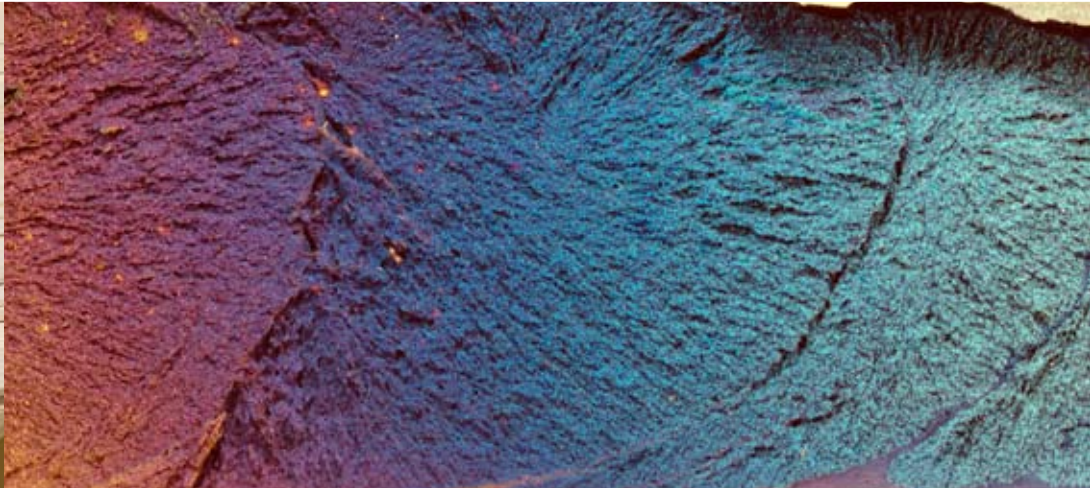
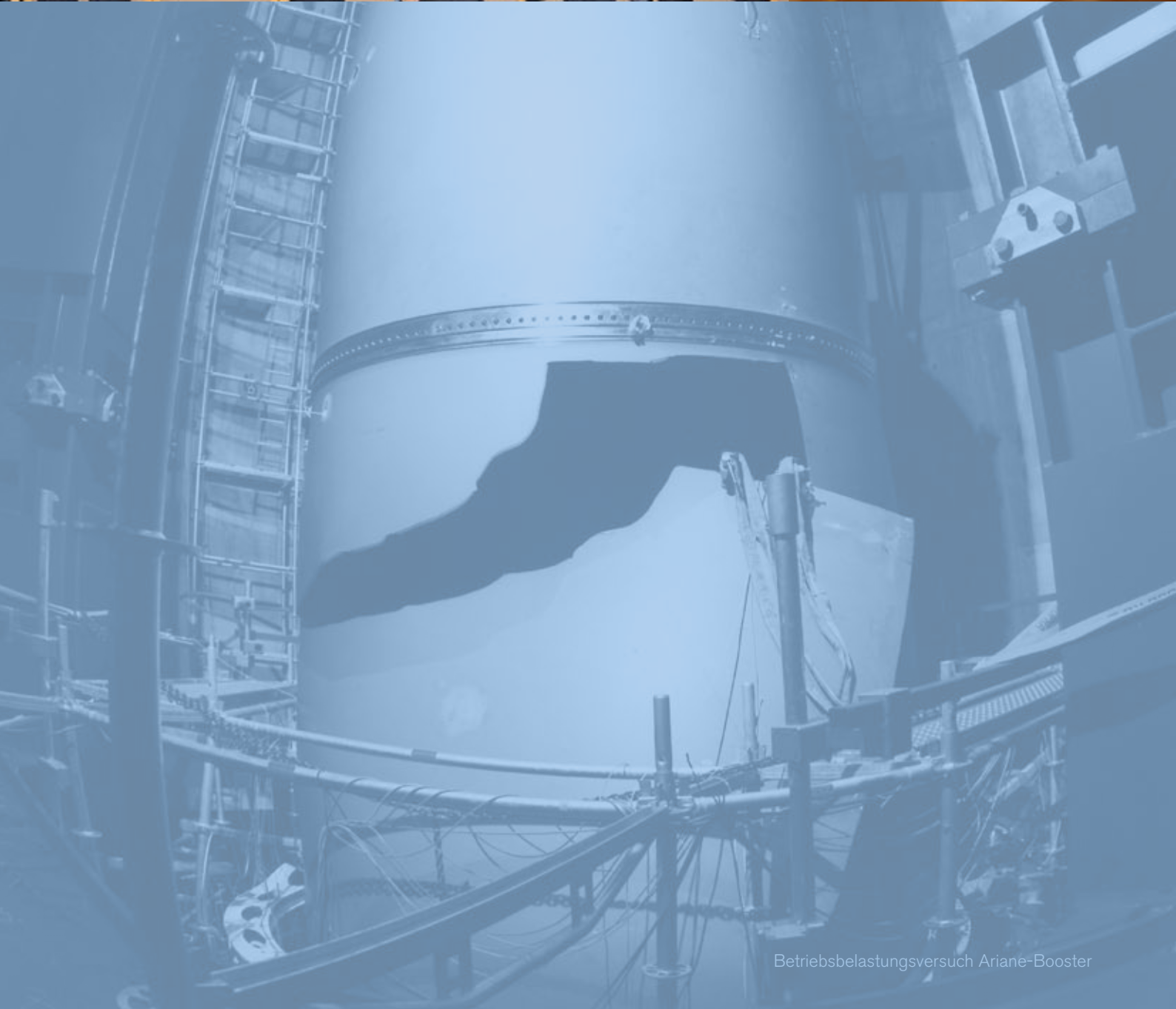


*Einfluss der Temperatur  
auf  
die Festigkeitseigenschaften  
des Eisens.*



**125 Jahre  
Materialprüfungsanstalt  
MPA  
Universität Stuttgart  
1884 – 2009**

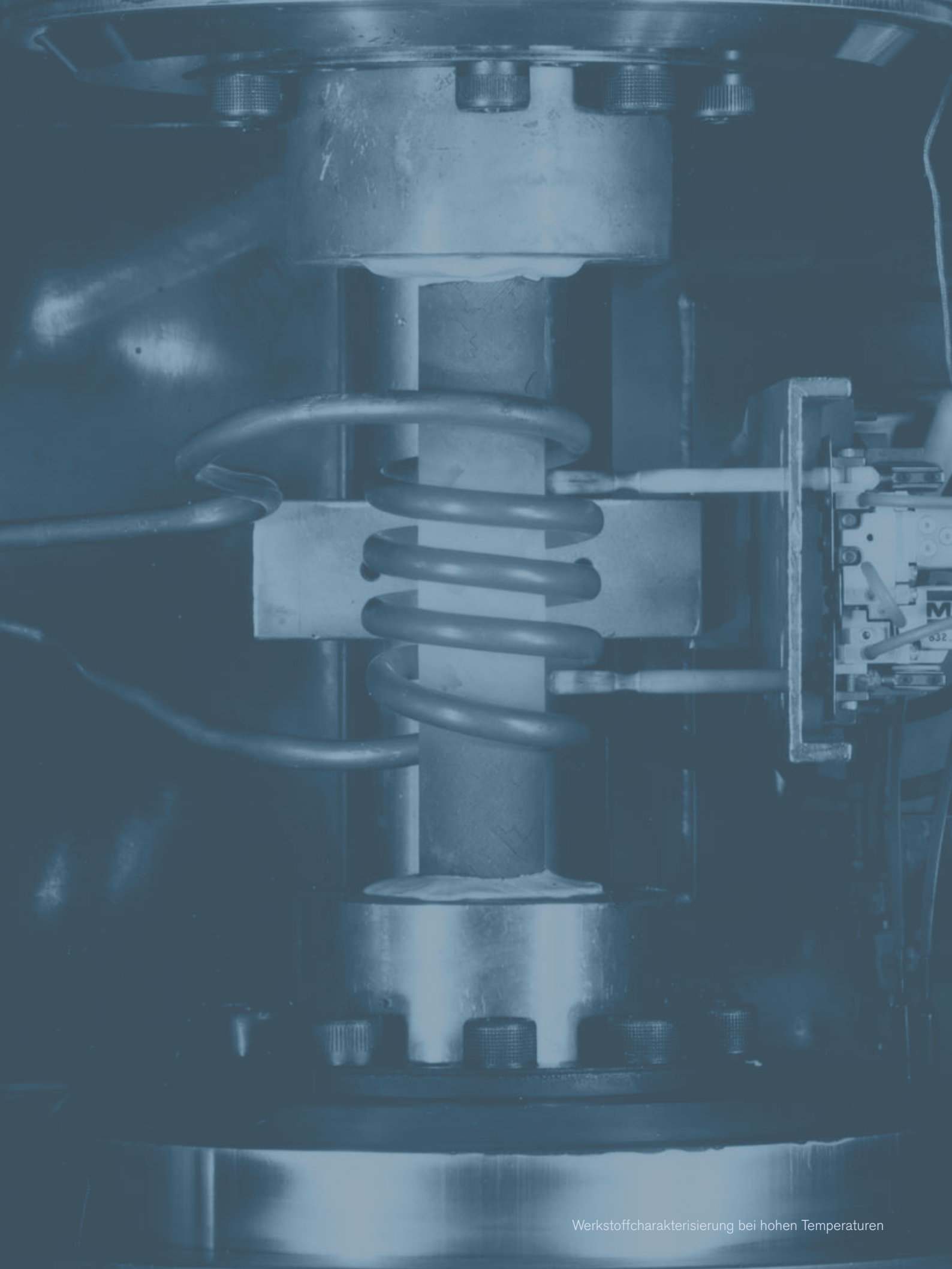


**125 Jahre  
Materialprüfungsanstalt  
MPA  
Universität Stuttgart  
1884 – 2009**



Festschrift zur Festveranstaltung  
am 8. Oktober 2009  
in Stuttgart

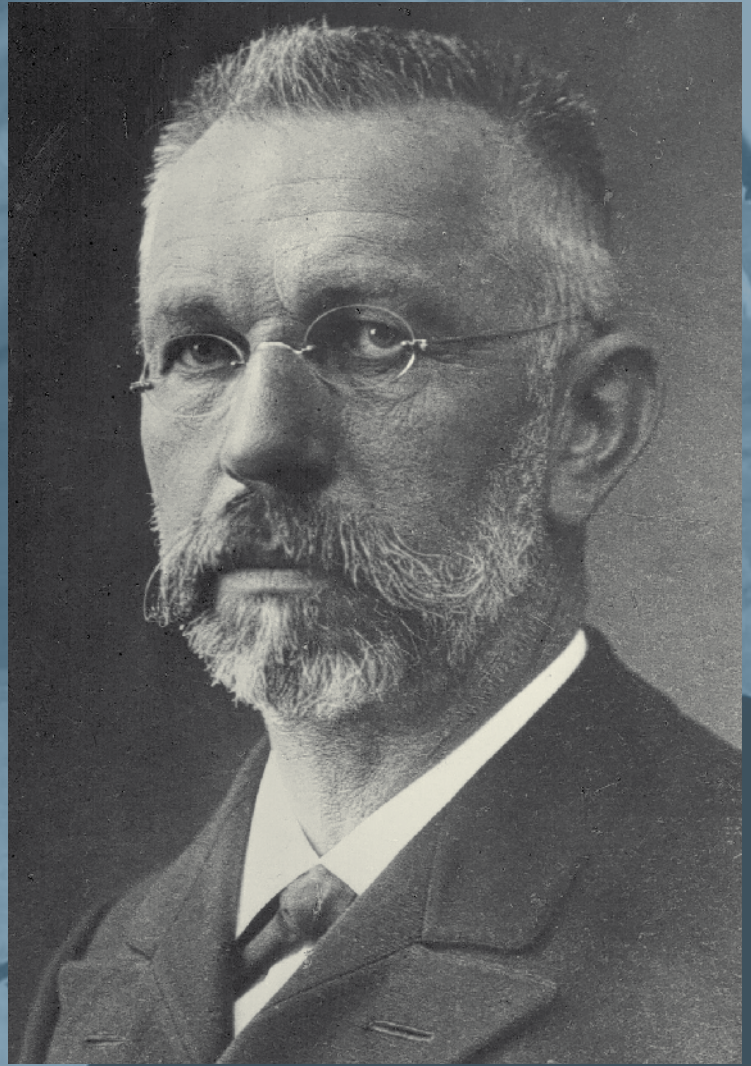






Inhalt

<b>Vorwort</b>	7
Institutsleiter/Direktoren	16
<b>Grußworte</b>	
Prof. Ullrich Martin	19
Prof. Michael Schmidt / Prof. Ulrich Nieken	25
Dipl.-Ing. Manfred Erve	27
Dr. Georg N. Stamatelopoulos	30
Dr. Reinhard Maaß	32
Prof. Carl-Dieter Wuppermann	34
<b>Vorträge</b>	
Dr. Johannes Lambertz	39
Dr. Robert Tregoning / Carol Moyer	51
Hari Shankar Kushwaha	85
Prof. Konrad Bergmeister	137
Prof. Bernd Hillemeier	175
Dr. Hans-Josef Zimmer	187
<b>Festvortrag</b>	
Prof. Peter Gross	195
<b>Verleihung der Carl-von-Bach-Medaille an Prof. Teruo Kishi</b>	209
<b>Sponsoren</b>	212
<b>Bildergalerie</b>	216
<b>Moderation: Jo Frühwirt, SWR Fernsehen</b>	
<b>Musikalische Umrahmung:</b>	
<b>Blechbläserensemble Metallophon unter der Leitung von Rudi Scheck</b>	



Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos

*Geschäftsführender Direktor der MPA Universität Stuttgart*

## 125 Jahre MPA Universität Stuttgart



In diesem Jahr feiert die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) ihr 125-jähriges Bestehen. Dies wurde am 8. Oktober mit einem Festakt in der Staatsgalerie Stuttgart mit internationaler Beteiligung gefeiert.

