

Softwaregestützte Rehabilitationsplanung von Fernwärmenetzen

Dr.-Ing. Gerald Gangl, RBS wave GmbH, g.gangl@rbs-wave.de, Kriegsbergstraße 32, 70174 Stuttgart

Dipl.-Ing., Dipl.wirtsch.-Ing. Siegfried Finkbeiner, s.finkbeiner@enbw.com, Voltastraße 45, 70376 Stuttgart

Dr.-Ing. Joachim Beckmann, planender Ingenieur, j.beckmann@enbw.com, Verdiweg 14, 70771 Leinfelden-Echterdingen

M.Eng. Steffen Bock, planender Ingenieur, ste.bock@enbw.com, Rusenschloßstraße 11, 70469 Stuttgart

Um langfristig die Versorgungsnetze optimal zu warten und zu erhalten, sowie die Kosten für deren Betrieb und Erhaltung gering zu halten ist es notwendig, dass Fernwärmeversorgungsunternehmen eine technisch und wirtschaftliche Rehabilitationsstrategie entwickeln. Die Aufzeichnung von alterungsabhängigen Schäden sowie die Zustandsbeurteilung an verschiedenen Rohrsystemen ermöglicht es, entsprechende Alterungsprozesse an den verlegten Rohrleitungen indirekt beschreiben zu können.

Fernwärmenetze gibt es in Deutschland schon seit mehr als 80 Jahren. Der überwiegende Anteil der Netze sind dabei Wassernetze, nur ein geringer Anteil wird als Dampfnetze betrieben. Nach AGFW (Energieeffizienzverband für Wärme Kälte und KWK e.V.) [1] umfasst die Länge der Wassernetze rund 18.800km, jene der Dampfnetze rund 750km, diese verteilen sich auf 210 Fernwärmeversorgungsunternehmen.

Instandhaltungsstrategien

Für Fernwärme, Wasser- und Gasleitungen, aber auch für Stromkabel gilt, dass sie oft über einen längeren Zeitraum im Erdreich verlegt sind und deren Zustand daher nicht immer direkt erhoben werden kann. Daher bedarf es anderer indirekter Mittel, den Zustand entsprechend zu beschreiben, um darauf eine Instandhaltungsstrategie aufzubauen.

Die Instandhaltung dient dem Ziel, bestimmte Eigenschaften von Anlagen und Betriebsmitteln sicherzustellen. Diese Eigenschaften sind daher als Kenngrößen im Unternehmen zu definieren, da sie zum Einen die Erfüllung des Versorgungsauftrages der Kunden garantieren sollen und zum Anderen das wirtschaftliche Ergebnis des Versorgers wesentlich beeinflussen.

Die Regelwerke und technischen Richtlinien in den Bereichen Wasser [2], Gas [3] und Strom [4] teilen die Instandhaltungsarten in folgende grundsätzliche Gruppen ein:

- Ereignisorientierte, reaktive Instandhaltung, Ausfallstrategie
- Vorbeugende, präventive Instandhaltung, Präventivstrategie
- Zustandsorientierte Instandhaltung, Inspektionsstrategie
- Prioritätenorientierte Instandhaltung [4]

Die Analyse von Instandhaltungsergebnissen sowie der Störungs- und Schadensstatistik kann zur Kosten-Nutzen-Kontrolle und zur Identifizierung von Einsparpotenzialen verwendet werden. Die Erkenntnisse können allerdings erst mit Zeitverzögerung in einen Optimierungsprozess einfließen, wenn z.B. das Betriebsverhalten durch zusätzliche Alterungseffekte beeinflusst wird.

Neben der Möglichkeit, in Stromnetzen Teile der Betriebsmittel (z.B. Freileitungen) und Anlagen (z.B. Trafostationen, Schaltanlagen) direkt zu inspizieren, können bei unterirdisch verlegten Leitungen großteils nur indirekte Inspektionsverfahren angewendet werden. Zustandsdaten, wie jene aus der Überwachung kathodisch geschützter Leitungen, erhöhen die Qualität der entwickelten Instandhaltungsstrategie deutlich.

