmodell und den Basisinformationen (Planwerksfehler) zurückzuführen. Die Leitung ►



DIE EINFACHSTE UND SICHERSTE ART ROHRE ZU TRENNEN



Weniger Aushub | Zugang von einer Seite | Reduziert den Kraftaufwand |
Kein Rückschlag



NEU!
IN KÜRZE...



Sie sind herzlich eingeladen unseren Stand auf dem
Oldenburger Rohrleitungsforum zu besuchen:
2. OG-V-19

Ausführliche PowerGrit Informationen und Videos finden Sie auf
icsdiamondtools.com

PowerGrit XL



DN 150 im Rohrnetzplan zwischen den beiden Druckloggern Ha06 und Ha48 ist tatsächlich eine Leitung DN 250.

Das Mitte-Ostgebiet des Netzes stellt die niedrigsten LME-Werte der Simulationen dar. Nach weiteren Untersuchungen lagen in diesem Bereich mehrere Rohrnetzfehler, wie z. B. fehlende Leitungsabschnitte und Rohrdimensionsfehler, vor. Das Nordgebiet des Netzes weist mehrere Rohrnetzfehler auf, was die Qualität der Ergebnisse beeinträchtigt. Schließlich wurden für die Hochzone niedrige LME-Werte bei den Druckloggern Ha65, Ha66 und Ha67 ermittelt. Trotz der erzielten Ergebnisse sind die niedrigen LME-Werte ein Resultat der erhöhten Rauheit in der Stichleitung.

Die meisten der bei dieser Analyse festgestellten Inkonsistenzen im Rohrleitungsnetz stimmen mit den Untersuchungen der RBS wave GmbH überein. Mit der Anwendung des vorgestellten

Konzepts in größeren und komplexeren Netzen wäre es möglich, die Gesamtzeit während des Kalibrierungsprozesses zu reduzieren. Obwohl das Konzept die Art des Rohrnetzfehlers nicht spezifizieren kann, ist es in der Lage, die Bereiche zu identifizieren, in denen wahrscheinlich Hinweise auf Rohrnetzfehler vorliegen.

