

HYWAY to the future

Von Marion Erdelen-Peppler, Neil Gallon und Michael Tewes

Die Klimakrise ist eine der größten Herausforderungen, vor denen die Menschheit im 21. Jahrhundert steht. Gleichzeitig steht die fortschreitende globale Energiewende vor vielen Herausforderungen durch das Sicherstellen einer nachhaltigen, zuverlässigen und bezahlbaren Energieversorgung. Die voranschreitende Dekarbonisierung der bestehenden Gasinfrastruktur wird zu einer stärkeren Durchdringung mit grünen Kraftstoffen wie Wasserstoff führen, der letztlich aus erneuerbaren Energien gewonnen wird. Viele Betreiber befinden sich derzeit in der Anfangsphase der Prüfung von Möglichkeiten zum Bau spezieller Wasserstoffpipelines oder zur Umstellung von Erdgaspipelines auf Wasserstoff. Seit Jahrzehnten wird Wasserstoff sicher durch Pipelines transportiert. Es besteht allerdings Einigkeit darüber, dass künftige Wasserstoffleitungen im Rahmen der Energiewende anders betrieben werden müssen als ihre heutigen Pendanten (entweder Wasserstoff oder Erdgas) und daher in Bezug auf die Integrität anders bewertet werden müssen. Die umfangreichen Erfahrungen mit Wasserstoffpipelines haben jedoch einen wertvollen Beitrag zum Verständnis des Gesamtsystems geleistet und dazu beigetragen, die Lücken zu identifizieren, die in bestimmten Bereichen derzeit bestehen, z. B. bei den Anforderungen an die Materialeigenschaften und der Anwendbarkeit etablierter Ansätze zur Fehlerbewertung. Die zwischen Erdgas- und Wasserstoffpipelines festgestellten Unterschiede bieten die Möglichkeit, spezielle Technologien zu entwickeln, die dazu beitragen, die sichere Umrüstung und den sicheren Betrieb einer Wasserstoffpipeline zu gewährleisten. Im folgenden Fachbeitrag wird die Rolle der verschiedenen Technologien in diesem Zusammenhang zusammengefasst.

Einführung

Es gibt derzeit mehr als 4.500 km Pipelines, in denen Wasserstoff transportiert wird. Davon befinden sich 1.600 km in Europa. Die meisten von ihnen sind spezielle Wasserstoffproduktleitungen, die für den Transport von Wasserstoff als Prozessgas von Gasproduzenten zu industriellen Anwendern wie Chemieanlagen und Raffinerien ausgelegt wurden. Die Pläne für den europäischen Wasserstoff-Backbone haben ein anderes Ziel, sie sind auf die Vision von Wasserstoff als Energiequelle ausgerichtet. Die benötigten Wasserstoffmengen werden erheblich größer sein als heute; das Leitungsnetz wird das Gas schließlich über den gesamten Kontinent verteilen müssen. Dies kann durch die Nutzung des bestehenden Erdgasnetzes erreicht werden, das nur bei Bedarf um neue Leitungen ergänzt wird. Aufgrund der Unterschiede zwischen Wasserstoff und Erdgas stellen diese Pläne für die Zukunft jedoch ganz andere Herausforderungen an das System, vor allem in Bezug auf Volumen, Druck und die Aufrechterhaltung der Integrität und Sicherheit der Pipelines.

Sowohl für neue als auch für umgewidmete Leitungen ist es notwendig, die relevanten Schädigungen zu bewerten und eine Strategie für das Integritätsmanagement festzulegen. Eines der Kernelemente besteht darin, den Zustand der Pipeline zu verstehen und anhand der Gefährdungen zu bewerten.

Die Grundlage für eine solche Bewertung bilden eine solide Kenntnis der Materialeigenschaften und aller signifikanten lokalen Schwankungen ihrer Eigenschaften, um die Grundlage für eine Bewertung der „Wasserstofftauglichkeit“ zu bilden. Während dies bei neu gebauten Leitungen keine Herausforderung darstellt, können die verfügbaren Aufzeichnungen bei alten Leitungen unvollständig sein. Darüber hinaus müssen bereits in den Leitungen bestehende Anomalien bekannt sein. Je nach der Historie der umzuwiddenden Leitung kann es sinnvoll sein, zusätzliche, potenziell relevante Daten wie wei-

tere materialbezogene oder geometrische Eigenschaften zu erfassen.