Für Fernwärmeversorgungsnetze beschreibt der AGFW [5] Methoden über die Verfahren zur Zustandsermittlung und zur Feststellung/Einmessung von Abweichungen. Eine Übersicht ist in Tabelle 1 angeführt.

Tabelle 1: Übersicht über Verfahren zur Zustandsermittlung nach AGFW FW 435 1-7 [5]

betriebliche Verfahren: Wasserverlustmessungen, Druckmessungen	Beurteilung Schaden
Visuelle und mechanisch-technologische Verfahren: Kamerabefahrung bei kanalverlegten Leitungen, erkannte Fehlstellen werden klassifiziert und mit einem Risiko versehen	Zustandsbeschreibung
Thermografie: Durch austretendes Medium wird Temperaturfeld um Rohrleitung gestört. Zustandsbeurteilung aufgrund von: - Kategorie IB: an Schadensstelle tritt Fernheizwasser aus -Kategorie IIB: Wärmeabstrahlung durch stark durchfeuchtete Rohrumgebung - Kategorie IIIB: erhöhte Wärmeabstrahlung aufgrund Feuchtigkeit oder fehlender Wärmedämmung	Zustandsbeschreibung
Korrelationsanalyse Lecksuche durch Laufzeitverfahren an Materialien, die mit visuellen Verfahren auffällig geworden sind.	Beurteilung Schaden
Tracerstoffe Wasser mit Tracerstoff tritt an Leckstellen aus, Tracerstoff diffundiert an Oberfläche und kann gemessen werden.	Beurteilung Schaden
Wanddickenmessung mit Prüfmolch Bei erdverlegten Leitungen, welche mit Wasser gefüllt sind. Bei KMR, SMR oder Schutzrohr anzuwenden.	Zustandsbeschreibung

Richtwerte zur Zustandsbeurteilung

Um den Zustand eines Versorgungssystems zu beschreiben bedarf es Richtwerte, um eine Größenordnung anzugeben, ob sich das eigene Netz in einem guten oder weniger guten Zustand befindet. Dafür gibt es für die Sparten Wasser, Gas oder Strom Vorgaben von den jeweiligen Fachverbänden bzw. gesetzliche Vorgaben die als Größenordnung dienen. Im Wasser bietet der DVGW Richtwerte für Wasserverluste [6], Schadensraten [7] oder die hydraulische Leistungsfähigkeit [8]. Über die Netzentgeltverordnungen [9, 10] werden Qualitätsvorgaben definiert, die ähnliche Vorgaben liefern, hier fließt auch die Versorgungsunterbrechung im Strom als Kriterium mit ein. Für Fernwärmenetze ist ein entsprechender AGFW-Regelwerksbaustein derzeit in Erarbeitung, um auch hier Richtgrößen zu definieren. Die Bearbeitung erfolgt in einer AGFW-Arbeitsgruppe „Instandhaltungsstrategien“.

Softwaretechnische Umsetzung

Parallel zu den Arbeiten in der AGFW-Arbeitsgruppe erfolgt die Umsetzung der Software PIREM im Auftrag der EnBW KWG und der FUG (Fernwärme Ulm GmbH) mit Unterstützung der Erlanger Stadtwerke und Vattenfall Europe Wärme AG sowie der RBS wave GmbH. Die softwaretechnische Umsetzung ermöglicht es Fernwärmebetreibern, eine optimale langfristige Rehabilitationsstrategie zu planen, bzw. über eine risikoorientierte Instandhaltungsstrate-

gie auch bewusst Budgetmittel in Abhängigkeit eines Risikos einem Leitungsabschnitt zuzuweisen.

Datengrundlage

Die Daten zu Fernwärmenetzen sind in der Regel digital vorhanden. Diese Daten liegen entweder im GIS (Geoinformationssystem) oder auch in betriebswirtschaftlichen Systemen wie SAP vor vergleichbaren Programmen vor.