Die MPA Universität Stuttgart ist ein Zentralinstitut der Universität und besteht aus den fünf Fachbereichen „Baustoffe und Brandschutz“, „Baukonstruktionen und Werkstofftechnik“, „Berechnung, Auslegung und Betriebsverhalten“, „Erhaltung von Bauten und Anlagen“ und „Geotechnik“. Sie ist in dieser Konstellation, sowohl was Arbeitsfelder und Größe betrifft, als Universitätsinstitut zumindest in Europa ohne Beispiel.

Die Entwicklung der Materialprüfungsanstalt geht auf das Ende des 19. Jahrhunderts zurück und ihre Gründung entsprach einer seinerzeitigen Notwendigkeit. Werkstoffe und Konstruktionen wurden bis zu jener Zeit nämlich vorwiegend auf empirischer Grundlage hergestellt und beurteilt. Das zugrundeliegende Wissen war von Generation zu Generation meist mündlich weitergegeben worden und bildete bis an die Schwelle der

Neuzeit die Grundlage für Handwerk und Industrie. Aus dieser Situation heraus wurden im damaligen Königreich Württemberg Anstrengungen unternommen, durch die Einrichtung eines Lehrstuhls für Maschinenelemente, Dampfmaschinen, Dampfkessel und Elastizitätslehre am Königlichen Polytechnikum eine richtungsweisende Einrichtung zu schaffen.

Im Jahre 1878 wurde Carl von Bach auf diesen Lehrstuhl berufen. Auf sein Betreiben hin wurde dann im Jahre 1884 durch Bekanntmachung des „Departements des Kirchen- und Schulwesens“ im Staatsanzeiger für das Königreich Württemberg die Gründung der Materialprüfungsanstalt für die Bereiche Maschinenbau und Bauwesen am Polytechnikum Stuttgart angezeigt. In der damaligen Verfügung steht: „Die Materialprüfungsanstalt ist bestimmt, den Interessen der Industrie wie auch denjenigen des Unterrichts zu dienen“.

Die damalige Vorgabe gilt nach wie vor. Auch heute noch besteht eine enge Verknüpfung zwischen Praxis und Lehre. Dies ist gewährleistet durch die beiden Professoren, die die MPA in Personal-





*Neubau der Materialprüfungsanstalt (1907)*

union leiten (geschäftsführend ist zur Zeit Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos, der weitere Direktorenposten ist zur Zeit nicht besetzt), und mit dem jeweiligen Lehrstuhl (Lehrstuhl für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre bzw. dem Lehrstuhl für Werkstoffe im Bauwesen) in den Fakultäten Energie-, Verfahrens- und Biotechnik bzw. Bau- und Umweltingenieurwissenschaften und damit auch in der Lehre fest verankert sind.

Nach dem Ausscheiden des Gründers Staatsrat Carl von Bach im Jahre 1922 wurde Richard Baumann, Professor für Elastizitäts- und Festigkeitslehre, zum Vorstand der Materialprüfungsanstalt ernannt.

Die zunehmende Spezialisierung hatte 1927, nach dem Tode Professor Baummanns, zur Aufgliederung der Prüfungsanstalt in die Abteilungen Maschinenbau und Bauwesen geführt. 1930 erfolgte auch eine verantwortungsmäßige Trennung beider Abteilungen in zwei eigenständige Anstalten.

Die Abteilung Maschinenbau behielt den ursprünglichen Namen „Staatliche Materialprüfungsanstalt“ (MPA). Nach dem Tode Baummanns wurde die Anstalt kommissarisch von Professor Otto Graf geleitet, bis 1931 Erich Siebel als Professor für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre berufen wurde und der MPA bis 1940 und später wieder von 1947 bis 1961 als Direktor vorstand. Während Erich Siebel als Präsident der Materialprüfungsanstalt Berlin-Dahlem

von 1940 bis 1947 tätig war, übernahm Otto Graf die Vorstandspflichten. Die Herren Ulrich (bis 1944), Wellinger (bis 1945) und Gimmel (bis 1947) waren kommissarische Institutsleiter. Prof. Karl Wellinger wurde 1961 auf den Siebelschen Lehrstuhl berufen und war bis 1976 Direktor der MPA Stuttgart. Ihm folgte Prof. Karl Kussmaul nach, der bis 1998 der MPA vorstand. Seit 1998 ist Prof. Eberhard Roos Direktor der Staatlichen Materialprüfungsanstalt, seit 2003 geschäftsführender Direktor der wiedervereinigten Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart.

Die Abteilung Bauwesen wurde 1936 in „Institut für Bauforschung und Materialprüfungen des Bauwesens“ umbenannt. Dieses Institut wurde von 1927 bis 1950 von Prof. Otto Graf geleitet, der, wie auch seine Nachfolger, an der Universität Stuttgart Baustoffkunde lehrte und diesem Lehrstuhl vorstand. Von 1952 bis 1969 stand Prof. Friedrich Tölke an der Spitze des Instituts. In seiner Amtszeit wurde 1952 das Institut in „Amtliche Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen (FMPA-Bauwesen)“ umbenannt. 1953 erhielt die FMPA in Würdigung der Verdienste ihres langjährigen Leiters von der Universität Stuttgart den Beinamen Otto-Graf-Institut. Friedrich Tölke wurde von Gustav Weil (1969 - 1972) abgelöst und diesem folgte von 1973 bis 1990 Gallus Rehm. Unter ihm wurde die FMPA-Bauwesen 1980 dem Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie Baden

Württemberg als „Forschungs- und Materialprüfungsanstalt Baden-Württemberg (Otto-Graf-Institut)“ zugeordnet. Gleichzeitig wurde das Chemisch-Technische Prüfamt mit Abteilungen in Stuttgart und Karlsruhe Teil der FMPA BW. Unter Prof. Hans-Wolf Reinhardt (1990-2006) erfolgte 2000 die Wiedereingliederung des Otto-Graf-Instituts in die Universität Stuttgart als „Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut (FMPA)“. Von 2006 bis 2008 war Prof. Christoph Gehlen Direktor der MPA und Leiter des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen.

Mit Wirkung vom 01.07.2003 wurden die „Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart“ und die „Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut (FMPA)“ zur „Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart, Otto-Graf-Institut (FMPA))“ wiedervereinigt. Mit dem Zusammenschluss der beiden Einrichtungen zu einer zentralen Universitätseinrichtung verfolgte die Universität Stuttgart das Ziel, die vorhandenen Ressourcen zu bündeln und die Effizienz und Effektivität auf dem Gebiet der Materialprüfung und -forschung durch Nutzung von Synergien zu steigern. Mit der neuen Einrichtung soll darüber hinaus den Instituten des konstruktiven Ingenieurbaus ein verbessertes experimentelles Arbeiten ermöglicht werden.

Die wesentlichen Arbeitsfelder und Forschungsthemen der MPA befassen

sich mit allen Fragen, die das Werkstoffverhalten in Bauteilen und deren Sicherheit beeinflussen.

Die maßgeblichen Tätigkeitsfelder des Bereiches Maschinenbau der MPA Universität Stuttgart umfassen, neben der Werkstoffzulassung, die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung von neuen Werkstoffen für innovative Anwendungen. Dies sind z. B. hybride Verbundwerkstoffe beispielsweise für Hochtemperaturanwendungen mittels der Kombination eines gasdichten Stahlgrundkörpers mit faserverstärkter Keramikmatrix als Festigkeitsträger. Ein anderes Beispiel ist die Optimierung von Werkstoffen zur Verbesserung von Festigkeit und Zähigkeit durch die Modifikation der chemischen Zusammensetzung in Verbindung mit entsprechenden Wärmebehandlungsverfahren. Das Ziel ist dabei die Einstellung thermodynamisch stabiler Ausscheidungsstrukturen im Nano- und Mikrobereich.

Entscheidend für den Anwendungserfolg ist die an den Werkstoff angepasste Optimierung und Weiterentwicklung von Verarbeitungsverfahren, wie z. B. der Schweißtechnik bei hochfesten Stählen, Komplexphasenstählen und Mischverbindungen aus unterschiedlichen Werkstoffen zur Verbesserung der Festigkeit, Zähigkeit und zerstörungsfreier Prüfbarkeit. Dies umfasst auch die Weiterentwicklung von Füge-techniken für besondere Anwendungen wie Punktschweißen, mechanisches Fügen und die



*Ingenieurslaboratorium  
(1900)*



Maschinenhalle (1907)

Rührreibschweißtechnik.

Die beanspruchungsgerechte Werkstoffcharakterisierung und -qualifizierung ist eine unabdingbare Forderung der Festigkeitsberechnung für die Auslegung und Sicherheitsanalyse. Hier arbeitet die MPA intensiv an der Ermittlung von fortgeschrittenen Werkstoffgesetzen bzw. -modellen für komplexe Belastungen (Kriechen, Ermüden, Höchstbelastungsgeschwindigkeiten) und Umgebungsbedingungen zur Berechnung der Versagensbeanspruchung, der Lebensdauer von Bauteilen. In diesem Zusammenhang sind entsprechende Versuche mit bauteilähnlichen Spannungszuständen und Umgebungsbedingungen entscheidend zur Identifikation der im Werkstoff ablaufenden Schädigungsprozesse. Zur Identifikation dieser Prozesse werden von der MPA Universität Stuttgart neue Mess- und Prüfverfahren auch für extreme Umgebungs- und Randbedingungen (korrosive Umgebung, hohe Dynamik) entwickelt und angewendet, um die entsprechenden Daten, Kennwerte und Werkstoffgesetze zu erhalten. Im Einzelnen sind die Schwerpunkte die Bestimmung von Ermüdungsgesetzen für unterschiedliche Temperaturen und Medien, Stoffgesetze für Werkstoffe und Bauteile der Hochtemperaturtechnik bis 1000°C, Verfahren zur Bewertung der Interaktion von Kriechen und Ermüdung (Low Cycle Fatigue / High Cycle Fatigue (LCF/HCF)), sowie Bruchmechanikkennwerte für komplexe Randbedingungen

(Temperatur, Korrosion, Oxidation). Hierzu gehört auch die Quantifizierung von Medieneinflüssen auf die Werkstoffeigenschaften sowie das Verschleißverhalten von Werkstoffpaarungen in unterschiedlichen Umgebungen.

Ein weiteres zentrales Forschungsgebiet der MPA Universität Stuttgart ist die Sicherheitsbewertung von Komponenten und Bauteilen. Hierzu zählen die Entwicklung von Konzepten zur Sicherheits- und Integritätsbewertung von Komponenten und Systemen sowie die probabilistische Sicherheitsanalyse ganzer Anlagen. Es werden Untersuchungen zum Werkstoffverhalten bei mehrachsigen Spannungszuständen durchgeführt und entsprechende Werkstoffgesetze unter Berücksichtigung der Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf reale Bauteile formuliert. Wichtig ist dabei die Lösung der Frage nach der Übertragbarkeit der Werkstoffkennwerte, ermittelt an einfach belasteten Laborproben auf mehrachsig beanspruchte Bauteile bei statischer, quasistatischer sowie dynamischer Belastung und bei Ermüdungsbeanspruchung. D. h. es sind Konzepte und Verfahren zur Bewertung von Spannungen, Verformungen und Spannungszuständen in Bauteilen zu entwickeln. Dies gilt in gleichem Maße für den Einfluss und die Auswirkung von Fügeverfahren, wie z. B. das Schweißen, auf das Bauteilverhalten und die Bewertungsmethoden.

Ergänzend wird über Simulationsmethoden das Werkstoff- und Bauteilverhalten



ten ab initio simuliert. In Verbindung mit experimentellen Untersuchungen und Mikrostrukturuntersuchungen der Ausscheidungen und Phasen im Nano- und Mikrobereich werden die Simulationsverfahren verifiziert und weiterentwickelt mit dem Ziel, die Optimierungsmaßnahmen auf die maßgebenden Parameter zu konzentrieren. Beispielsweise werden molekulardynamische Verfahren zur Berechnung der Phasenentstehung und -veränderung im Werkstoff durch Herstellung und Betrieb durchgeführt. Die mikromechanisch basierte, schädigungsmechanische Simulation kann dann den Versagensprozess eines Bauteils modellieren. In Verbindung mit der kontinuumsmechanischen, makroskopischen Simulation des Bauteilverhaltens mit den bereits erwähnten fortgeschrittenen konstitutiven Materialgesetzen, die bereits für die Berechnung des Spannungs- und Verformungszustandes realer Bauteile in der Phase der Konstruktion eingesetzt werden, kann damit ein Skalenbereich von nm bis m im Hinblick auf das Werkstoff- und Bauteilverhalten abgedeckt werden.

Auf dem traditionellen Arbeitsgebiet der MPA, der Materialprüfung, hat sich das Arbeitsgebiet weg von den Standardprüfungen hin zur beanspruchungsgerechten Bauteilprüfung zur Verkürzung des Entwicklungs- und Erprobungsaufwandes gewandelt. Hierbei einbezogen ist die Anwendung moderner Methoden zur Ermittlung von versagensbestimmenden

Größen (Spannungen, Dehnungen) unter Einbeziehung aller bei technischen Bauteilen maßgebenden Belastungen (mechanische und thermische Belastungen, Medium, Verschleiß). Aktive Beiträge zum Umweltschutz werden z. B. über Forschungsarbeiten zur Nachhaltigkeit von Dichtungen, Optimierungen und Qualifizierungen von Schweißverbindungen für Windkraftanlagen, Ressourcenschonung über Untersuchungen zur Lebensdauer-Verlängerung und der Lebensdauerabsicherung hochwertiger Bauteile, z. B. bei Wasser- und Kernkraftwerken, geleistet.

Die wesentlichen Tätigkeitsfelder des Bereiches Bauwesen der MPA Universität Stuttgart umfassen Prüf-, Entwicklungs-, Gutachtens- und Forschungsaufgaben bei Baustoffen und Bauteilen für den konstruktiven Ingenieurbau. Dabei reicht die Materialpalette von mineralischen Baustoffen (z. B. Beton) über Holz, Glas, Stahl, Stein bis hin zu Materialkompositen und Faserverbundwerkstoffen. Es werden alle wesentlichen Bauprodukt-Anforderungen (mechanische Festigkeit und Standsicherheit, Brandschutz, Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, Nutzungssicherheit sowie Energieeinsparung und Wärmeschutz) gemäß europäischer Bauprodukten-Richtlinie umfassend abgedeckt.