Bewertung wasserstoffbedingter Gefährdungen

Die Entwicklung eines Bewertungssystems für das Integritätsmanagement von Wasserstoffpipelines ist im Grunde vergleichbar mit der eines solchen für Erdgaspipelines. Sie umfasst die Sammlung von Daten zur Durchführung einer Gefährdungsanalyse, die die Grundlage für die Auswahl eines Inspektionssystems bilden. Wenn die Pipeline umgenutzt wird, spielt die Inspektion eine große Rolle, da es wichtig ist, entscheidende Informationen über die Eigenschaften der bestehenden Leitung zu erfassen. Nach der vorläufigen Bewertung kann ein Integritätsmanagementplan ausgearbeitet werden.

Die vorhandenen Normen für das Integritätsmanagement von Wasserstoff-Pipelines (z. B. ASME B31.8S [1]) verlangen, dass alle Gefährdungen für die Integrität identifiziert, bewertet und in angemessener Weise gemindert werden. Folglich konzentrieren sich die derzeitigen Machbarkeitsstudien und Initiativen zur Umwidmung der Erdgaspipelines in erster Linie auf den linken Teil des oben abgebildeten Kreises, d. h. auf die Identifizierung von Gefährdungen, die Materialkompatibilität, die Einhaltung der normativen Vorgaben und die betriebliche Kompatibilität. Die beiden Hauptkategorien wasserstoffspezifischer Gefährdungen, die identifiziert wurden, sind (i) Risse/Beschädigungen in Verbindung mit Wasserstoff und (ii) Verschlechterung der Materialeigenschaften als Reaktion auf die Einwirkung des Wasserstoffs auf den Stahl.

Die Bewertung der materialbezogenen Gefährdungen ist interessant, da sie verschiedene Aspekte bei der Umnutzung bestehender Leitungen kombiniert. Es ist notwendig, detaillierte Kenntnisse über die Rohre und deren Eigenschaften gemäß dem Herstellerzertifikat zu haben. Je nach Alter der Rohrleitung sind diese Daten möglicherweise nicht ohne wei-

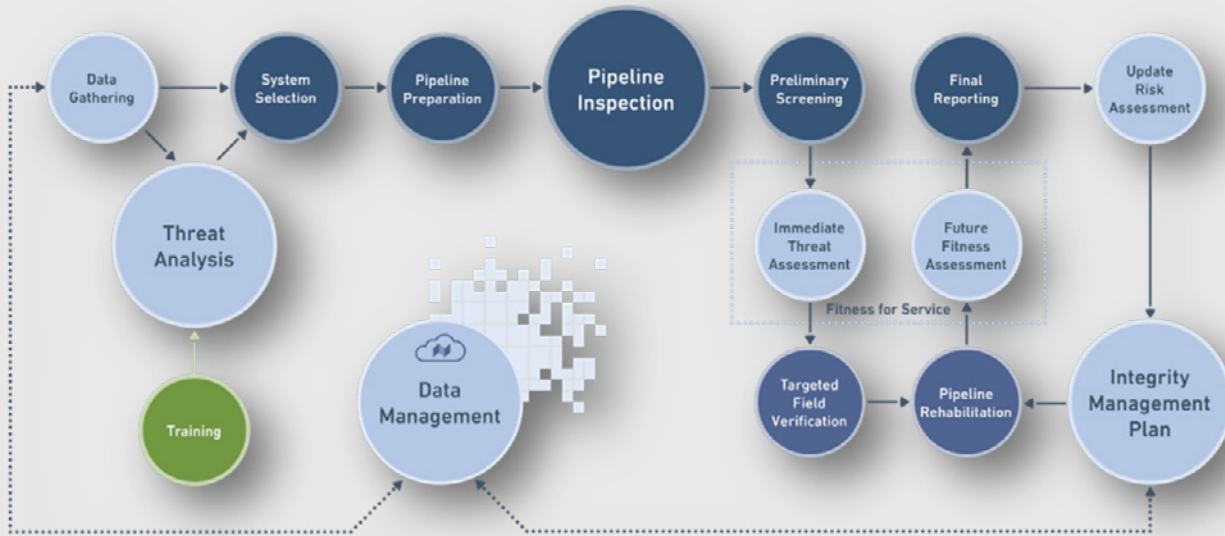


Bild 1: Ein systematischer Ansatz zur Risikominderung bei der Einleitung von Wasserstoff in bestehende (Erdgas-) Pipelines

teres verfügbar. Doch selbst wenn die Dokumentation vollständig ist, enthält sie Materialeigenschaften in Luft, die dann auf wasserstoffbezogene Eigenschaften übertragen werden müssen, entweder durch Anwendung eines materialspezifischen Abminderungsfaktors oder durch Werkstoffprüfungen in Wasserstoffatmosphäre.