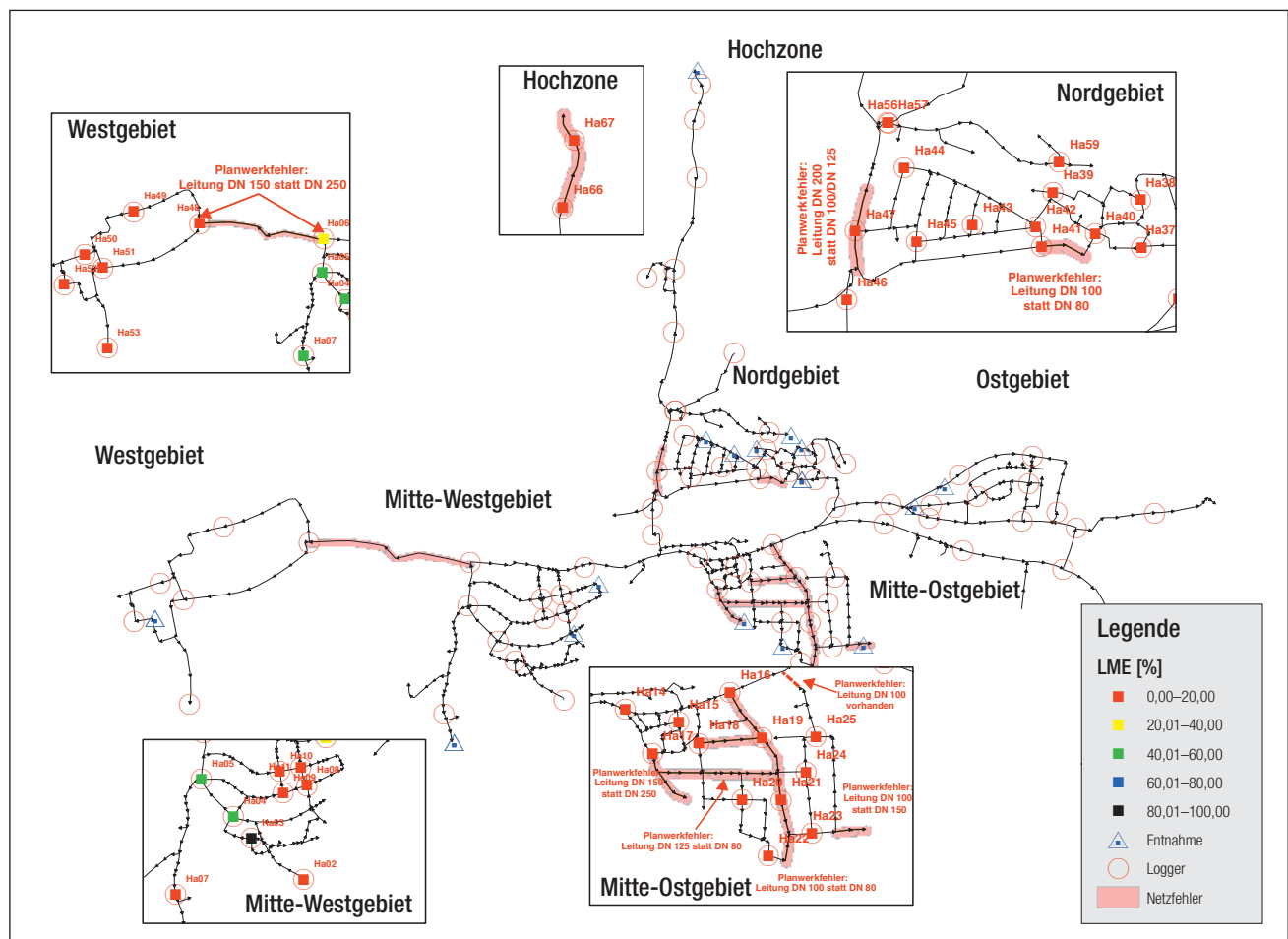
Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Vorgehensweise der Kalibrierung eines Rechnernetzmodells anhand Bayes'scher Verfahren (Probabilistische Identifikation) liefert objektive Informationen für die Entscheidungsfindung in Bezug auf die Fehleridentifikation in einem Rohrnetz. Darüber hinaus koppelt das Konzept erfolgreich einen Python-basierten Code mit der Berechnungssoftware STANET zur Kalibrierung von Rechnernetzmodellen. Das Konzept wurde für die Kalibrierung von mehreren Rechnernetzmodellen getestet und hat dabei

Rohrnetzfehler erfolgreich identifiziert und lokalisiert. Für die Kalibrierung von größeren und komplexeren Rohrnetzen kann sehr schnell eine Aussage getroffen werden, welche Netzbereiche detaillierter betrachtet und vor Ort auf Netzfehler überprüft werden sollten – damit kann wertvolle Zeit eingespart werden.

Im Zuge der weiteren Bearbeitung des Forschungsprojektes soll das Konzept für die Kalibrierung von größeren Rohrnetzen (> 100 km) getestet, die Grundlage für das Konzept festgelegt, die Vergleichsmessungen im Rohrnetz unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten weiter optimiert, die Anzahl der mindestens erforderlichen Drucklogger weiter verbessert sowie die Kalibrierung von Rechnernetzmodellen unter Anwendung des oben genannten Konzepts optimiert werden.