Um eine Rehabilitationsplanung durchführen zu können, sind geometrische und hydraulische Grundinformationen (z.B. Verlegesystem, Durchmesser, Baujahr, Temperatur) notwendig. Diese dienen der Untergliederung des Gesamtnetzes in aussagekräftige Gruppen, um hier systemspezifische Alterungsprozesse verursachergerecht zuzuweisen. Fernwärmenetze kann man dabei in folgende Verlegesysteme untergliedern:

Tabelle 2: Übersicht über Verlegesysteme [11]

Freileitung FL	Kanalleitung nicht begehbar KAN	flexible Rohrsysteme MMR
Kunststoffmantelrohr KMR	Kanalleitung begehbar KANB	flexible Rohrsysteme PMR
Stahlmantelrohr SMR	Gebäudeleitung GL	Sonstiges

Gruppenbildung

Um ein Versorgungsnetz in aussagekräftige Gruppen unterteilen zu können ist es notwendig, mögliche Einflussfaktoren auf das Ausfallverhalten zu definieren. In der Regel kann zwar theoretisch eine Vielzahl an Faktoren eine Rolle spielen, in der Praxis sind aber nicht alle diese Faktoren sofort vom Unternehmen verfügbar (Abbildung 1). Diese können und sollten zeitnah erhoben werden, dennoch soll eine Aussage über den Zustand und daraus abgeleitet ein Rehabilitationsbedarf vorab abgeleitet werden können.

Die hier vorgestellte Umsetzung verfolgt den Ansatz der schrittweisen Verdichtung der Gruppenbildung. Ausgehend von einem minimalen Datenumfang werden zusätzlich mehrere ergänzende Attribute angeboten, die, sofern die Daten vorhanden sind, befüllt werden können. Somit kann der Benutzer entscheiden, ob die Genauigkeit der Aussage mit dem aktuellen Datenpool ausreichend ist, bzw. zu welchem Zeitpunkt die notwendigen Ressourcen frei sind, um zusätzliche Attribute abzubilden.

The screenshot shows the 'PIREM Fernwärme' software interface. At the top, there are tabs for 'Gruppen', 'Übersicht', 'Anlagen pro Gruppe', 'Anlagen pro Anlagentyp', and 'Standardgruppen'. The main area is titled 'Gruppen' and contains a list of groups on the left, including 'Freileitung', 'Gebäudeleitung', 'Kanalleitung begehbar KANB', 'Kanalleitung KAN', 'KIV oben KIV unten', 'KIV-O KIV-U 50%', 'Kunststoffmantelrohr', 'MMR flexibel', 'PMR flexibel', 'Sonstige Verlegesysteme', and 'Stahlmantelrohr'. The 'Kanalleitung begehbar KANB' group is selected. The main configuration area shows the group name 'Kanalleitung begehbar KANB' and the plant type 'KANB'. Below this, there are several criteria sections, each with a list of options and a 'wählen' button. The criteria and their current values are: 'Nenndurchmesser' (100, 125, 150, 175, 180) with 'Alle' checked; 'Rohrbauer' (Unbekannt) with 'Alle' checked; 'Qualitätssicherung' (Unbekannt) with 'Alle' checked; 'Wärmedämmung' (alukaschiert, Aluminium, Armaflexplatten, Bitumen, isogenopak(Plastik)) with 'Alle' checked; 'Tiefbauer' (Unbekannt) with 'Alle' checked; 'Isolierer' (Unbekannt) with 'Alle' checked; 'Medienrohr' (Unbekannt) with 'Alle' checked; and 'Kathodischer Korrosionsschutz' (Unbekannt) with 'Alle' checked. At the bottom right, there is a page navigation bar showing 'Seite 1 2 3'.

Abbildung 1: Gruppenbildung mit teilweise befüllten Zusatzattributen (Eingabemaske 1 PIREM, RBS wave)

Als Unterstützung werden Standard-Änderungsfunktionen für die in Tabelle 2 angeführten Verlegesysteme hinterlegt. Diese beziehen sich auf betriebliche Erfahrungswerte bzw. Einschätzungen von Fernwärmebetreibern und liefern somit eine hilfreiche Unterstützung in der Rehabilitationsplanung bei geringer Datenlage. Diese werden parallel in der AGFW-Arbeitsgruppe Instandhaltungsstrategien erarbeitet und veröffentlicht.