Es ist allgemein anerkannt, dass die Wechselwirkung zwischen Wasserstoff und Stahl zu einer erheblichen Verminderung der Duktilität und Bruchzähigkeit von Stahl sowie zu beschleunigtem Ermüdungsrisswachstum führen kann. Die Quantifizierung solcher Einflüsse ist jedoch nach wie vor unsicher, und die Daten weisen eine große Streuung auf [2,3]. Ein Hauptgrund dafür ist, dass das Ausmaß der Wechselwirkung zwischen Wasserstoff und Stahl von der spezifischen Beschaffenheit des Stahlgefüges und der chemischen Zusammensetzung [2] und nicht nur von der Stahlsorte bestimmt wird.

Eine sehr genaue Kenntnis der vorliegenden Werkstoffkennwerte, sowohl in Luft als auch in Wasserstoff, ist daher für jede Umnutzungsstudie von grundlegender Bedeutung. Dies wird in der ASME B31.12 anerkannt, die daher die Prüfung einer Werkstoffprobe pro Meile (= 1,6 km) vorschreibt, wenn eine Pipeline umgewidmet werden soll.

ILI-Inspektionsstrategie für Wasserstoffleitungen

Wie bei Erdgasleitungen ist es auch im Fall von Wasserstofftransport wichtig, eine geeignete Inspektionsstrategie zu entwickeln. Wegen der oben genannten typischen, wasserstoffbezogenen Gefährdungen liegt der Schwerpunkt auf dem Verständnis der „DNA“ der Werkstoffe sowie auf der Risserkennung. Diese Aspekte stehen im Mittelpunkt von Umnutzungs- und Integritätsmanagementstrategien. Es ist daher zu erwarten, dass Technologien zur Risserkennung wie EMAT und Methoden der In-Line Inspektion (ILI) zur Bestimmung der Materialeigenschaften wie ROSEns RoMat PGS und DMG Services fester Bestandteil der Inspektion und Umnutzung von Wasserstoffpipelines werden.

Risserkennung

Vor der Umnutzung einer Pipeline von Erdgas auf Wasserstoff ist es wichtig, den Ist-Zustand der Leitung zu kennen. Dazu gehört die Identifizierung von Schweißverbindungen, die ausgetauscht oder repariert werden müssen, und die Festlegung einer soliden Nulllinie, anhand derer der Zustand der Leitung in bestimmten zeitlichen Abständen beurteilt werden kann. Die In-Line-Inspektion (ILI) von Rohrleitungen mit intelligenten Molchen liefert detaillierte Informationen, die in ein Rahmenwerk zur Bewältigung der Bedrohung durch rissartige Defekte wie Ermüdungsrisse und Spannungsrisskorrosion (SCC) einfließen. Verschiedene Technologien, die auf Magnetic Flux Leakage (MFL), Wirbelstrom oder Ultraschall basieren, werden eingesetzt, um ein breites Spektrum verschiedener Defekttypen zu erfassen und die Unterscheidung und Größenbestimmung von Rissen zu unterstützen. Die vielversprechendste Technologie für die direkte Erkennung und Größenbestimmung von Rissen in Gaspipelines hat sich erst in den letzten Jahren herauskristallisiert [3,4,5]: Die EMAT-Technologie (Electro-Magnetic Acoustic Transducer) ermöglicht die Erzeugung von horizontalen Ultraschall-Scherwellen in der Leitungswand durch eines von zwei physikalischen Phänomenen, die aus Wechselströmen in einem statischen Magnetfeld resultieren: Lorentzkraft und Magnetostriktion. Das EMAT ILI-System ist so aufgebaut, dass es Ultraschallwellen erzeugt, die aus Modi niedriger und höherer Ordnung bestehen und sich in Umfangsrichtung der Rohrwand ausbreiten, ohne dass ein Kopplungsmedium erforderlich ist. Mit der EMAT-Technologie, die in Rohrleitungsprüfgeräten eingesetzt wird, können lineare Anomalien in der Rohrwand identifiziert und vermessen sowie der Zustand äußerer Rohrleitungsbeschichtungen ermittelt und identifiziert werden.