Die auf bautechnische Innovationen zielenden technisch-ingenieurmäßigen Entwicklungsarbeiten stehen häufig in Verbindung mit einer Einzelfallbewertung in Zusammenarbeit mit den Obers-



*Metallografie*



Maschinenhalle

ten Bauaufsichtsbehörden der Länder. Gleiches gilt für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, die in enger Kooperation, respektive autorisiert durch das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin erfolgen.

Die Gutachtenstätigkeiten umfassen komplexe Standsicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsanalysen von Bauwerken des Hoch-, Brücken- und Tiefbaus in Verbindung mit der Erarbeitung von Ertüchtigungsmaßnahmen und deren langfristigem Monitoring.

Die wissenschaftlichen Arbeiten, Kompetenzen und Forschungsprojekte erwachsen häufig aus ungelösten anwendungsorientierten Fragestellungen und/oder den bautechnischen Fortschritt hemmenden Problemen von Industriepartnern der MPA Universität Stuttgart. Dies bedeutet, dass die MPA-Forschungsergebnisse i. d. R. unmittelbar Eingang in bautechnische Innovationen finden.

Die MPA Universität Stuttgart ist im Bauwesen für nahezu alle europäisch harmonisierten Bauprodukte als notifizierte Stelle in Brüssel anerkannt. Sie ist außerdem im Hinblick auf die Landesbauordnungen eine umfassend anerkannte Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle in Deutschland.

Traditionell kommt den mineralischen Baustoffen im Bauwesen eine besondere Bedeutung zu. Die Zertifizierung und Fremdüberwachung von Unternehmen aus der Zementindustrie, Kraftwerksbetreiber (Flugaschen), Wafer-Industrie

(Silicastäube), Transportbetonlieferanten, Betonfertigteile, Mauersteinlieferanten, Trockenmörtelhersteller, Unternehmen aus der Dämmstoffindustrie und andere mehr bilden einen Schwerpunkt der Tätigkeiten. Neue Zulassungsverfahren konnten in jüngster Vergangenheit angestoßen werden, die wissenschaftlich-technisch von der MPA Universität Stuttgart begleitet werden.

Neben den reinen materialtechnischen Untersuchungen werden anwendungsnahe Forschungsprojekte im Bereich der Betontechnologie (z. B. selbstverdichtender Beton, Frostwiderstand, Maschinengewichte mit hohen Qualitätsansprüchen), des Mauerwerks (Ettringit- und Thaumasilbildung) und der Dämmstoffe (z. B. Entwicklung eines Dämmstoffs aus Holzwolle) bearbeitet.

Schwerpunkte der Arbeit im Bereich Dauerhaftigkeit und Schutz von Bauten sind Untersuchungen und Forschungsprojekte zu Schädigungs- bzw. Korrosionsprozessen an metallischen und historischen Baustoffen sowie Kunststoffen im Bauwesen. Basis dieser Arbeiten sind moderne analytische und physikalisch-chemische Verfahren zur Charakterisierung der Materialien und zur Untersuchung von Abbau- bzw. Zersetzungs- (Korrosions-) Produkte. Wo erforderlich, werden ausgewählte mechanisch-technologische Verfahren und mineralogische Untersuchungen zusätzlich eingesetzt. Im Zusammenhang mit der Aufklärung von Schadensursachen

werden Konzepte zur Sanierung geschädigter Bauwerke und Bauteile erarbeitet. Die Maßnahmen zur Instandhaltung und Instandsetzung von Bauwerken schließen die Untersuchung von Oberflächenschutzsystemen an metallischen und historischen Baustoffen ein. In einer besonderen Versuchshalle stehen Einrichtungen zur Prüfung von Sportböden und Sporthalleneinrichtungen zur Verfügung.

Ein weiterer Aufgabenbereich des Bauwesens der MPA Universität Stuttgart ist die experimentelle Bestimmung des Brandverhaltens und des Feuerwiderstands sowie Kalorimetrie und Heizartbestimmungen zum vorbeugenden baulichen Brandschutz für eine Vielzahl von Bauprodukten, Bauteilen und Bauarten wie z. B. Fassaden, Bodenbeläge, Holz und Holzwerkstoffe, Kunststoffe, Textilien, Dekorationen, Filtermaterialien, Polstermöbel, Kraftfahrzeuginnenausstattung, Dächer und Dachkonstruktionen, Decken, Wände, Türen, Lärmschutzwände und Tunnelabdichtungen, Brandschutzklappen, Kabelanlagen, Abschottungen, Verglasungen, Sicherheitsschranke und Schutzhelme. Die MPA Universität Stuttgart verfügt hierfür über zwei Brandhallen mit allen nationalen sowie europäischen Brandprüfeinrichtungen und Großversuchsofen sowie über Freibewitterungsstände zum natürlichen Nachweis der Witterungsbeständigkeit und Dauerhaftigkeit flammgeschützter Baustoffe. Im Bereich Brandschutz werden Forschungs- und

Entwicklungsarbeiten zu neuen europäischen Prüfverfahren zum Brandverhalten organischer und anorganischer Baustoffe und zur Alterungsbeständigkeit des Brandverhaltens, insbesondere auch von Textilien und Kunststoffen im nichttragenden Bereich durchgeführt. Brandschutztechnische Gutachten werden u. a. für bauaufsichtliche Zustimmungen im Einzelfall oder für gerichtliche Beweissicherungsverfahren erstellt.

Im Bereich der Holzkonstruktionen wird mit Holz, einem der ältesten und gewichtsbezogen leistungsfähigsten Verbundwerkstoffe, geforscht und geprüft. Ein Werkstoff, der im Bauwesen u. a. wegen seiner ökologischen Vorteile zunehmend an Bedeutung gewinnt. Für die zukünftige weitere Leistungssteigerung der aus Holz bestehenden modernen Ingenieurwerkstoffe wie z. B. Brettschichtholz oder Brettsperrholz sind - aufgrund der Dimensionsbeschränkungen und aufgrund der wuchsbedingten Ungängen des natürlichen nachwachsenden Ausgangsmaterials - Fortschritte in der Klebe- und Füge-technik sowie in der Qualitätssicherung entscheidend. Des Weiteren gewinnen Materialverbünde von Holz mit Glasfaser und kohlenstoffverstärkten Kunststoffen, Stahl und Beton zur Realisierung weitgespannter Ingenieurtragwerke zunehmend an Bedeutung.

Die Kernkompetenzen sind dementsprechend um die Schwerpunkte Verklebungen, Klebstoffe, Verbindungstechniken sowie Grenz- und Oberflächen



*Schadensfall  
(Druckbehälter)*





MPA, Pfaffenwaldring 32,  
heute

einerseits und maschinelle und zerstörungsfreie Sortier- und Qualitätssicherungsverfahren andererseits gruppiert.

Wissenschaftliche Schwerpunkte liegen im Bereich der Erforschung und Modellbildung von Schädigungsabläufen sowie deren Verhinderung unter Berücksichtigung der stochastischen Defektverteilungen im Holz- und in den Holz-Klebstoffgrenzflächen unter Berücksichtigung des ausgeprägt anisotropen, nichtlinearen Materialverhaltens speziell bei transienten Klimabedingungen. In Kooperation mit deutschen und internationalen Holzbau-, Holzwerkstoff-, Klebstoff- und Maschinenherstellern sowie im Rahmen von Forschungsprojekten werden grundlagen- und anwendungsorientierte Forschungsvorhaben zur langfristigen Beständigkeit und Sicherheit von Verklebungen und Fügeverfahren durchgeführt.

Der Bereich „Zerstörungsfreie Prüfung“ (ZfP) der MPA Universität Stuttgart stellt ein gutes Beispiel für die Verbesserung der Synergie durch den Zusammenschluss von Aufgaben des Bauwesens und des Maschinenbaus dar, da beide Bereiche gleichberechtigt in einer Abteilung bearbeitet werden. Allgemein gilt, dass die Anwendung zerstörungsfreier Prüftechniken in beiden Bereichen eine wichtige Grundlage für Sicherheitsanalysen ist und dass Überwachungsaufgaben nicht mehr ausschließlich mittels visueller Beobachtungen abgedeckt werden können. Hier kann die MPA Uni-

versität Stuttgart auf eine langjährige Erfahrung in der Anpassung und Optimierung von Prüfmethoden (z. B. Ultraschall, Radiographie, Schallemissionsanalyse, Thermografie) an Werkstoffen und Bauteilen sowie an die Anforderungen der jeweiligen Sicherheitsstrategien (z. B. kritische Rissgrößen aus bruchmechanischen Berechnungen) zurückgreifen.

Auf dem Gebiet des Maschinenbaus werden in der zerstörungsfreien Prüfung beispielsweise Arbeiten im Rahmen von Revisionsprüfungen an Komponenten in konventionellen Kraftwerken durchgeführt. Darüber hinaus sind Mitarbeiter als Sachverständige oder Gutachter tätig, vor allem bei Gashochdruckleitungen und im kerntechnischen Bereich.

Im ZfP-Bereich „Bauwesen“ werden Anwendungen in den Bereichen Bauwerksinspektion, der Qualitätssicherung sowie der Dauerüberwachung bearbeitet. Inhaltliche Schwerpunkte sind die Qualitätssicherung von Bauprodukten in der Herstellungsphase (z. B. Frischbeton), die Inspektion von Bauteilen und Bauwerken hinsichtlich Fehlstellen, Risse, Delaminationen etc. sowie die Dauerüberwachung von Bauwerken (z. B. Brücken, Hallen oder historischen Bauwerken) u. a. mit drahtlosen Sensoren.

Das Zusammenwirken der Kompetenzen der verschiedenen Bereiche bildet die Basis für die MPA Universität Stuttgart, zustandsorientierte Instandhaltungsstrategien zur Verbesserung von Sicherheit, Verfügbarkeit und damit auch

der Wirtschaftlichkeit zu entwickeln.

Die MPA Universität Stuttgart setzt ihr reichhaltiges Wissen aus der anwendungs- und grundlagenorientierten Forschung in der direkten Beratung der Industrie in allen Fragen der Werkstoffauswahl, der Optimierung von Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren, der Berechnung von Bauteilen zum Nachweis ihrer Eignung bzw. der Erfüllung von Anforderungen spezifischer Regelwerke und bei der Aufklärung von Schäden ein. Traditionell fühlt sich die MPA Universität Stuttgart dem Transfer von Wissenschaft in die technische Praxis verpflichtet. Fachleute aus der MPA Universität Stuttgart sind daher geschätzte Mitglieder in nationalen und internationalen regelwerkssetzenden Gremien und Ausschüssen.

Eine wichtige Voraussetzung hierfür sind die intensiven Kontakte, die Stuttgarter Wissenschaftler neben den europäischen Partnerinstituten unter anderem zu Forschungsinstituten nach Japan, Korea, Indien und zu den USA pflegen.

Die Kompetenz der MPA wird durch eine Vielzahl von Akkreditierungen und Zertifizierungen hervorgehoben.

Im Jahre 2001 wurden von ehemaligen Mitarbeitern der MPA Universität Stuttgart der „Förderkreis Materialprüfungsanstalt (MPA), Universität Stuttgart e.V.“ gegründet, dessen wesentliche Ziele

- die Förderung der wissenschaftlichen Arbeit der MPA Stuttgart durch Anregungen zu Forschungsvorhaben und

sonstigen wissenschaftlichen Untersuchungen,

- die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses auf dem Gebiet der Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre durch Vergabe von 2 Förderpreisen pro Jahr für die besten Diplomarbeiten und/oder Studienarbeiten an der MPA und
  - die Organisation von Seminaren und Vortragsveranstaltungen zur Weiterbildung und zum Wissenstransfer aus der MPA in die Praxis
- sind und der die MPA in Ausbildung und Forschung unterstützt.



*MPA, Pfaffenwaldring 4,  
heute*

## Leiter der Staatlichen Materialprüfungsanstalt



1884 - 1922  
Prof. Carl von Bach



1922 - 1928  
Prof. Richard Baumann



1928 - 1931  
Prof. Otto Graf (komm.)



1931 - 1940  
Prof. Erich Siebel



1940 - 1944 (komm.)  
Prof. Max Ullrich



1944 - 1945 (komm.)  
Prof. Karl Wellinger



1945 - 1947 (komm.)  
Prof. Paul Gimmel



1947 - 1961  
Prof. Erich Siebel



1961 - 1976  
Prof. Karl Wellinger



1976 - 1998  
Prof. Karl Kussmaul



1998 - 2003  
Prof. Eberhard Roos

1930 wurde die Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) in zwei eigenständige Anstalten für den Bereich Maschinenbau und Bauwesen getrennt.

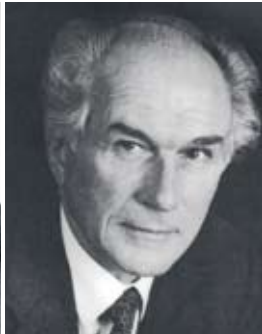
## Leiter der Forschungs- und Materialprüfungsanstalt (Otto-Graf-Institut)



1931 - 1950  
Prof. Otto Graf



1969 - 1972  
Prof. Gustav Weil



1973 - 1990  
Prof. Gallus Rehm



1990 - 2003  
Prof. Hans-Wolf Reinhardt  
Direktor

Ohne Foto:  
1952 - 1969  
Prof. Friedrich Tölke

2003 wurden die Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart und die Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut (FMPA) zur Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart wiedervereinigt.

## Direktoren der Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart (seit 2003)



2003 - 2006  
Prof. Hans-Wolf Reinhardt  
Direktor



seit 2003  
Prof. Eberhard Roos  
geschäftsführender Direktor



2006 - 2008  
Prof. Christoph Gehlen  
Direktor





Prüfung einer Feuerschutztür im Wandprüfofen nach DIN 4102-5 in einer Verglasung

Prof. Dr.-Ing. Ullrich Martin  
*Dekan der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der  
Universität Stuttgart*

## Grußwort der Fakultät 2 – Bau- und Umweltingenieurwesen

Sehr geehrte Damen und Herren, liebe Gäste von fern und nah,

bevor ich beginne, möchte ich Ihnen herzliche Grüße vom Rektor der Universität Stuttgart, Prof. Wolfram Ressel überbringen, der heute leider doch verhindert ist. Er bittet Sie, ihn zu entschuldigen und wünscht Ihnen eine interessante und anregende Veranstaltung. Prof. Ressel hat mich gebeten, ihn zu vertreten und so spreche ich nun für die Universität Stuttgart und für die Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften.