Alterungsprognose – Anpassung an unternehmensspezifische Daten

Alterungsprozesse lassen sich nach Herz [12] mathematisch als alterungsabhängige Wahrscheinlichkeit des Übergangs in schlechtere Zustände beschreiben. Diese Übergangsraten, Sterberaten oder Ausfallraten verändern sich im Laufe des Alters, je nach Material und Beanspruchung, und sind funktional verknüpft mit Überlebenswahrscheinlichkeiten und Lebenserwartung.

Wie im vorigen Kapitel beschrieben ist es hilfreich, anhand der Erfahrung anderer eine erste Richtgröße zu bekommen, um einen langfristigen Rehabilitationsbedarf zu bestimmen. Eine Anpassung an die eigenen Verhältnisse ist dabei jedoch unbedingt notwendig.

In der hier vorgestellten Vorgehensweise erfolgt diese Anpassung in vier Schritten:

- Standard-Älterungsparameter nach AGFW
- unternehmensspezifische Einschätzung aufgrund betrieblicher Erfahrung
- Kalibrierung der Einschätzung anhand eigener Schadensaufzeichnungen
- Unterstützung der Einschätzung aufgrund Zustandsbeschreibungen (Tabelle 1)

Die Einbindung der Erfahrung erfolgt dabei über drei Parameter, aus denen in weiterer Folge eine mathematische Funktion berechnet wird. Dabei soll abgeschätzt werden, ab wann erfahrungsgemäß bei einem bestimmten Verlegesystem die ersten Schäden auftreten bzw. wie

lange die Lebensdauer der Leitungen ist. Diese Aussage kann mit aufgezeichneten Schadensfällen kalibriert werden (Abbildung 2).