Wird Rissbildung als anzunehmende Gefährdung erkannt, muss der Einsatz eines Inspektionssystems in Betracht gezogen werden, das möglicherweise entstehende Risse auffinden oder nachweisen kann, dass keine Risse aufgetreten sind.



Bild 2: Das ILI-Prüfwerkzeug bei der Ankunft am Empfänger

Bestehende Systeme zur Risserkennung bei der Pipelineinspektion, wie z. B. die elektromagnetische akustische Übertragung (EMAT) oder die Ultraschallprüfung (UT), wurden in erster Linie zur Erkennung von Ermüdungsrissen in Verbindung mit Schweißnähten und von Spannungsrisskorrosion im Rohrkörper und in der Nähe der Schweißnaht entwickelt. Diese Systeme wurden in der Vergangenheit erfolgreich eingesetzt (im Falle von EMAT seit mehr als 15 Jahren), und obwohl es anerkanntermaßen bei allen Formen der ILI Einschränkungen gibt, sind sowohl EMAT als auch UT in der Industrie gut akzeptiert. Es handelt sich um etablierte Methoden zur Erkennung und Größenbestimmung verschiedener Arten von linearen rissähnlichen Anomalien, doch die Arten von Rissen und die kritischen Rissgrößen im Zusammenhang mit Wasserstoffbetrieb sind noch immer Gegenstand der Forschung. Deshalb arbeitet ROSEN mit den Betreibern zusammen, um die kritischen Rissgrößen (abhängig von den lokalen Werkstoffeigenschaften) und die damit verbundenen Anforderungen an die Risserkennung zu verstehen. Sobald diese Grundlagenarbeiten abgeschlossen sind, können Testmuster erstellt und Kombinationen von Technologien getestet werden, um herauszufinden, wie sich zuverlässige Inspektionen am besten durchführen lassen.

Mit den richtigen Kombinationen von Technologien lassen sich z. B. Bereiche mit hoher Spannung oder früherer plastischer Verformung identifizieren, die vor der Umstellung auf Wasserstoffbetrieb gründlich geprüft werden müssen.

Für Leitungsnetze, die bereits Wasserstoff enthalten, hat ROSEN Prüfwerkzeuge, die für bis zu 100 % Wasserstoff und 100 bar bei Umgebungstemperatur getestet und zugelassen sind. Dabei werden spezielle Molchkonfigurationen in Bezug auf Dichtung, Werkstoff der Topfscheiben und H₂-geprüfte elektronische Komponenten, Legierungen und Magnete verwendet.

Die Rohrleitungs-DNA verstehen

Wie bereits erwähnt, ist die Kenntnis der Materialeigenschaften von Wasserstoff für den sicheren Betrieb der Leitung unerlässlich. Aus diesem Grund schreibt die ASME B31.12

zerstörende Materialprüfungen mit einer Häufigkeit von einer Prüfung pro Meile vor, wenn eine bestehende Leitung umgewidmet wird. Für die Industrie ist es wichtig, die Materialeigenschaften der Rohre zu verstehen, ohne häufige Ausgrabungen durchführen zu müssen. Der in der Norm vorgegebene Ansatz, Werkstoffuntersuchungen in vorbestimmten Abständen durchzuführen, kann dazu führen, dass Ausreißer oder kleine Populationen mit unterschiedlichen Eigenschaften übersehen werden. Demgegenüber ist die Strategie, zunächst die vorhandenen Populationen zu identifizieren und dann in jeder dieser Gruppen einen Satz an zerstörenden Prüfungen durchzuführen, effizienter und kann zudem zu einer verbesserten Gesamtsicherheit führen.

Dies kann durch den Materialverifizierungsservice von ROSEN (das Pipeline-DNA-Verfahren) erreicht werden, der einen umfassenden Überblick über den Aufbau der Pipeline bietet. Das Verfahren kombiniert mehrere ILI-Datensätze wie PGS, MFL, Geometrie, Kartierung, Materialeigenschaften und andere relevante Informationen, um „Rohr-Populationen“ innerhalb einer Pipeline zu ermitteln und Ausreißer zu identifizieren.