Die erforderliche Genauigkeit, die Sicherheit der Rohrnetzmodellierung sowie



Quelle: RBS wave GmbH

Abb. 5: Abweichungen – Ergebnisse der Kalibrierung des Modells

aussagekräftige Informationen über den hydraulischen Zustand des Netzes und die Empfehlung eines Maßnahmenkatalogs für die Maßnahmen im Rohrnetz sind ohne Kalibrierung des Rechnetzmodells nicht erzielbar. Dies gilt insbesondere für gewachsene Netzsysteme, da diese völlig unterschiedliche Widerstände (Rauheitsbeiwerte, Planwerksfehler, Rohrnetzfehler etc.) aufweisen können. Das kalibrierte Rechnetzmodell soll eine zuverlässige Grundlage für die Simulation der verschiedenen Betriebssituationen und Lastfälle im Rohrnetz bilden, da diese für bestehende Netzteile mit tatsächlichem hydraulischen Zustand durchgeführt werden. ■

Literatur

- [1] DVGW-Arbeitsblatt GW 303: Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen (Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung).
- [2] Osmancevic, E.: Kalibrierung eines Rechnetzmodells, in: Aqua & Gas N° 9 – 2014.
- [3] Argiento, R., Lanzarone, E., Antoniano, I., Alessandra, V.: Bayesian statistics in action. Analytical Methods (Vol. 4), <https://doi.org/10.1039/c2ay90023h>.
- [4] Geyer, C. J.: Handbook of Markov Chain Monte Carlo. Introduction to the AdS/CFT Correspondence, (1990), 1–438. <https://doi.org/10.1017/CB09781316090954>.
- [5] Hutton, C., Kapelan, Z., Vamvakieridou-Lyroudia, L., Savić, D.: Application of formal and informal Bayesian methods for water distribution hydraulic model calibration. Journal of Water Resources Planning and Management, 140(11), 1–10. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000412](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000412).
- [6] Kapelan, Z. S., Savic, D. A., Walters, G. A.: Calibration of Water Distribution Hydraulic Models Using a Bayesian-Type Procedure. Journal of Hydraulic Engineering, 133(8), 927–936. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:8\(927\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:8(927)).
- [7] Rios Insua, D., Ruggeri, F., Wiper, M. P.: Bayesian Analysis of Stochastic Process Models (2012th ed.). Wiley.
- [8] Roscher, H.: Praxis-Handbuch – Rehabilitation von Wasserversorgungsnetzen: Strategien, Verfahren, Fallbeispiele.
- [9] Walsh, B.: Introduction to Bayesian Analysis. Lecture Notes, 31(2), 197–199. <https://doi.org/10.1111/1468-0300.00051>.

Die Autoren

Juan Salgado ist Masterstudent an der Universität Stuttgart.

PD Dr.-Ing. Sergey Oladyshkin ist Stellvertreter des Lehrstuhlinhabers für Stochastische Simulation und Sicherheitsforschung für Hydrosysteme des Instituts für Wasser- und Umweltsystemmodellierung an der Universität Stuttgart.

Dr.-Ing. Esad Osmancevic ist Teamleiter Netzmanagement bei der RBS wave GmbH in Stuttgart und Lehrbeauftragter an der Hochschule Rottenburg am Neckar.

Fabian Janotte ist Projektleiter bei der RBS wave GmbH in Stuttgart.

Kontakt:

Dr.-Ing. Esad Osmancevic

RBS wave GmbH

Mittlerer Pfad 2-4, 70499 Stuttgart

Tel.: 0711 18571-520

E-Mail: e.osmancevic@rbs-wave.de

Internet: www.rbs-wave.de

TELERIPP

Teleskop-Schachtaufsatz

- Zubehörteil zur Montage auf neue oder bereits installierte FLEXORIPP-WZ-Schächte
- variable Höhenverstellung des Wasserzählerschachtes bis zu 250 mm
- auch als Schachtverlängerung einsetzbar

Wilhelm Ewe GmbH & Co. KG
Volkmaroder Straße 19
38104 Braunschweig
www.ewe-armaturen.de

EWE
ARMATUREN

Bewährt bis ins Detail.



Besuchen Sie uns:

iro
FH Oldenburg
2.OG - V-02