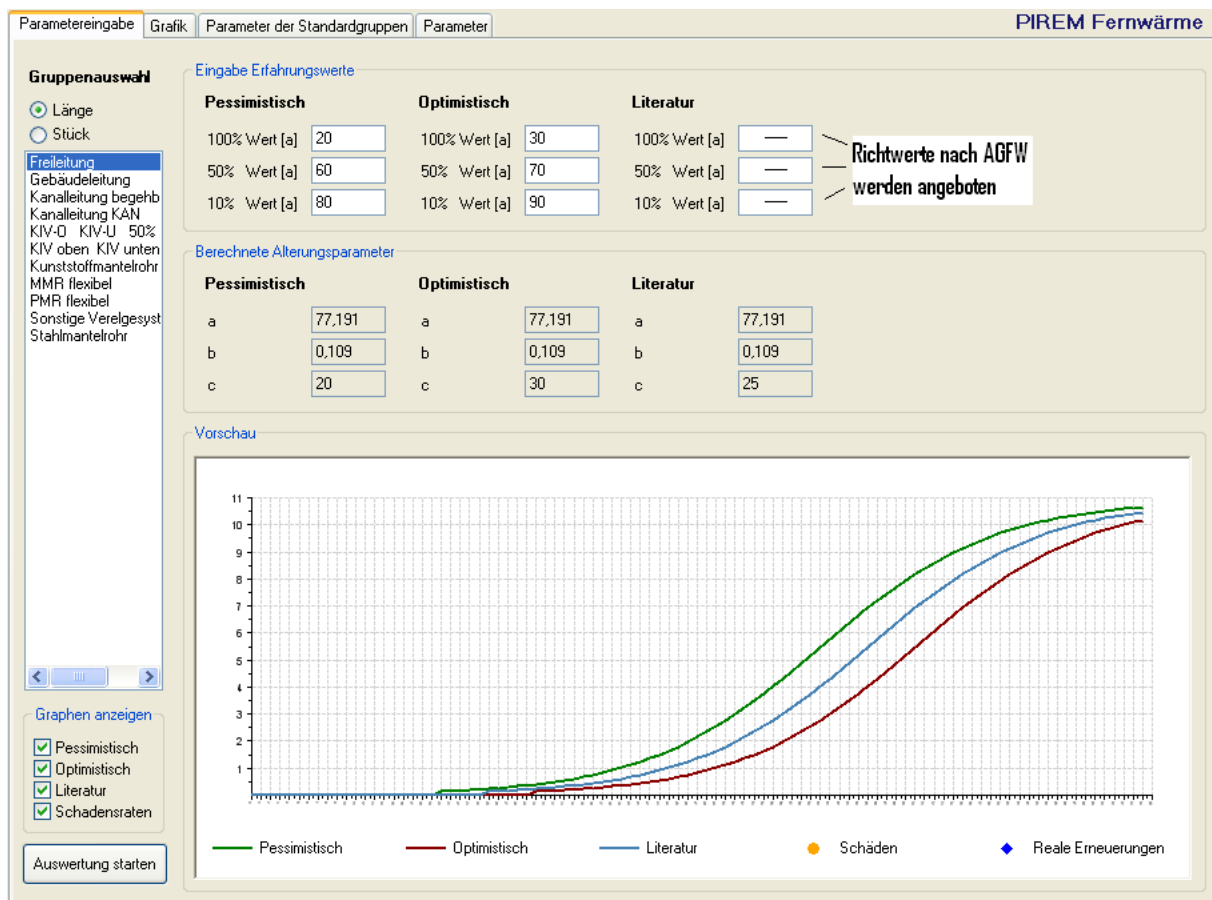


Abbildung 2: Definition der Ausfallfunktion anhand unternehmensspezifischer Erfahrung (RBS wave)

Bei Kanalleitungen oder Freileitungen kann beispielsweise auch durch direkte Inspektion bzw. Kamerainspektion ein Zustand beschrieben werden. Dieser Zustand wird sich aufgrund zunehmenden Alters mit der Zeit verschlechtern. Somit ist es notwendig, eine Verknüpfung zwischen der direkten Zustandsbeurteilung und dem erfahrungsbasierten Ausfallsverhalten herzustellen. Hier wurde bewusst vorerst von komplexen statistischen Methoden wie Semi-Markov-Ketten für eine Zustandsübergangsprognose abgewichen, um mit den noch wenig vorhandenen Daten eine für den Anwender einfach nachvollziehbare Vorgehensweise anzubieten. Mit zunehmender Erfahrung im Alterungsprozess von Verlegesystemen und einer verdichteten Datenlage soll zukünftig der Einsatz komplexerer aber auch genauerer Modelle geprüft werden.

Somit erfolgt eine Einteilung von zeitlich begrenzten Zustandsklassen aufgrund der Aufzeichnung von Zustandsbeurteilungen. Anhand dieser definierten Zustandsklassen erfolgt ein kontinuierlicher Übergang von einer Klasse zu nächst höheren mit zunehmendem Alter. Da diese Zustandsklassengrenze kein komplett starrer Wert ist, wird hier eine Bandbreite angegeben, in der sich dieser Zustandsübergang pessimistisch und optimistisch bewegen kann (Abbildung 3).