Bestimmung der Rohrfestigkeitsklasse

Traditionell war ILI nicht geeignet, um Festigkeitsdaten zu liefern, aber mit dem Einsatz der Pipe Grade Sensor (PGS)-Technologie von ROSEN wird die Festigkeit in jedem Rohr ermittelt und jeder Rohrpopulation eine Festigkeitsklasse zugewiesen. Dieser Ansatz wurde entwickelt, um nachzuweisen, dass die geforderten Festigkeitskennwerte in Pipelines eingehalten werden, deren Dokumentation nicht den heutigen Anforderungen entspricht, in der Regel also ältere Pipelines. Er ist jedoch auch für die Identifizierung von Rohren mit höherer Festigkeit als erwartet geeignet. Diese sind möglicherweise anfälliger für die mit Wasserstoffbetrieb verbundenen Gefährdungen und sollten vor der Umwidmung gesondert bewertet werden.

Hard Spot-Erkennung

Stähle mit hoher Zugfestigkeit und Härte sind bekanntermaßen anfällig für wasserstoffbezogene Schäden wie wasserstoffinduzierte Rissbildung (HIC). Die ASME B31.12 empfiehlt die Verwendung von Stahlsorten mit einer maximalen Streckgrenze von 358 MPa, wenn Wasserstoff transportiert werden soll. Zusätzlich ist die Härte auf 237 BHN begrenzt. Das Rohrmaterial kann örtlich begrenzte Bereiche erhöhter Härte aufweisen, die in API 5L [4] als Hard Spots bezeichnet werden. Dieser Härteanstieg wird häufig durch lokale Gefügeveränderungen verursacht. Harte Stellen sind in Verbindung mit Wasserstoff bedenklich, da sie die Rissbildung fördern können. Dies wird in der ASME B31.12 anerkannt, dementsprechend sind Hard Spots (auch „metallurgische Kerben“ genannt) nicht akzeptabel.

Zur Detektion solcher Fehlstellen nutzt ROSEN die bewährte axiale magnetische Leckage (MFL)-Technologie in Kombination mit Wirbelstrom (EC), um Stellen mit erhöhter Härte entlang der gesamten Pipeline zu finden. Dieser RoMat DMG Service bietet eine einzigartige Möglichkeit der Härteprüfung, die die Sicherheit der Pipeline erhöht und die Effizienz durch die Vermeidung unnötiger Aushubarbeiten maximiert.

Fallstudie

Ein 12 Meilen langer Pipelineabschnitt für den Transport von Wasserstoff wurde 1996 in den USA installiert. Der Betreiber wandte sich 2017 an ROSEN, um eine Methode zur sicheren Inspektion des Leitungsabschnitts in Wasserstoff mit einer Kombination aus Geometrie und magnetischer Streuflusstechnik (MFL) zu finden. Aufgrund der Eigenschaften des Produkts wurde der Molch mit nicht standardmäßigen Komponenten wie Topfscheiben ausgestattet, um das Risiko statischer Aufladung zu verringern, der Zersetzung zu widerstehen und geeigneten Schutz gegen ungleichmäßige Abnutzung zu gewährleisten. Weitere Änderungen wurden am Werkzeug vorgenommen, um das potenzielle Risiko von Wasserstoffschäden am Werkzeug selbst (z. B. an den Magneten) zu verringern. Obwohl die Standardeinstellung des Werkzeugs einen Mindestdruck von 435 PSI erforderte, musste es bei der ersten Inspektion mit einem Druck von ~270 PSI und einer Durchflussrate von 11 MMscfd (= Million standard cubic feet per day) vorwärts bewegt werden. Um übermäßige Geschwindigkeiten durch Druckaufbau in den Installationen zu reduzieren und gleichzeitig genügend Dichtheit zu gewährleisten, um das Werkzeug durch die Leitung zu treiben, wurden verschiedene Bypass-Mechanismen eingebaut.