Ich freue mich sehr, dass Sie so zahlreich der Einladung zum 125-jährigen Jubiläum der MPA Stuttgart im Stirling-Bau der Staatsgalerie Stuttgart gefolgt sind. Ich möchte zunächst das Ambiente hier würdigen, es unterstreicht die Feierlichkeit dieses Anlasses doch sehr angemessen.

Mein herzlicher Gruß gilt ebenso meinen Kollegen Prof. Ulrich Nieken, Prodekan der Fakultät für Energie-, Verfahrens- und Biotechnik, Prof. Eberhard Roos, Geschäftsführender Direktor der MPA und Prof. Große, Kommissarischer Direktor der MPA.

Mit der voranschreitenden Industrialisierung in der Mitte des 19. Jahrhunderts machten zahlreiche Unfälle, wie beispielsweise gebrochene Radsatzwellen bei Lokomotiven oder die Explosion von Dampfkesseln deutlich, dass der bis dahin verwendete Ansatz, die Auslegung (der Festigkeit) von Maschinenbauteilen rein empirisch, basierend auf zumeist mündlich überliefertem Wissen, zu beurteilen, an seine Grenzen stieß. In der Materialprüfung mussten neue Wege beschritten werden. Dieser Herausforderung stellte sich 1878 das Königreich Württemberg mit der Einrichtung einer Professur für Maschinenelemente mit den Lehrgebieten Dampfmaschinen, Dampfkessel und Elastizitätslehre am Königlichen Polytechnikum Stuttgart. Der erste Inhaber des Lehrstuhls, Carl von Bach, gründete 1884 auf Königlichen Erlass hin die MPA, damals in der Alleenstraße in Stuttgart-Mitte. Ab 1890 wurde die MPA offiziell als Institut der Universität geführt. Den Auftrag der MPA formulierte das Departement des Kirchen- und Schulwesens, sie sollte „den Interessen der Industrie wie auch



*„Letztlich können wir nur erfolgreich sein, wenn Bauingenieure und Maschinenbauer im Team, vergleichbar mit einem Orchester, zusammenwirken.“*

*Zitate in dieser Spalte jeweils aus den Interviews mit Jo Frühwirth*

denjenigen des Unterrichts dienen“. Zunächst war die Prüfung von Werkstoffen für Industrie, Handel und Gewerbe, aber keine Forschungsarbeit vorgesehen.

Am Polytechnikum Stuttgart lehrten im 19. Jahrhundert berühmte Ingenieure, die den Weg für eine Materialprüfanstalt ebneten. So legte August Wöhler die Grundlagen für systematische Materialprüfungen und damit auch für die Festigkeitslehre als neue ingenieurwissenschaftliche Disziplin. Zu seiner Zeit war es zunächst unbekannt, dass ein Werkstoff unter wechselnder Beanspruchung eine geringere Belastbarkeit aufweist als unter statischer Beanspruchung. Wöhler untersuchte die Schwingfestigkeit von Werkstoffen bzw. Bauteilen, indem er Versuchskörper zyklisch bis zu einem definierten Versagen oder einer Grenzwahrscheinlichkeit belastete. Noch heute lernen angehende Ingenieure die auf diesen Versuchen basierende Wöhler-Kurve, aus der die Zeitfestigkeit des Versuchskörpers abgeleitet wird.

Beiträge zur Elastostatik und Festigkeitslehre legte auch Otto Christian Mohr vor, welcher 1867 den Ruf als Professor für Technische Mechanik, Trassieren und Erdbau ans Polytechnikum Stuttgart annahm. Mohr war ein Mitbegründer und Meister der grafischen Methoden in der Statik. Vor allem ist er bekannt durch die von ihm entwickelte Methode, Hauptspannungen des ebenen Spannungszustandes mit Hilfe des nach ihm benannten Mohr'schen Spannungskreises

graphisch aus den Schub- und Normalspannungen abzuleiten. Der Gründungsvater der MPA, Carl Julius von Bach, war ein Schüler Mohrs. Bach gilt als der Begründer der modernen statischen Elastizitäts- und Festigkeitslehre. Für seine bahnbrechenden Erkenntnisse wurde ihm viermal ein Ehrendokortitel verliehen

Carl von Bach war zudem ein Vordenker der modernen Ingenieurausbildung. Als einer der ersten in Deutschland versuchte Bach, den bis dahin unangefochtenen Grundsatz vom „Gegensatz zwischen Theorie und Praxis“ auf dem Gebiet des Maschinenbaus in Frage zu stellen. Seiner Meinung nach genügte es nicht, Theorien basierend ausschließlich auf Theorien weiter zu entwickeln. Er sah die Notwendigkeit, theoretische Ansätze experimentell zu verifizieren. Um diesen Ansatz auch in der Hochschulausbildung zu verwirklichen, setzte er sich für ein mindestens einjähriges Pflichtpraktikum im Werkstattbereich für angehende Studenten ein. Diese Forderung wurde im württembergischen Stundenplan umgesetzt, welcher eine handwerkliche Ausbildung im Betrieb als Zulassungsvoraussetzung für die Hochschule vorschrieb. Dieser Idee wird heute noch Rechnung getragen. Auch Bachelorstudierende müssen in den Ingenieurwissenschaften Vorpraktika besuchen.

Von Bach war auch in anderen Bereichen sehr aktiv. Anfang des 20. Jahr-

hundreds wurden auf seine Initiative hin der „Internationale Verband der Dampfkesselüberwachungsvereine“ und der „Internationale Verband für die Materialprüfungen der Technik“ gegründet. Die Verbände verfassten Normen und Regelwerke, deren Überwachung und Einhaltung der MPA durch das Innenministerium des Königreichs Württemberg übertragen wurde.

Im Jahr 1907 zog die MPA aus der Stadtmitte nach Stuttgart-Berg um, wo sie in den Jahren 1928-1940 wesentlich erweitert wurde. Während des 2. Weltkrieges wurden die ursprünglichen Aufgaben der MPA eingeschränkt und zu kriegsbedingten Tätigkeiten verlagert. Die baulichen und technischen Anlagen der MPA wurden im Krieg stark zerstört. Die Anzahl an Mitarbeitern, welche von 1931 bis 1940 schon von 70 auf 150 zugenommen hatte, schrumpfte bis zum Jahr 1947 auf nur noch 25 Mitarbeiter.

Im 20. Jahrhundert fanden tiefgreifende Umstrukturierungen der MPA statt. Nach dem Tod von Bachs im Jahr 1922 folgte Richard Baumann, Professor für Elastizitäts- und Festigkeitslehre als zunächst letzter alleiniger Institutsleiter der MPA. Im Jahr 1927 wurde die MPA aufgrund der fortschreitenden Spezialisierung in zwei Abteilungen aufgegliedert, die Abteilungen Bauwesen und Maschinenbau. Beide Abteilungen wurden bis ins Jahr 2003 jeweils von Professoren geleitet, die die Führung der jeweiligen Abteilung in Personalunion mit der Lei-

tung ihres Instituts an der Universität Stuttgart verbanden.

Die Abteilung Bauwesen bekam 1936 den Namen „Institut für Bauforschung und Materialprüfungen des Bauwesens“. Dieses Institut wurde von 1927 bis 1950 von Otto Graf, Professor für Baustoffkunde, geleitet. 1962 wurde das Institut in „Amtliche Forschungs- und Materialprüfungsanstalt (FMPA) für das Bauwesen“ umbenannt. Zur Ehrung der Verdienste von Otto Graf um die Forschung zu Baustoffen und der Baukonstruktion beschloss der Senat der Universität Stuttgart 1953 die FMPA umzubenennen in „Forschungs- und Materialprüfungsanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut an der Technischen Hochschule Stuttgart“.

Sowohl das Otto-Graf-Institut als auch die staatliche Materialprüfungsanstalt - Bereich Maschinenbau - wurden zwischen 1958 und 1968 im Zuge des Aufbaus des neuen Universitätsstandorts in Stuttgart-Vaihingen mit neuen Laborflächen und Prüfeinrichtungen wesentlich erweitert. Die Anzahl der Mitarbeiter nahm als Folge des Ausbaus auf über 300 zu. Im Jahr 1980 wurde das Otto-Graf-Institut dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg angegliedert und gehörte damit, bis auf die „Abteilung Lehre“, nicht mehr zur Universität Stuttgart. Diese Abteilung wurde ausgegründet und verblieb an der Universität als Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Im Jahr 2000 wurde das Otto-Graf-Institut



wieder in die Universität Stuttgart eingliedert. Von 1990 bis 2003 wurde die Abteilung Bauwesen von Prof. Hans-Wolf Reinhardt geleitet. Prof. Reinhardt wird in diesem Jahr auch ein persönliches Jubiläum feiern, nämlich seinen 70. Geburtstag. Ich möchte ihn hier persönlich herzlich begrüßen und ihm für sein kontinuierliches Engagement in der MPA danken.

Das neue Jahrtausend stand erneut im Zeichen von Umstrukturierungen. Im Jahr 2003 wurden MPA und FMPA zur „Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart“ wieder vereinigt. Ihre Leitung übernahmen im Jahr 2003 Prof. Hans-Wolf Reinhardt als Direktor und Prof. Eberhard Roos als Geschäftsführender Direktor. Kollege Roos leitet seit 1998 die Abteilung Maschinenbau und gestaltet somit die Materialprüfungsanstalt erfolgreich seit nun mehr als 10 Jahren, wofür die Universität Stuttgart ihm mit großer Hochachtung herzlich dankt.

Mit der Schaffung einer zentralen Universitätseinrichtung wollte die Universität Stuttgart vorhandene Ressourcen bündeln und die Effizienz bzw. Effektivität auf dem Gebiet der Materialprüfung und -forschung durch Nutzung von Synergien steigern. So ist die MPA in die naturwissenschaftlich-technische Grundlagenforschung der Universität integriert. Darüber hinaus stellt die MPA der Fakultät für „Energie-, Verfahrens- und Biotechnik“ und der Fakultät „Bau- und

Umweltingenieurwissenschaften“ ihre technischen Einrichtungen für die Ausbildung von Studierenden zur Verfügung. Neben die Einbindung in die Lehre legt die MPA auch großen Wert auf den Wissenstransfer an Fachleute aus der Praxis im In- und Ausland.

In der Fakultät „Bau- und Umweltingenieurwissenschaften“ sind Mitarbeiter der MPA in die Lehre aller unserer grundständigen Studiengänge, Bauingenieurwesen, Immobilientechnik und -wirtschaft und Umweltschutztechnik, sowie in den internationalen Masterstudiengang Computational Mechanics of Materials and Structures eingebunden. Wie mir berichtet wurde, sind die Studierenden neben der Kompetenz der Mitarbeiter vor allem von der schieren Größe der Versuche beeindruckt. Immerhin können in der MPA die weltweit größten Bauteile mit bis zu 10.000 Tonnen Gewicht auf Risse, Schäden oder Ermüdungserscheinungen getestet werden. Institute unserer Fakultät nutzen ebenfalls die Laboreinrichtungen der MPA, so beispielsweise das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren des Kollegen Sobek und das Institut für Konstruktion und Entwurf der Kollegin Kuhlmann. Die enge Verzahnung wird außerdem durch den geplanten Umzug des Instituts für Geotechnik in Räumlichkeiten der MPA deutlich. Am engsten verbunden ist die Fakultät mit der MPA natürlich über das Institut für Werkstoffe im Bauwesen. An diesem Institut steht

*„Carl von Bach war nach meiner Einschätzung ein zupackender Typ. Er war ein typischer Ingenieur, der bewiesen hat, dass Ingenieure sehr professionell vorgehen.“*

mit der Nachfolge von Prof. Rolf Eligehausen zu Prof. Jan Hofmann ein Generationenwechsel an. An dieser Stelle möchte ich Herrn Hofmann nochmals herzlich im Kreis der Universität Stuttgart begrüßen. Die vakante Leitung des IWB konnte bisher leider noch nicht wiederbesetzt werden. Die Ausschreibung der Stelle stellt uns derzeit vor große Herausforderungen.

Über ihre 125-jährige Geschichte veränderten sich der Arbeitsauftrag und die Forschungsschwerpunkte der MPA immer wieder, wenn auch die ursprüngliche Aufgabenbeschreibung, „den Interessen der Industrie wie auch denjenigen des Unterrichts zu dienen“, nie ihre Gültigkeit verloren hat. In den ersten Jahren ermöglichte die Einrichtung eines Ingenieurlaboratoriums die Beschäftigung mit dem Dampfkesselbau auch für Studenten. Erste externe Aufträge erhielt die MPA von der Ministerialabteilung für Straßen- und Wasserbau des Königreichs Württemberg und der heimischen Zementindustrie. Nach und nach kamen auch Anfragen aus der Maschinenbauindustrie dazu. Mit dem beginnenden 20. Jahrhundert richtete sich der Aufgabenbereich neu aus, Schwerpunkte lagen nun auf der Prüfung von Konstruktionsmaterialien und Untersuchungen auf den Gebieten der Elastizität- und Festigkeitslehre sowie auf der Vertretung dieser Gebiete in der Lehre. Professor Baumann führte 1924 die Mikrographie ein. Nach dem zweiten Weltkrieg, in dem

sich die Aufgaben auf kriegsbedingte Zielrichtungen verlagert hatten, erfolgte eine Erweiterung des Spektrums auf die Abnahme von Dampfkraftwerken und Fernleitungsbau. In den 70er und 80er Jahren lag der Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten vor allem in der Reaktorsicherheit. Die Forschungsergebnisse der MPA beeinflussten die deutsche Sicherheitsphilosophie im Kernkraftwerksbau. Ab 1990 erschloss sich die MPA neue Bereiche in der konventionellen Kraftwerkstechnik, der Kraftfahrzeugtechnik und bei den neuen Werkstoffen. Das aktuelle Aufgabenspektrum des Bereiches Bauwesen der MPA umfasst Prüf-, Entwicklungs-, Gutachtens- und Forschungsaufgaben bei Baustoffen und Bauteilen für den konstruktiven Ingenieurbau. Als Materialien werden mineralische Baustoffe sowie Holz, Glas, Stahl, Stein bis hin zu Materialkompositen und Faserverbundwerkstoffen untersucht. Die MPA deckt alle wesentlichen Bauprodukt-Anforderungen (mechanische Festigkeit und Standsicherheit, Brandschutz, Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz, Nutzungssicherheit sowie Energieeinsparung und Wärmeschutz) gemäß europäischer Bauprodukttrichtlinien ab. Zum Aufgabenspektrum des Bereiches Maschinenbau wird Ihnen im Anschluss der Kollege Prof. Nieken Einblicke geben.