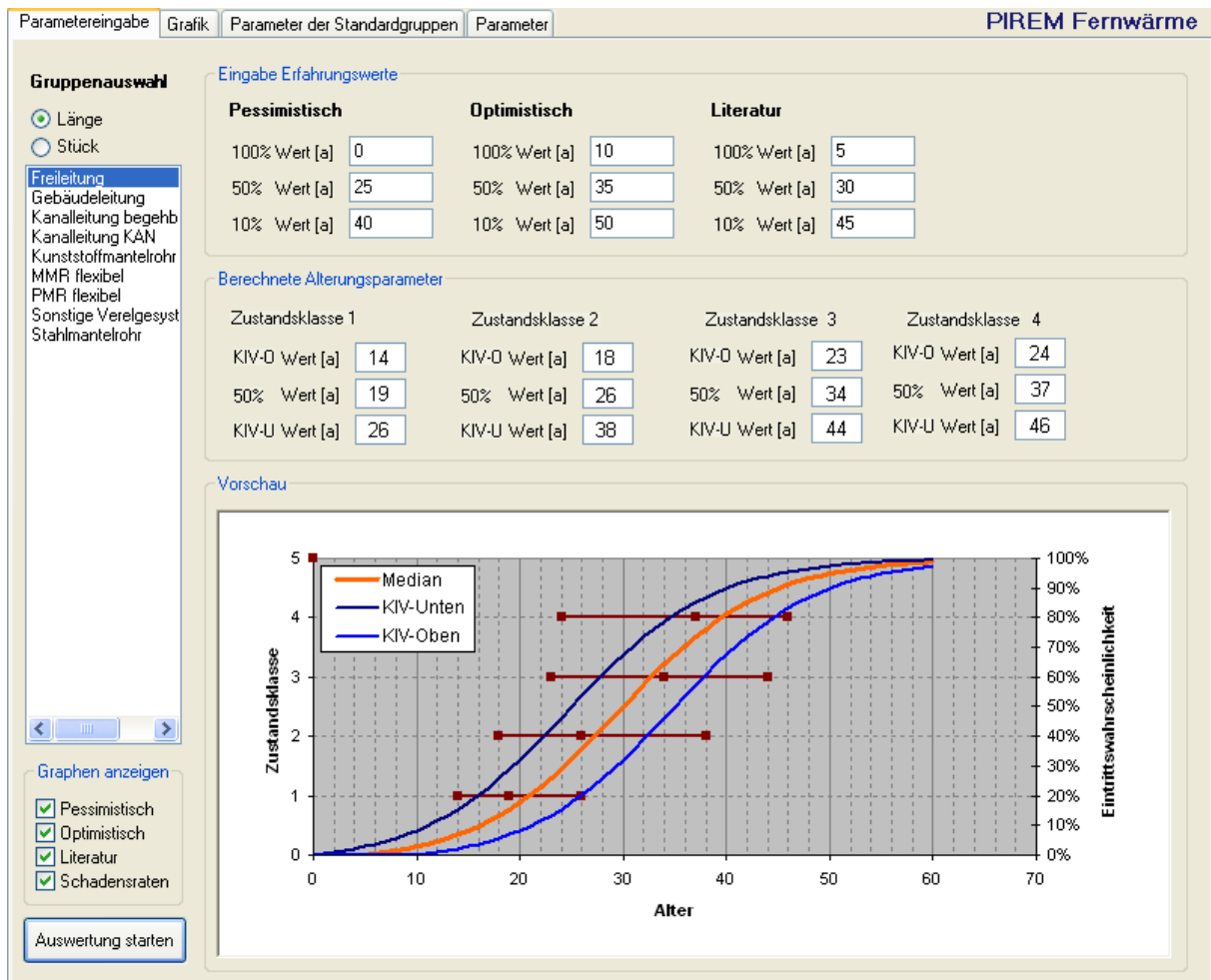


Abbildung 3: Anpassung der Zustandsklassen an altersabhängige Eintrittswahrscheinlichkeit (RBS wave)

Anhand der definierten Alterungsparameter erfolgt unter Berücksichtigung des Datenbestands die Berechnung des jährlichen strategischen Erneuerungsbedarfs der ausgewählten Gruppe (z.B. Freileitung). Dieser leitet sich aus den altersabhängigen Prozentsätzen der angepassten mathematischen Funktion ab (Abbildung 2).

Risikoorientierte Instandhaltungsstrategie

Nachfolgend zur langfristigen Rehabilitationsplanung (Makro-Ansatz) ist es notwendig eine Mittelfristplanung (Mikro-Ansatz) durchzuführen. Hier sind die teilweise durchführbare Wartung sowie die Inspektion und die zugehörigen Inspektionszyklen relevant, da diese Maßnahmen entsprechende finanzielle Mittel binden. Eine generelle Aussage über optimale Inspektionszyklen je Verlegesystem ist nicht möglich, da hier unterschiedliche Wichtigkeiten bzw. Versorgungsalternativen einbezogen werden müssen. Unter Wichtigkeit wird der Einfluss auf die sichere Versorgung eines Kunden über das Leitungsnetz verstanden. Zusätzlich liegen noch zu wenige Erfahrungswerte vor, inwiefern beispielsweise Wartungstätigkeiten an der Umhüllung einer Freileitung eine in Jahren ausgedrückte Lebensverlängerung für das Medienrohr darstellt, bzw. um wie viele Jahre das gesamte System vorzeitig versagt hätte, wenn keine Wartung bzw. Instandsetzung durchgeführt worden wäre. Aus diesem Grund

wurde über eine Risikobetrachtung die Zuordnung verschiedener Instandhaltungsstrategien umgesetzt, die wiederum mit kaufmännischen Daten hinterlegt sind.