Nach Abschluss des Prüfdurchlaufs gab es keine Schäden am Werkzeug oder seinen Komponenten, und die Topfscheiben zeigten nur minimalen Verschleiß. Die resultierenden Daten des Kombinationswerkzeugs zeigten eine 100-prozentige Sensorabdeckung sowohl für die Geometrie als auch für die MFL-Anteile und die Magnetisierungswerte lagen innerhalb der vorhergesagten Bereiche.

Angesichts des Erfolgs der ersten Inspektion wandte sich der Betreiber 2019 an ROSEN für eine erneute Inspektion des Leitungsabschnitts. Diesmal wurde ein Systemdruck von ca. 340 PSI bereitgestellt, wobei die gleiche Durchflussrate beibehalten wurde.

Bei der Überprüfung der Daten wurde festgestellt, dass das Werkzeug immer noch einige Geschwindigkeitsspitzen aufwies, aber der erhöhte Druck ermöglichte eine insgesamt geringere Geschwindigkeit und eine stabilere Prüfung. Die Daten hatten wieder eine 100-prozentige Sensorabdeckung sowohl für die Geometrie als auch für die MFL-Abschnitte und waren für die Auswertung akzeptabel. Die Daten wurden genutzt, um den Integritätsstatus des Pipelinesegments zu bestimmen. Die gewonnenen Erfahrungen können in Zukunft auf andere Inspektions-Technologien übertragen werden.

Schlussfolgerungen

Die Umwidmung der bestehenden Erdgasinfrastruktur auf Wasserstoff bringt einzigartige Herausforderungen für das Integritätsmanagement mit sich. Die Erfahrungen aus dem Betrieb von Erdgas- und bestehenden Wasserstoffpipelines können jedoch an diese Herausforderungen angepasst werden. Bei den Managementstrategien wird es darum gehen, die „DNA“ der Werkstoffe zu verstehen und zu testen sowie In-Line-Inspektionen durchzuführen, um die Betriebstauglichkeit der Pipelines zu prüfen.

Bei Wasserstoffleitungen sind einige der größten zeitabhängigen Integritätsrisiken mit der möglichen Wasserstoffversprödung des Pipelinestahls und der daraus resultierenden

Gefahr von Rissen verbunden. Die Inspektion von Wasserstoffpipelines kann auch aufgrund der unterschiedlichen physikalischen und fließtechnischen Eigenschaften von Wasserstoff im Vergleich zu Erdgas eine Herausforderung darstellen. Trotzdem können Inspektionen durchgeführt werden, und ROSEN kann auf eine nachweisliche Erfolgsbilanz bei der Inspektion von Wasserstoffpipelines verweisen.

Neben der Anpassung bestehender Technologien und Dienstleistungen an die besonderen Anforderungen eines Wasserstoffnetzes sind die ROSEN-Dienstleistungen für Wasserstoffanlagen in ein ganzheitliches Integritätsmanagement integriert, das wasserstoffbezogene Gefährdungen, Wechselwirkungen und Defekte berücksichtigt. Pipeline-Betreiber sind so in der Lage, nachhaltige Entscheidungen für die Umwidmung ihrer bestehenden Gasnetze auf Wasserstoff zu treffen und einen in allen Aspekten der Leistung und Sicherheit zuverlässigen Wasserstofftransport zu gewährleisten.

Referenzen

- [1] ASME, ASME B31.12, Hydrogen Piping and Pipelines, New York, 2019
- [2] Sandana D, Gallon N., Andrews, R.A., Palmer-Jones R.: Crack management of hydrogen pipelines, International Conference of Hydrogen Safety, Edinburgh, 21-24 September 2021
- [3] Gallon, N., Van Elteren, R.: Existing pipeline materials and the transition to hydrogen, Pipeline Technology Conference, Berlin, 2021
- [4] Amerikanisches Erdölinstitut API, API 5L

SCHLAGWÖRTER: Wasserstofftransport, Umstellung von Erdgaspipelines, In-Line-Inspektion (ILI), Risserkennung, Rohrleitungs-DNA

AUTOREN

Dr. MARION ERDELEN-PEPPLER
Principal Engineer World-Wide Special Assignment
ROSEN Germany GmbH, Lingen (Ems)
Tel. +49 591 9136-9567
merdelenpeppler@rosen-group.com



NEIL GALLON
Principal Engineer
ROSEN Group



MICHAEL TEWES
Regional Business Line Manager Advanced Pipeline Diagnostics
ROSEN Group