Eine der wichtigsten zukünftigen Aufgaben besteht aus meiner Sicht darin,

die Struktur der MPA so weiter zu entwickeln, dass deren Zukunftsfähigkeit langfristig gesichert ist.

Die exemplarisch erwähnten Tätigkeiten und das über Jahrzehnte gewachsene Ansehen der MPA machen mehr als deutlich, wie stolz die Universität Stuttgart auf ihre MPA sein kann. Dies spiegelt sich auch in den vielfältigen internationalen Kontakten der MPA wider, neben den zu europäischen Partnerinstitutionen nach Japan, Korea, Indien und in die USA. Ich möchte allen, die zu dem großen Erfolg dieser Einrichtung beigetragen haben und beitragen, den Dank der Universität Stuttgart aussprechen und ganz herzlich zum 125-jährigen Bestehen der MPA beglückwünschen. An der grundsätzlichen Thematik der Materialprüfung hat sich in dieser Zeit nicht viel geändert, deshalb ist auch heute noch das ingenieurtechnische Know-How gefragt, allerdings auf einer anderen Ebene.

Nicht zuletzt möchte ich allen Teilnehmern der Festveranstaltung eine interessante Feier mit spannenden Vorträgen sowie guten Gesprächen beim anschließenden Empfang wünschen und Ihnen auch die Führung durch die Staatsgalerie Stuttgart empfehlen.

Lassen Sie mich also schließen mit einem herzlichen Glückwunsch. Die MPA hat eine äußerst bemerkenswerte Vergangenheit. Ich wünsche ihr im Namen der Fakultät 2 und der Universität eine ebenso erfolgreiche Zukunft.

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt<sup>1</sup>

*Dekan der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart*

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Nieken<sup>2</sup>

*Prodekan der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik der Universität Stuttgart*

## **Grußwort der Fakultät 4 – Energie-, Verfahrens- & Biotechnik**



Die Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart - in der Fachwelt hinreichend bekannt als die MPA Universität Stuttgart - ist eine zentrale Einrichtung der Universität Stuttgart. Der Direktor des Institutes für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre in der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik ist Mitglied der kollegialen Leitung der MPA Universität Stuttgart. Damit ist die fachlich gebotene Anbindung der MPA Universität Stuttgart an den Stuttgarter Maschinenbau gegeben. Parallel dazu ist in gleicher Weise über das Institut für Werkstoffe im Bauwesen die Anbindung an das Bauingenieurwesen der Universität Stuttgart hergestellt. Im Namen aller Mitglieder der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik beglückwünsche ich hiermit unsere Kollegen der MPA Universität Stuttgart von ganzem Herzen zu Ihrem runden und Ehrfurcht gebietendem Geburtstag.

125 Jahre MPA Universität Stuttgart, das sind 125 Jahre erfolgreichster und anerkanntester ingenieurwissenschaftlicher Arbeit in den Materialwissen-

schaften auf nahezu allen Gebieten des Maschinen- und Anlagenbaus, der Energietechnik und des Bauingenieurwesens. Die MPA Stuttgart hat in diesen 125 Jahren in vorbildlicher Weise ihre Aufgaben als wissenschaftliche Forschungseinrichtung, als akademische Ausbildungsstätte und als Ansprechpartner der Industrie erfüllt. Diese Kombination ist der Schlüssel zum Erfolg der MPA Stuttgart und diese Kombination ist darüber hinaus einer der Schlüssel zum Erfolg und zur internationalen Anerkennung des deutschen Ingenieurwesens. An dieser Aufgabenstellung hat sich in den vergangenen 125 Jahren nichts verändert. Sie gilt weiterhin unverändert für die Zukunft.

Die Universität Stuttgart hat als eines ihrer Kompetenzfelder für die weitere Entwicklung in Forschung und Lehre die Materialwissenschaft benannt. Damit ist die zentrale Bedeutung der Materialwissenschaft und damit auch der MPA Stuttgart für die zukünftige Entwicklung eindeutig belegt. Ohne die essentiellen Beiträge der Materialwissenschaft sind die wünschenswerten und

*„Aber einen Wunsch hätte ich noch, dass die MPA vielleicht stärker als bisher als integrierendes Element zwischen den Naturwissenschaftlern und den Ingenieuren in der Universität wirkt. Am Material kommt viel zusammen. Da gibt es noch ein Potential, das es zu heben gilt für die nächsten Jahre.“*

<sup>1</sup> Verfasser

<sup>2</sup> Vertreter des Dekans bei der Festveranstaltung



gebotenen Fortschritte im Maschinen- und Anlagenbau, in der Energietechnik und im Bauwesen nicht möglich.

Wir wünschen der MPA Stuttgart und allen ihrer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter für die nächsten 125 Jahre alles Gute, vor allem aber den vollen Erfolg, auf den wir alle vertrauen.

Dipl.-Ing. Manfred Erve

Leiter Produkte und Technologie Deutschland

AREVA NP GmbH, Erlangen

## Grußwort der AREVA NP GmbH

Sehr geehrter Herr Prof. Roos, liebe Ehrengäste, meine Damen und Herren, bei der Vorbereitung für mein Grußwort zum heutigen Jubiläum habe ich mich durch Literaturstudium aufgerüstet und über Carl Julius von Bach, den Gründer der MPA Stuttgart nachgeschlagen. Dabei habe ich festgestellt, dass der Geist des Handelns und Wirkens von Bachs sich durchaus bis heute im Tun der MPA widerspiegeln.

Carl von Bach war ein Pionier der Technikwissenschaft und der Ingenieurausbildung. Als Visionär erkannte er die Notwendigkeit, die damals aus Mangel an Laboratorien für maschinenbauliche Untersuchungen und generell an Festigkeitsversuchen an Konstruktionswerkstoffen im Maschinen- und Bauwesen sich ergebende Lücke zwischen Theorie und Praxis zu schließen, und schuf mit der Materialprüfungsanstalt eine richtungsweisende Einrichtung.

Vision war es auch noch Ende der 1970er und in den 80er Jahren für die damalige Leitung der MPA in immer größere Versuchseinrichtungen, z. B. die weltgrößte Schnellzerreißmaschine

oder die statische 10000 to Zugprüfmaschine oder gar in den Kauf des ursprünglich für das Kernkraftwerk Philipsburg 2 gefertigten Reaktordruckbehälters, für Prüfwerte zu investieren. Damit entstand ein heute weltweit einmaliger Park an Versuchseinrichtungen, mit dem das integrale Verhalten ganzer Komponenten eindrucksvoll demonstriert werden kann. Immerhin war es mit dieser Infrastruktur möglich, die großen Forschungsprojekte der 70er und 80er Jahre, die das Ziel hatten, die Integrität der Komponenten unter allen denkbaren Belastungsbedingungen sicherzustellen und den Sicherheitsabstand zum Versagen zu quantifizieren, abzuwickeln und mit den Ergebnissen dieser Forschungsprogramme seinerzeit die Basis zu legen für den hohen Sicherheits- und Verfügbarkeitsstandard unserer kerntechnischen Anlagen in Deutschland.

In seinem Standardwerk „Die Maschinen-Elemente“ lautet von Bachs Programm: „Immer erfolgt die Bestimmung der Abmessungen unmittelbar aus den wirkenden Kräften, sofern nicht



*„Rudolf Diesel schrieb an Carl von Bach, in einer Widmung seines Buches über den Dieselmotor: Ohne die Arbeit von Carl von Bach hätte es dieses Buch nie gegeben.“*

Rücksichten auf Herstellung, Transport, Montage oder Abnutzung maßgebend sind“ (Zitat aus der 1. Auflage).

Dies liest sich fast wie der erste Entwurf der sog. „Basissicherheit“, die der Sicherheitsphilosophie deutscher Kernkraftwerke zu Grunde liegt und die als das Ergebnis vieler auch an der MPA erfolgreich durchgeführter Forschungsvorhaben betrachtet werden kann: Konstruktion hat werkstoffgerecht, herstellungsgerecht, prüfgerecht zu sein und es muss der gesamte Betrieb der Komponente Berücksichtigung finden. Mit dem Basissicherheitskonzept kann das katastrophale Versagen eines Bauteils auf rein deterministischer Basis ausgeschlossen werden. Leider ist es bis heute nicht gelungen, dieses unser deutsches Konzept zum Bruchausschluss in eine Regel oder Richtlinie zu fassen. Nach wie vor muss auf Veröffentlichungen verwiesen werden und eine der maßgeblichen Quellen ist diesbezüglich die in Nuclear Engineering International im Dezember 1984 erschienene Arbeit „German Basis Safety Concept Rules out of Catastrophic Failure“ des damaligen Leiters der MPA, Herrn Prof. Kussmaul.

In der Verfügung zur Gründung der MPA steht: „Die Materialprüfungsanstalt ist bestimmt, den Interessen der Industrie wie auch denjenigen des Unterrichts zu dienen“. Die erfolgrei-

che, bis heute unverändert als aktuell anzusehende Erfüllung dieser Aufgabenstellung bedeutet die enge Verknüpfung zwischen der akademischen Ausbildung im Rahmen der heutigen Universität Stuttgart und der praxisorientierten Tätigkeit der Materialprüfungsanstalt.

Aber auch die bis dato 34 MPA-Seminare, in denen die Ergebnisse aus Forschungsvorhaben einem breiten Interessentenkreis aus der ganzen Welt bekannt gemacht wurden und die darüber hinaus den Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaft und Praxis förderten, dienten diesem Grundsatz. Vor allem in den ersten Jahren war das MPA-Seminar zu einem großen Teil der Wirtschaft gewidmet, indem Stahlhersteller (wie z. B. Thyssen, Klöckner, JSW), Verarbeiter (wie damals Mannesmann, Gutehoffnungshütte), Hersteller (Siemens KWU) und Betreiber (wie damals RWE, PreußenElektra, Bayernwerk) ihre Erfolge im Vorantreiben der Technologie präsentierten. Die für die deutschen kerntechnischen Anlagen einzigartigen Konzepte Basissicherheit, Bruchausschluss wurden hier geboren, andere heftig und kontrovers diskutiert (Dehnungsabsicherung). Die RSK holte sich hier den Sachverstand für viele grundlegende Diskussionen und Entscheidungen.

War bisher nur von der Integrität der

*„Ohne die Arbeiten hier an der MPA Stuttgart hätte es die Basissicherheit, die wesentliche Säule unserer Sicherheitsphilosophie und Sicherheitskultur in den Kernkraftwerken in Deutschland, nicht gegeben.“*

Komponenten die Rede, so soll hier durchaus auch von der Integrität der Beziehungen der MPA mit unserem Hause (früher Siemens KWU, heute AREVA NP) und die Integrität von Personen die Rede sein. Obwohl wir häufig „auf verschiedenen Seiten des Tisches saßen“, wurde diese Integrität nie beschädigt! Die Zusammenarbeit war – bei Würdigung der oft unterschiedlichen Auffassungen und Orientierungen in der Sache – stets von gegenseitigem Respekt und fachlicher Anerkennung geprägt.

AREVA wünscht der MPA Universität Stuttgart, dass sie den Geist ihres Gründers von Bach auch weiterhin lebt und wir hoffen, dass sie sich mit ihren Fachkenntnissen und experimentellen Möglichkeiten in die sich abzeichnende Renaissance der Kerntechnik einbringt.





Dr.-Ing. Georg N. Stamatelopoulos  
*Leiter Berechnung, Entwicklung und Konstruktion*  
*Alstom Power Systems GmbH, Stuttgart*

## Grußwort der Alstom Power Systems GmbH

*„Die Rolle der MPA ist, dass sie uns bei der Qualifizierung dieser Werkstoffe hilft“.*

Sehr geehrte Damen und Herren, die Materialprüfungsanstalt (MPA) in Stuttgart feiert 125jähriges Jubiläum und einer der zentralen Schwerpunkte der MPA ist der Einsatz der Werkstofftechnik für innovative Funktionswerkstoffe hocheffizienter Kraftwerke. Daher kann die heutige Festveranstaltung zum Anlass genommen werden, auf die Entwicklungen der Kraftwerkstechnik in den letzten Jahrzehnten zurückzublicken.

Im Vergleich zu anderen Industriezweigen erscheint die Entwicklung der konventionellen Kraftwerke weniger spektakulär, jedoch dieser flüchtige Eindruck täuscht: Seit 1935 wurde die Dampfleistung um mehr als das 25fache erhöht und dementsprechend auch die Größe dieser Anlagen. Block K des Kraftwerks Niederaußem zum Beispiel ist mit 167,5 m zur Zeit der weltweit größte Dampferzeuger in Betrieb. Doch nicht nur die Erhöhung der Leistung und der Größe ist bemerkenswert, sondern auch die kontinuierliche Erhöhung des Wirkungsgrades und der Brennstoffausnutzung, die Reduzierung der Emissionen und die stetige Erhöhung von Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit.

Neben verfahrenstechnischen Optimierungsschritten bei der Auslegung von Dampfkraftwerken leistet die Erhöhung der Dampfparameter einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung des Wirkungsgrades. Waren am Anfang des vorigen Jahrhunderts unterkritische Dampfparameter mit Temperaturen um die 500 °C der Auslegungsstandard für Dampfkraftwerke, so hat sich der Stand der Technik aktuell zu überkritischen Dampfparametern von ca. 285 bar und 600/620 °C - entsprechend für den überhitzten und zwischenüberhitzten Dampf - entwickelt.