Die Auswahl der Instandhaltungsstrategie wird dazu in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt. Zustand und Wichtigkeit eines Leitungsabschnitts werden zunächst nach verschiedenen Kriterien bewertet. Im Koordinatensystem sind die unternehmensspezifischen Instandhaltungsstrategien je definierter Gruppe (z.B. ein oder mehrere Verlegesysteme) dargestellt. Je nach Zuordnung eines Leitungsabschnitts in Zustand und Wichtigkeit wird somit eine Strategie zugewiesen [11, 13].

Unter risikoorientierter Instandhaltung verstehen die Autoren den Vergleich von drei Grundstrategien der Instandhaltung (Ausfallstrategie, Präventivstrategie, Inspektionsstrategie) in Bezug auf Zustand, Wichtigkeit und Kosten der Grundstrategien.

Durch die Definition von Zustandsübergangsbereichen (Abbildung 3) sowie zugehöriger Inspektionsintervalle, Wartungsintervalle mit zugehörigen Kosten oder Reparaturkosten in Abhängigkeit der Eintrittswahrscheinlichkeit $F(t)$ eines Schadens lässt sich für jede definierte Strategie der aktuelle Gesamtaufwand beziffern.

Tabelle 3: Beispiel für eine unternehmensspezifisch Instandhaltungsstrategie

Übergang	Alter	Inspektionsintervall	Wartung	Art der Inspektion	Reparatur
ZK 1 – ZK 2	18 Jahre	10 Jahre	-	Begehung	€ 5000.- * $F(t)$
ZK 2 – ZK 3	33 Jahre	5 Jahre	5 Jahre	Begehung	€ 5000.- * $F(t)$
ZK 3 – ZK 4	45 Jahre	3 Jahre	3 Jahre	Begehung	€ 5000.- * $F(t)$
ZK 4 – ZK 5	57 Jahre	1 Jahr	1 Jahr	Begehung	€ 5000.- * $F(t)$

Ändert man die Intervalle oder ändern sich die Kosten je Maßnahme, hat dies einen direkten Einfluss auf die Gesamtkosten des Systems. Ist ein beschränktes Budget vorgegeben, kann der Benutzer durch Auswahl seiner Instandhaltungsstrategie die Kosten in Abhängigkeit der damit verbundenen Risiken anpassen. Eine beispielsweise sehr wichtige Leitung kann aufgrund nicht vorhandener Budgetmittel nur in größeren Zeiträumen inspiziert werden. Der frühzeitigen Erkennung eines Schadens wird daher durch vorbeugende Inspektion nur bedingt entgegengewirkt.