Bei allen diesen Entwicklungen hat die Werkstofftechnik eine führende Rolle gespielt. Am Beispiel der Leistungserhöhung und der Dampfparametererhöhung soll diese Rolle veranschaulicht werden:

- Bis zu den 50er Jahren dominierte die Mauerwerkbauweise den Dampferzeugerbau. Neben verfahrenstechnischen und betrieblichen Nachteilen, wie die relativ großen Wärmeverluste, die Undichtigkeiten und die Reparaturanfälligkeit limitierte das Mauerwerk die Größe des Dampferzeugers, da tragfähige Kesselhäuser nicht beliebig

groß ausgelegt und konstruiert werden konnten. Der Durchbruch gelang mit der Einführung der vollverschweißten Rohrwand, oder Membranwand, die die oben genannten Nachteile eliminiert oder drastisch reduziert hatte. Voraussetzung für die vollverschweißte Rohrwand war die Entwicklung des elektrischen Wolfram-Inertgas-Schweißverfahrens (WIG-Schweißen), das die Schweißung zwischen Rohren und Flossen einer Membranwand ermöglicht hat.

- Die Erhöhung der Dampfparameter bringt neue Anforderungen an die Werkstoffe mit sich. Es ist selbsterklärend, dass die Festigkeitskennwerte dem Einsatzbereich von hohen Temperaturen und Drücken Rechnung tragen müssen. Zusätzlich kommen weitere Anforderungen für die Beständigkeit gegenüber dampfseitiger Oxidation für die innere Oberfläche von Rohren und Rohrleitungen sowie gegenüber rauchgasseitiger Korrosion für die äußere Oberfläche von Dampferzeugerrohren. Die neuen Werkstoffe, die diese Anforderungen erfüllen, müssen entwickelt, getestet und qualifiziert werden, bevor sie in den Kraftwerksbetrieb eingesetzt werden können.

Alstom Power Systems GmbH arbeitet seit vielen Jahren erfolgreich mit der MPA in Stuttgart zusammen. Ein wesentlicher Teil dieser Zusammenarbeit umfasst den Nachweis der Festigkeitskennwerte neuer Druckteilwerkstoffe, der als Voraus-

setzung für die regelwerkkonforme Qualifizierung dieser Werkstoffe dient. Dies geschieht in F&E-Projekten mit mehreren Partnern, wie z. B. das vom BMWi mitfinanzierte COORETEC-Programm oder die KW21-Initiative der Länder Baden-Württemberg und Bayern, aber auch in F&E-Vorhaben, die alleine durch Alstom finanziert werden. Weitere Bereiche der Zusammenarbeit betreffen qualitätssichernde Maßnahmen bei Werkstoffen und Komponenten für Anlagen, die sich in der Bauphase befinden sowie die Analyse von Schadensmechanismen bei Bauteilen, die während ihres Einsatzes versagt haben.

Zum 125jährigen Jubiläum gratulieren wir der MPA für die geleistete Arbeit und für ihre fachlichen Beiträge auf dem Gebiet der Werkstoffentwicklung für Kraftwerke. Auf dieser Basis sind wir zuversichtlich, dass auch die aktuellen Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet – nämlich die Entwicklung von Dampfkraftwerken mit Netto-Wirkungsgraden von mehr als 50 % - erfolgreich sein werden. Dabei handelt es sich um die Qualifizierung von Nickel-Basis-Werkstoffen sowie die Optimierung deren Herstellungs- und Verarbeitungsverfahren.

Wir wünschen unserem Partner MPA für die Zukunft weiterhin ein hohes Fachwissen-Niveau auf unserem Gebiet, viel Erfolg und freuen uns auf die weitergehende gute Zusammenarbeit!

*„Wir arbeiten mit der MPA seit vielen Jahren sehr erfolgreich zusammen. Wir möchten, dass diese erfolgreiche Zusammenarbeit weiter so besteht.“*



Dr.-Ing. Reinhard Maaß

*Geschäftsführer der FDBR-Forschungsstiftung*

*Geschäftsführendes Mitglied des Vorstandes des FDBR e.V., Düsseldorf*

## **Grußwort des Fachverbands Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau**

*„Die MPA ist neben einigen anderen Instituten führend in der Kraftwerkstoff-forschung.“*

Die deutsche Industrie hat in den letzten Jahren ihre Wettbewerbsfähigkeit beträchtlich gesteigert und ihre führende Marktposition auf den deutschen, europäischen und internationalen Märkten behauptet und ausgebaut. Ein wichtiger Faktor für den Erfolg der deutschen Wirtschaft ist in dem starken Engagement im Bereich der Forschung und Entwicklung zu finden.

Forschung und Entwicklung erzeugen technologisch innovative Produkte die Wettbewerbsvorteile schaffen und damit auf allen Ebenen von Wirtschaft und Gesellschaft als Schlüssel zu Wachstum und Beschäftigung angesehen werden.

Ein rohstoffarmes Land wie die Bundesrepublik Deutschland kann Wettbewerbsvorteile nur erreichen, wenn es permanent Innovationen hervorbringt und vor anderen Wettbewerbern intelligente Lösungen im Markt präsentiert.

Auch die Bundesregierung unterstützt mit Ihrer Politik für nachhaltiges Wirtschaften die Bestrebungen der Industrie, diesen Vorsprung zu wahren. Sie setzt geeignete Rahmenbedingun-

gen, fördert ressourcen- und umweltschonende Werkstoffe, Produkte und Produktionsverfahren – kurz: sie steht für einen starken Forschungsstandort Deutschland.

Mit der MPA Universität Stuttgart, zu deren 125-jährigem Jubiläum am 8. Oktober 2009 zum Festakt geladen wurde, steht hier eine Institution im Mittelpunkt, die den Forschungsauftrag bereits gelebt hat, als die deutsche Industrie aus den Anfängen ins neue Jahrhundert geführt werden musste. Weitsichtig und erfolgreich hat das Institut das Wirken und Werden der deutschen Industrie begleitet, unterstützt und den Weg zum Erfolg geebnet.

Mit wachsenden Innovationen wurde der Bedarf an Vernetzung und Kooperation zu einem entscheidenden fördernden Merkmal in der deutschen Forschungslandschaft. Die Zusammenarbeit von forschenden Stellen mit der Industrie hat die Maßstäbe für Ziele und die Rahmenbedingen für die finanzielle Umsetzung der Projekte gesetzt.

Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit sind die Merk-

male, die die Anlagen unserer Branchen heute auszeichnen. Die Grundlage dafür liefern die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung. Sie verhindert Mehrfachforschung in ein- und derselben Problemstellung und trägt somit zur Wirtschaftlichkeit bei.

Der Fachverband Dampfkessel-, Behälter- und Rohrleitungsbau hat zur Förderung der Gemeinschaftsforschung seiner Mitglieder die FDBR-Forschungsstiftung gegründet. Aufgabe der Stiftung ist es, zur Lösung technischer, branchenspezifischer Probleme die notwendigen finanziellen Forschungsmittel bereitzustellen. Die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung bilden eine fundierte Basis, aus der heraus auch der FDBR Stützwerte gewinnt, die für eine konsequente und kompetente Arbeit erforderlich sind.

In der FDBR-Forschungsstiftung werden die Untersuchungen zu Werkstoffen in Kraftwerken weiter vorangetrieben. Zielsetzung ist hierbei die Absicherung der Werte für die bestehende Technik, die Förderung der Werkstoffentwicklung in Kraftwerken, Sicherung der Energieversorgung auf hohem Wirkungsgrad und aktuell die Entwicklung der 700-Grad-Technologie für die neue Kraftwerksgeneration. Dabei ist es dem FDBR gelungen, neben den Anlagenbauern auch Betreiber in die Vorhaben einzubinden.

Die Intensität der Forschungsaktivitäten spiegelt sich in der Tatsache wie-

der, dass pro Jahr ca. 2 Mio. Euro über die FDBR-Forschungsstiftung an Forschungsaufwand bewegt wurde. Dies ist für unsere Branche der Kraftwerkstechnik ein immens wichtiger Beitrag mit dem wir den uns angeschlossenen Unternehmen den Vorteil verschaffen konnten, sich auch in wirtschaftlich schwierigen Zeiten im Markt zu behaupten.

Vor diesem Hintergrund möchten wir heute der MPA Universität Stuttgart unseren Dank und unsere Anerkennung aussprechen, mit Ihren Leistungen die forschenden Unternehmen in der Kraftwerkstechnik, die FDBR-Forschungsstiftung und die Förderstellen der Bundesregierung zu bestmöglichen Ergebnissen vernetzt und zur Sicherung der Deutschen Industrie im nationalen, europäischen und internationalen Wettbewerb ausgerüstet zu haben.

Wir hoffen, dass wir gemeinsam noch lange Zeit am Erfolg der Unternehmen und der deutschen Technologie mitwirken dürfen.

*„Mein Geburtstagswunsch für die MPA ist, dass diese Einrichtung mit mehr finanziellen Mitteln ausgestattet wird, um diese Vielzahl von Forschungsnotwendigkeiten auch bewerkstelligen zu können.“*



Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. Carl-Dieter Wuppermann  
Geschäftsführendes Vorstandsmitglied Stahlinstitut VDEh, Düsseldorf

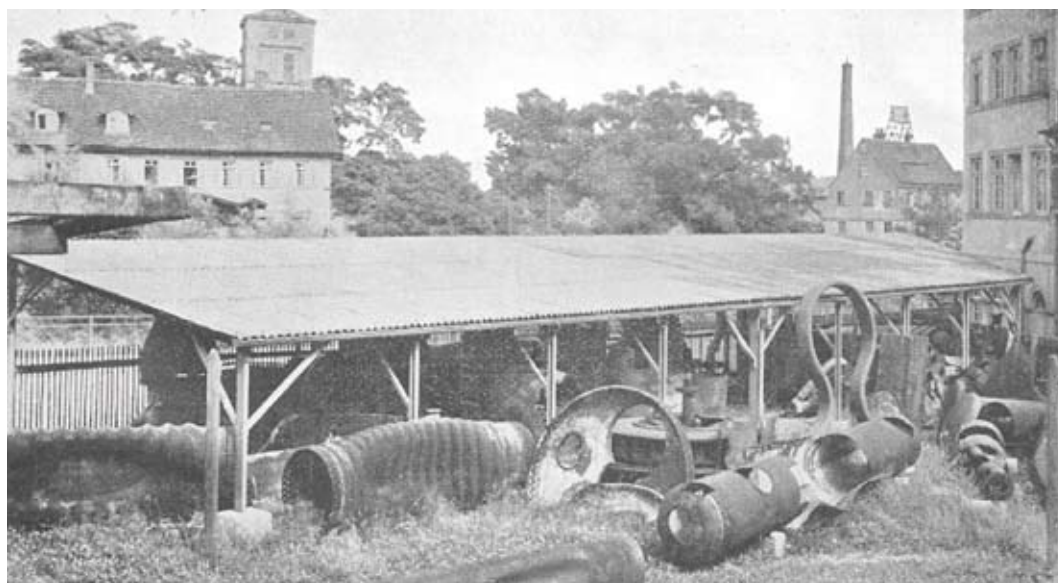
## Grußwort des Stahlinstituts VDEh

*„Ich wünsche der MPA, dass sie erstens weiterhin ihr Equipment auf dem neuesten Stand der Technik hat, dass sie zweitens die gute Kompetenz der Mitarbeiter hat, das heißt eben in der Ausbildung. Und drittens die Konvergenz der Wissenschaften.“*

Sehr geehrter Herr Professor Roos, meine sehr verehrten Damen und Herren,

das Stahlinstitut VDEh reiht sich gerne ein in die Schar der Gratulanten zum 125-jährigen Bestehen der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart. Aus

bei der Neu- bzw. Weiterentwicklung der Prüftechnik und der Qualifizierung von Stahllegierungen für die Kraftwerkstechnik. Auch auf Gebieten außerhalb der Energietechnik besteht seit vielen Jahren eine intensive, partnerschaftliche Zusammenarbeit in verschiedenen Arbeitsgre-



„Schuppen mit lehrreichen Kesselteilen“ – MPA Stuttgart, um 1900

dem Stahl-Zentrum in Düsseldorf überbringen wir Ihnen unsere besten Grüße und Wünsche zu Ihrem Jubiläum. Unsere beiden Gesellschaften verbindet eine langjährige intensive Zusammenarbeit

mien des Stahlinstituts VDEh.

Von Anbeginn waren „Ingenieurlaboratorium und Materialprüfungsanstalt der Königlichen Technischen Hochschule Stuttgart“ die Partner für die kompe-

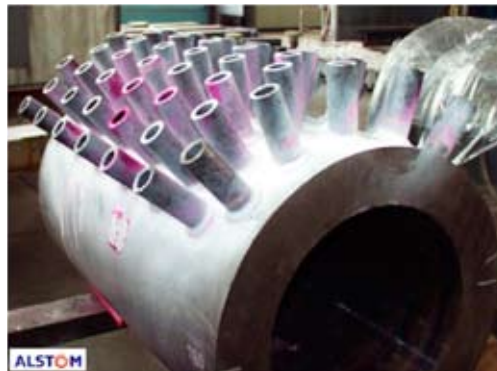


tente Analyse von Schadensfällen an großen Stahlbauteilen. Aus der Schadensanalyse heraus entwickelten sich als wichtigste Arbeitsschwerpunkte das Thermoschockverhalten von Stählen, das Verhalten von ferritischen und austenitischen Kesselbaustählen sowie das Zeitstand- und Ermüdungsverhalten verschiedener Werkstoffe. Später kamen die Berechnung und Simulation von Schädigungs- und Versagensvorgängen hinzu, die gleichermaßen bis heute für die Industrie von hoher Bedeutung sind.

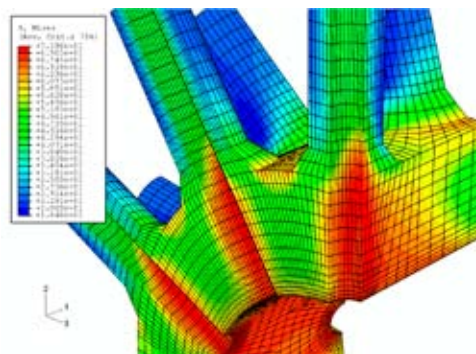
Mit dem Neubau von Kraftwerken in Deutschland entstand in den 1950er Jahren der Bedarf nach höheren Wirkungsgraden und – damit verbunden – nach einer höheren Temperatur- und Druckbelastung der Kraftwerkskomponenten. Um zuverlässige Kennwerte für die sichere Auslegung von Komponenten für die neue Kraftwerksgeneration zu ermitteln, traten alle am Kraftwerksbau beteiligten industriellen Partner im Arbeitskreis „Gemeinschafts-Dauerstandversuche“ im VDEh-„Unterausschuss für mechanische Eigenschaften“ zusammen. Hier wurden im Februar 1950 die Grundlagen für die bis heute andauernde Gemeinschaftsarbeit in den Arbeitsgemeinschaften für warmfeste Stähle und für Hochtemperaturwerkstoffe gelegt. Besondere Erwähnung verdient der damalige Direktor der MPA Stuttgart, Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Karl Wellinger, der viele industrielle Prüfungsaufgaben und Forschungsvorhaben ausführte und so einen wichtigen Beitrag zur

Vertiefung des Wissens über die eingesetzten Stähle leistete. In den Arbeitsgemeinschaften entwickelten sich im Laufe der Jahre weitere Themen, wobei sich die MPA Universität Stuttgart auf die Berechnung und Simulation von Schädigungs- und Versagensvorgängen spezialisierte.

Hier nahm und nimmt die MPA Universität Stuttgart eine Spitzenstellung ein und wurde zum unverzichtbaren Partner



Sammler



Simulation der in einem Ausschnitt des Sammlers wirkenden Spannungen

der beschriebenen Gemeinschaftsforschung. Vorteilhaft für die Industrie ist, dass sich die Arbeitsschwerpunkte der MPA Stuttgart und der anderen Prüfstel-

len optimal ergänzen und damit eine umfassende Betrachtung aller Phänomene erlauben.

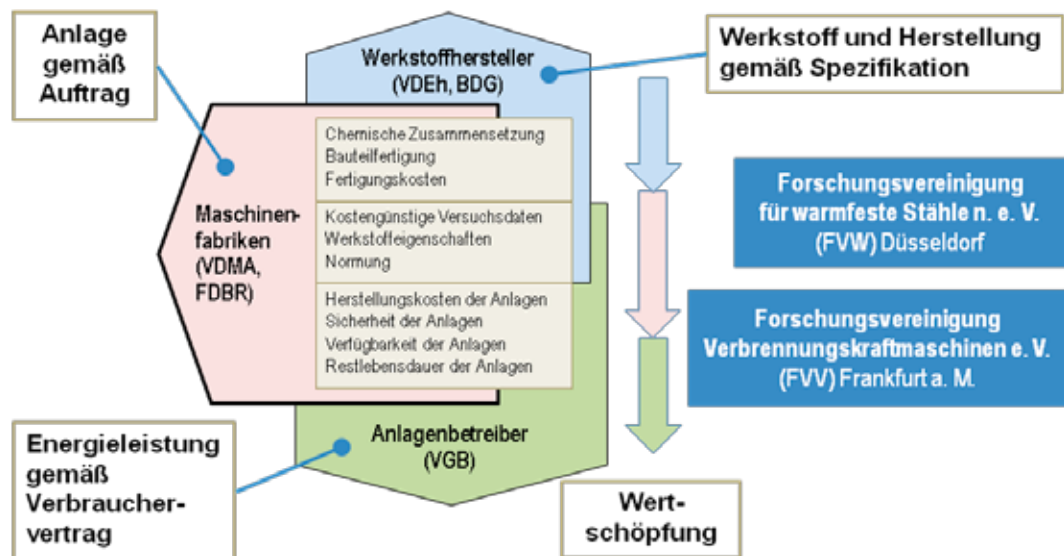
Nicht unerwähnt bleiben darf die ausgezeichnete Expertise der MPA Universität Stuttgart auf dem Gebiet der Komponenten für Kernkraftwerke, die untrennbar mit Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. techn. E.h. Karl Kußmaul verbunden ist.

Zu den Dienstleistungen der MPA Universität Stuttgart für die Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle zählen heute Zeitstandversuche und begleitende Warmzugversuche, Ermüdungsversuche und metallographische Nachuntersuchungen. Die großen, gut ausgestatteten Labors erlauben die Prüfung ganzer Bauteilgruppen unter komplexen, mechanischen und thermischen Beanspruchungen, so dass die reale Belastung von Kraftwerkskomponenten weitgehend na-

turgetreu abgebildet werden kann. Hinzu kommen, teilweise in Zusammenarbeit mit anderen Forschungsinstituten, zahlreiche Forschungsprojekte zur Ermittlung der Werkstoffeigenschaften bei hohen Temperaturen, zur Qualifizierung von Werkstoffen und deren Schweißverbindungen, zur mikrostrukturellen Untersuchung der Schädigungsentwicklung und zur Klärung von Fragen im Zusammenhang mit Lebensdauer und Erschöpfung.

Besonders erwähnenswert ist die enge Zusammenarbeit der MPA Universität Stuttgart mit internationalen Organisationen, zum Beispiel mit der Europäischen Arbeitsgemeinschaft für Warmfeste Stähle ECCC sowie mit dem japanischen Materialforschungsinstitut NIMS, wovon letztlich auch die Arbeitsgemeinschaften profitieren.

Ein weiterer wichtiger Aspekt: Wis-



Industrielle Gemeinschaftsarbeit auf dem Gebiet der Werkstoffe für die Energietechnik. Über die beiden Forschungsvereinigungen vergibt die Arbeitsgemeinschaft für warmfeste Stähle Prüf- und Forschungsaufgaben an die Institute, so auch an die MPA Stuttgart



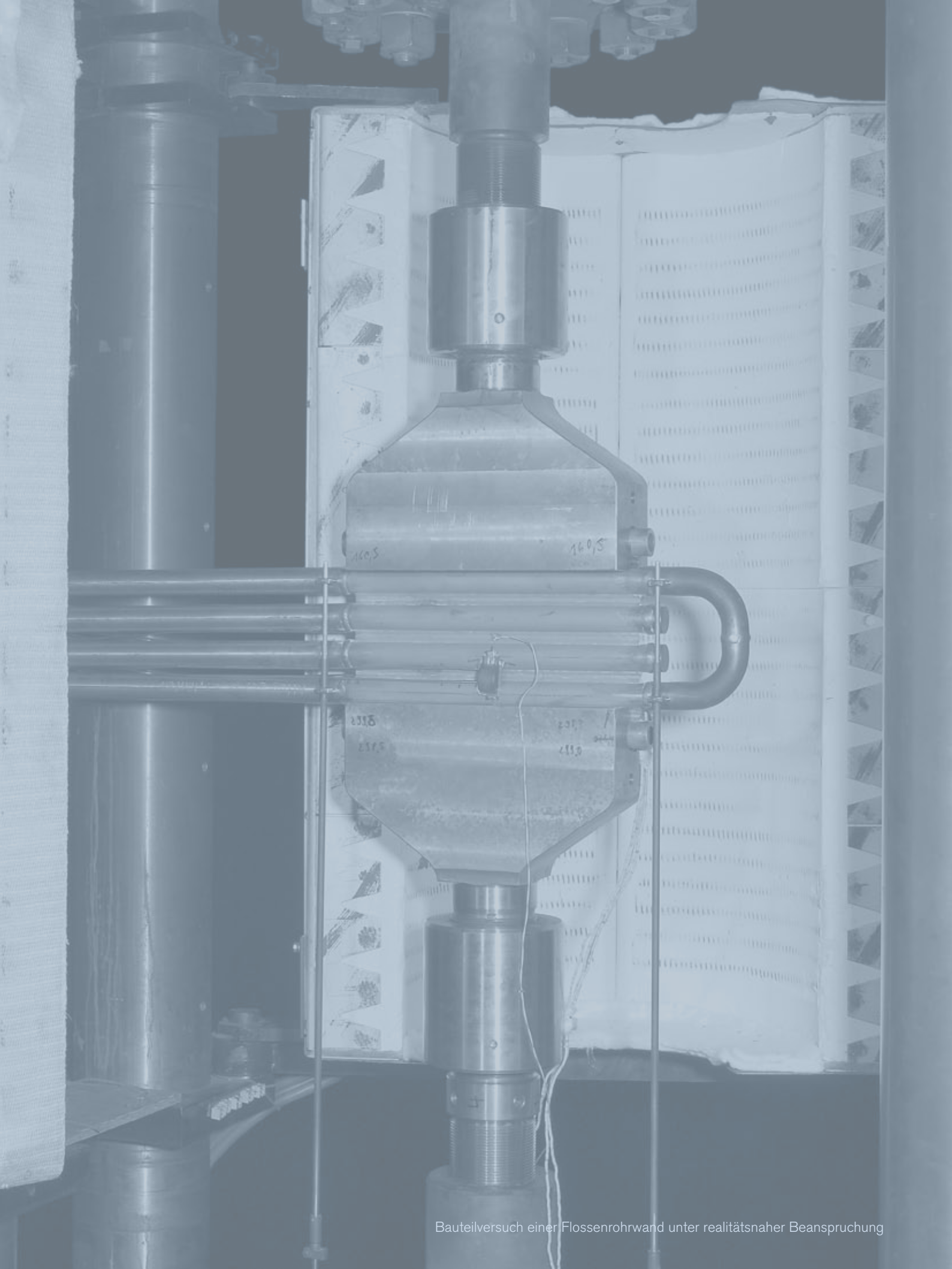
senschaftliches Arbeiten erfordert nicht nur eine gute apparative Ausrüstung, sondern vor allem auch qualifiziert ausgebildete und motivierte Mitarbeiter.

Auch heute gehen die Entwicklungen zu höheren Wirkungsgraden von thermischen Kraftwerken jeglicher Art, insbesondere hinsichtlich der Forderung nach verminderten Emissionen. Mit den hierfür erforderlichen höheren Betriebstemperaturen und -drücken steigen auch die Anforderungen an die eingesetzten Werkstoffe. Die MPA Universität Stuttgart ist im Verbund mit den anderen Prüfstellen in Deutschland der kompetente Partner zur Lösung dieser Fragestellungen.

In engem Kontakt zur Industrie werden anwendungsbezogene Forschungsvorhaben gemeinschaftlich abgewickelt sowie ein Forschungsnetzwerk aufgebaut. Hierdurch hat sich die MPA Stuttgart weit über Deutschland hinaus einen hervorragenden Ruf erarbeitet.

Das Stahlinstitut VDEh wünscht der MPA Universität Stuttgart viel Erfolg für eine gedeihliche Zukunft, für eine weiterhin erfolgreiche Zusammenarbeit mit unserer Stahlindustrie sowie den Anwendern und weiterhin die hohe Anerkennung, die Sie mit Ihrer herausragenden Arbeit verdienen.

Glückauf!



Bauteilversuch einer Flossenrohrwand unter realitätsnaher Beanspruchung

Dr.-Ing. Johannes Lambertz

*Vorstandsvorsitzender RWE Power AG, Essen*

*Vorsitzender des Wissenschaftlichen Beirats VGB PowerTech*

## **Materialentwicklung und -prüfung – Eine Voraussetzung für hocheffiziente und zuverlässige Kraftwerke von heute und morgen**



### **Vorwort**

Die Zusammenarbeit zwischen der MPA in Stuttgart und dem VGB PowerTech in Essen ist ein Musterbeispiel, wie Forschung und praktische Anwendung sich gegenseitig ergänzen.

Dies kann an einer langen Liste von gemeinsamen Projekten festgemacht werden. Die Projekte decken die gesamte Bandbreite der Werkstoffe, die für die Nutzung des gegebenen Primärenergieportfolios benötigt werden, ab. D. h. Anlagen und deren Komponenten für Wasserkraft, Kernenergie und fossile Energieträger.

Die Forschung der MPA war stets – ausgehend von einer profunden Wissensgrundlage – an der Praxis orientiert. Der VGB wiederum hat gezeigt, wie offen die Industrie bzgl. der Umsetzung von Forschungsprojekten gegenüber zielgerichteter Forschung und ihren Ergebnissen ist.

Ausdruck dieser guten langjährigen Zusammenarbeit ist eine kürzlich geschlossene Kooperationsvereinbarung zwischen der MPA und dem VGB. Ziel dieser Vereinbarung ist es, die Arbeit

noch effizienter zu gestalten und rascher auf Bedürfnisse, wie die technischen Herausforderungen, die täglich auf die Kraftwerksbetreiber zukommen, reagieren zu können.

Innovation ist ein Kernelement des Erfolgs für eine Industrienation wie Deutschland.

### **1 Die Herausforderungen der Energieversorgung**

Die Herausforderungen der Energiebranche sind vielfältig, komplex und gehen weit über die bekannten, klassischen Anforderungen des energiepolitischen Zieldreiecks mit den Aspekten Versorgungssicherheit, Umweltschutz und dem Streben nach volkswirtschaftlich verkraftbaren Strompreisen hinaus.