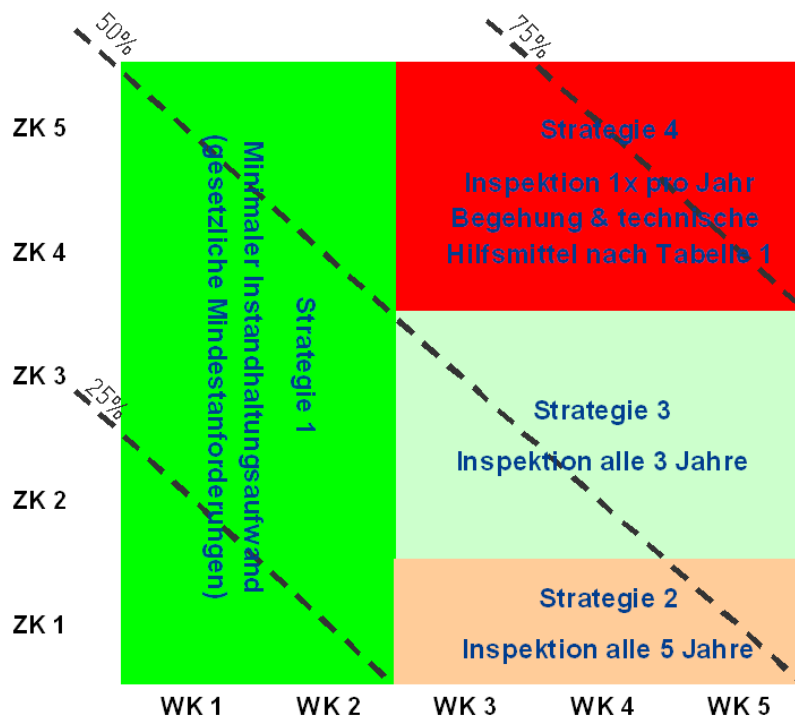


Abbildung 4: Beispiel einer Risikodefinition mit zugewiesenen Instandhaltungsstrategien [11]

Aufgrund der Zuordnung von Strategien in Abhängigkeit von Zustandsklassen und der Zuordnung von Zustandsklassen in Abhängigkeit des Alters kann auch eine Prognose durchgeführt werden, welche Betriebsaufwendungen in den kommenden Jahren bei gewählter Strategie zu erwarten sind. Mögliche zugehörige Methoden zur Umsetzung in Abbildung 4 sind in Tabelle 1 beschrieben.

Zusammenfassung

Fernwärmenetze sind teilweise über mehrere Jahrzehnte in Betrieb, das eingesetzte Material unterliegt dabei auch einem Alterungsprozess. Um eine vorausschauende Rehabilitationsplanung durchzuführen, sind entsprechende Grunddaten und Methodiken notwendig, um ein Versorgungsnetz in Abhängigkeit der Verlegesysteme und externer Einflüsse auf das Alterungsverhalten zu erneuern. Die hier vorgestellte Methodik wurde im Auftrag der Fernwärmebetreiber EnBW, FUG Ulm und RBS wave sowie mit Unterstützung der Erlanger Stadtwerke und Vattenfall Europe Wärme AG entwickelt um die Belange des Betriebs und der vorhanden Datenlage auch optimal abzubilden.

Literaturverzeichnis

- [1] AGFW_Hauptbericht 2009, www.agfw.de
- [2] DVGW W 400-3 (2006) Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen Teil 3: Betrieb und Instandhaltung, www.dvgw.de
- [3] DVGW G 401 (2009) Erfassung und Auswertung von Daten zum Aufbau von Instandhaltungsstrategien für Gasverteilungsstrategien, www.dvgw.de
- [4] VDN (2006) Technische Richtlinie für die Instandhaltung von Betriebsmitteln und Anlagen in Elektrizitätsversorgungsnetzen, Verband der Netzbetreiber e.V. beim VDEW, www.vdn-berlin.de

- [5] AGFW Merkblatt FW 435 1-7 (2010) Verfahren zur Zustandsermittlung von Fernwärmeleitungen und zur Feststellung/Einmessung von Abweichungen, www.agfw.de
- [6] DVGW W 392 (2003) Rohrnetzinspektion und Wasserverluste – Maßnahmen, Verfahren und Bewertungen, www.dvgw.de
- [7] DVGW W 400-3 (2006)) Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen - Betrieb und Instandhaltung, www.dvgw.de
- [8] DVGW W 400-1 (2004) Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen – Planung
- [9] GasNEV (2005) Gasnetzentgeltverordnung, BGBl. I S. 2197
- [10] StromNEV (2005) Stromnetzentgeltverordnung, BGBl. I S. 2225
- [11] Finkbeiner S., Messerschmid H., Beckmann, J., Bock, S. (2011) Interne Arbeiten zur risikoorientierten Instandhaltung für die Fernwärme der EnBW Stuttgart, Veröffentlichung in Vorbereitung
- [12] Herz, R. (1987) Erneuerungsstrategien für städtische Infrastrukturnetze; Jahrbuch für Regionalwissenschaft, 8. Jahrgang, S. 67-105, Gesellschaft für Regionalforschung, Vandenhoeck & Ruprecht in Göttingen
- [13] Bock, S. (2011) Datengrundlage und Struktur von Fernwärmenetzen und –anlagen für die Analyse einer Rehabilitationsplanung unter Einbeziehung der risikoorientierten Instandhaltung, Masterthesis Hochschule Esslingen