Im Rahmen des 125-jährigen Bestehens der Materialprüfungsanstalt behandelt mein Vortrag vor allem die Interdependenzen zwischen dem Zieldreieck der Stromerzeugung und der werkstofftechnischen Entwicklung, wobei es gilt, folgende zwei Haupt-Herausforderungen zu meistern:

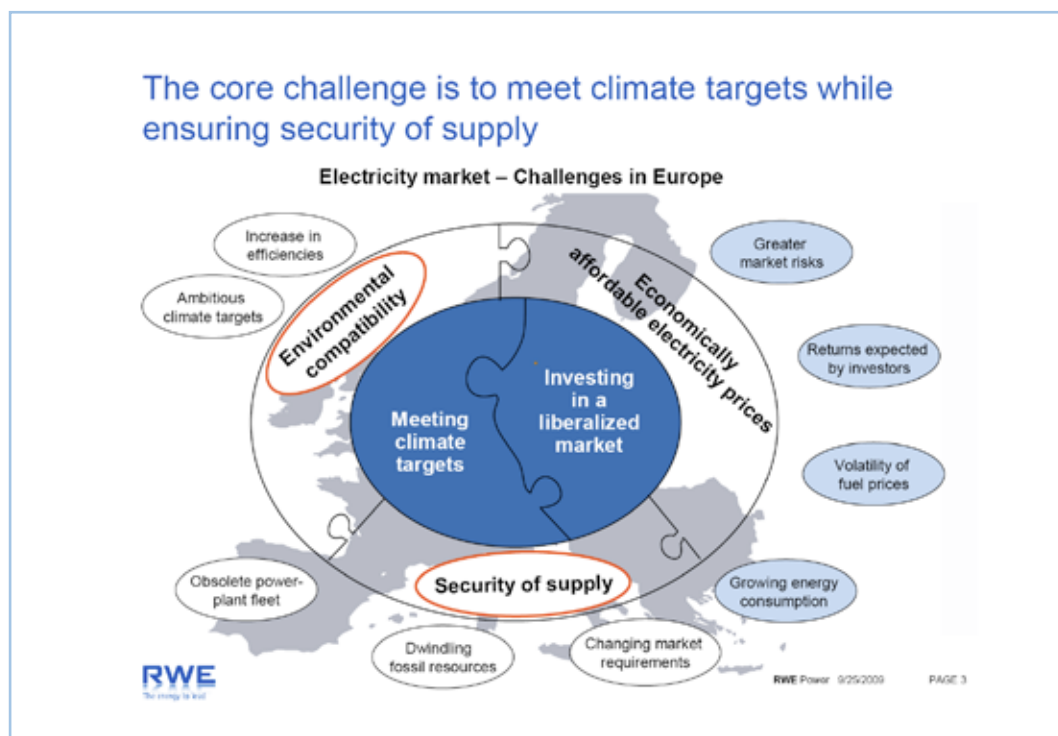
1. Schaffung einer hohen Umweltver-



träglichkeit zukünftiger, fossil gefeuerter Anlagen und Berücksichtigung der Klimaschutzziele.

2. Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit unter sich ändernden Anforderungen und Bedingungen des Stromerzeugungsmarktes.

Ausnutzung des eingesetzten Brennstoffs und damit höchsten Anlagenwirkungsgraden zu erreichen. Bereits in der Vergangenheit wurde dieser Weg konsequent verfolgt und auch zukünftigen Herausforderungen zur Steigerung der Wirkungsgrade mithilfe neuer Techno-



Das Ziel der Erreichung einer hohen Umweltverträglichkeit zukünftiger Generationen fossil gefeuerter Kraftwerke rührt nicht nur aus gesetzlichen Vorgaben und Steuerungsmechanismen, sondern auch aus überzeugter Selbstverpflichtung der Anlagenbetreiber, einen effektiven Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz zu leisten. Dieses selbst gesteckte Ziel einer hohen Umweltverträglichkeit gilt es durch bestmögliche

logien werden sich Anlagenbauer und Betreiber stellen. Wesentliche Voraussetzung auf diesem Realisierungspfad sind dabei in der Werkstofftechnik zu sehen. Neue Werkstoffe, verbesserte Werkstoffeigenschaften und optimierte Fertigungs- und Montagefähigkeit stellen die Grundlage zukünftiger, hoch effizienter Kraftwerke dar.

Anlagen der Zukunft werden nicht nur an der beschriebenen Umweltver-

träglichkeit gemessen werden. Darüber hinaus gilt es auch, Anforderungen des Marktes zu entsprechen, wobei als subsumierende Marktforderung die Versorgungssicherheit den zweiten Zielkorridor aufspannt. Mit sich ändernden Marktbedingungen ist der Begriff der Versorgungssicherheit kontinuierlich neu zu hinterfragen. Anlagen der Zukunft, die diesem Aspekt Rechnung tragen wollen, müssen neben einer verlässlichen Stromproduktion schnell auf Nachfrageschwankungen reagieren können, ohne wesentliche Effizienzeinbußen hinnehmen zu müssen.

## 2 Hohe Umweltverträglichkeit zukünftiger Neuanlagen

Die oben erläuterten Rahmenbedingungen gelten für viele Betreiber als Maßgabe bei der anstehenden Erneuerung und Erweiterung der europäischen Stromerzeugungskapazitäten. In welchem Rahmen neue Kapazitäten in den kommenden Jahren voraussichtlich benötigt werden und wo intensive Anstrengungen hinsichtlich der anvisierten Umweltverträglichkeit betrieben werden müssen, zeigt uns folgendes Szenario.

Die schweizerische Prognos AG hat diverse Studien, die den durchschnittlichen Anstieg des Stromverbrauchs für Europa ermittelt haben, auf die Auswirkungen der gegenwärtigen Finanz- und Wirtschaftskrise überprüft. Trotz eingebrochener Stromnachfrage aufgrund der Wirtschaftskrise und höher

geschraubten Zielen der EU-Effizienzpolitik, ist ein Anstieg der Bruttostromerzeugung von ca. 3.300 TWh im Jahre 2005 auf ca. 3.700 TWh im Jahre 2020 zu erwarten.

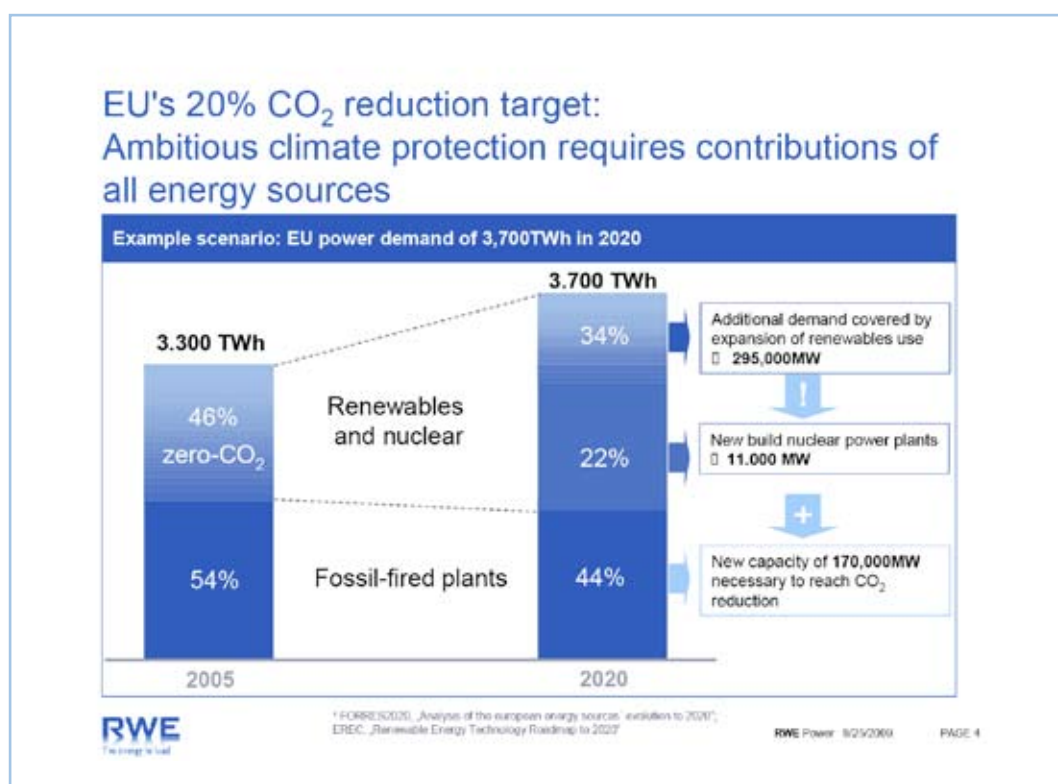
Der enorme Nachholbedarf der neuen EU-Beitrittsländer, eine auf breiter Front intensiv verfolgte Elektrifizierung des Straßenverkehrs (e-mobility) sowie weitere Stromanwendungen zur Energieeinsparung sind die wesentlichen Treiber dieser Entwicklung.

Wie können dieser Bedarf gedeckt und gleichzeitig die ehrgeizigen Klimaschutzziele erreicht werden? Es wäre wünschenswert, wenn es gelänge, die Regenerativen in dem Umfang auszubauen, wie der Stromverbrauch ansteigt. Aktuelle Studien bestätigen die grundsätzliche Machbarkeit eines derartigen Ausbaus, aber selbst in der Branche der Regenerativen Energien wird diese nahezu Verdreifachung des Anteils der Regenerativen als große Herausforderung angesehen. Die heute größte CO<sub>2</sub>-freie Säule der europäischen Stromversorgung stellt die Kernenergie dar. Um diesen Beitrag zu halten, sind wegen bereits beschlossener oder absehbarer Stilllegungen umfangreiche Neubauaktivitäten bis 2020 erforderlich.

Als Resultat dieser Ansätze verbleibt die Erkenntnis, mit all diesen ehrgeizigen Anstrengungen bei den Regenerativen Energien und in der Kernenergie noch keine einzige Tonne CO<sub>2</sub> eingespart zu haben.

Dies bedeutet nichts anderes, als dass die gesamte zu leistende CO<sub>2</sub>-Reduktion im Bereich der fossilen Kraftwerke zu erbringen ist, was nur mit Hilfe eines konsequenten und umfangreichen Kraftwerkerneuerungsprogramms und dem Einsatz neuester effizienter Technologien geleistet werden kann.

verbessert werden. Die in der Vergangenheit kontinuierlich vorgenommenen Prozessverbesserungen bei der Verstromung von Kohle ermöglichte eine Wirkungsgradsteigerung von etwa 20 %-Punkten bis auf heutige 46 %. Dorthin sind Entwicklungen in der Material- und Werkstofftechnik als wesentliche Mei-



Im Weiteren möchten wir uns verstärkt den Kohlekraftwerken widmen und zeigen, dass Klimaschutz und Kohlekraftwerke neuester Generation absolut keine Gegensätze darstellen.

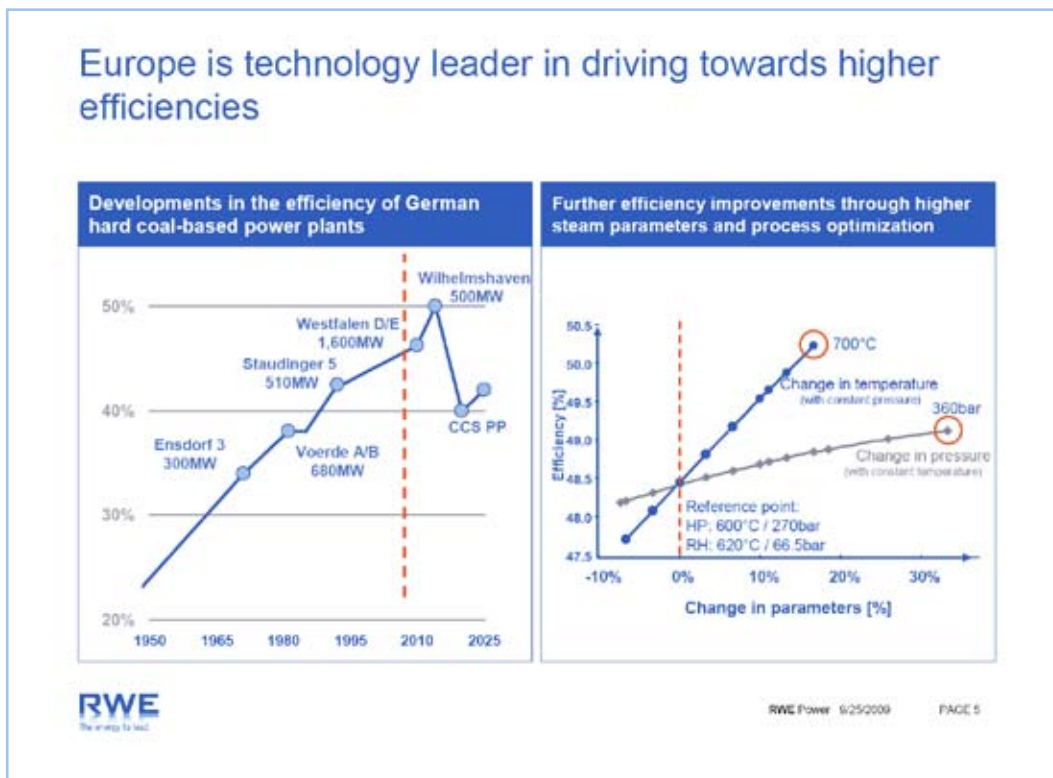
Wie bekannt, kann die Umweltverträglichkeit, d. h. vor allem der spezifische Ausstoß von CO<sub>2</sub> pro erzeugter MWh, mit steigenden Wirkungsgraden

lensteine hervorzuheben. So haben unter anderem die Einführung der warmfesten 12 % Chromstähle in den 1960er Jahren und den hochwarmfesten 9 % Chromstählen in den 1990er Jahren im Wasser-Dampfkreislauf zu Dampfparametererhöhungen und damit Gesamtwirkungsgradverbesserungen in der Vergangenheit geführt.

Der Ansatz für die zukünftige Auslegung neuer Kraftwerke und Wirkungsgradgewinne sieht, neben einer allgemeinen Prozessoptimierung, vor allem weitere Parametererhöhungen vor. Zwar sind Dampftemperatur und -druck nicht losgelöst voneinander zu betrachten, doch liegt in einer Temperaturerhö-

sind dabei mittelfristige Ziele, die es unter wirtschaftlichen Aspekten zu realisieren gilt.

Dieses Ziel vor Augen, könnte Deutschland als Vorreiter dieser neuesten Technologien einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Mit dem Erfahrungsexport der Technolo-



hung ein wesentlich höheres Potential, Wirkungsgradzugewinne zu realisieren. Daher ist ein großes Anliegen der Kraftwerksbetreiber intensive Forschung und Entwicklung in die hochtemperaturfesten Werkstoffe, deren Herstellung, Verarbeitung und Handhabung voran zu treiben. Wirkungsgrade von etwa 50 %, durch Einsatz der 700°C-Technologie

geführt bei Kohleverstromung können heimische Anlagenbauer und -betreiber weltweit eine „saubere“ Kohleverstromung ermöglichen.

### 3 Versorgungssicherheit

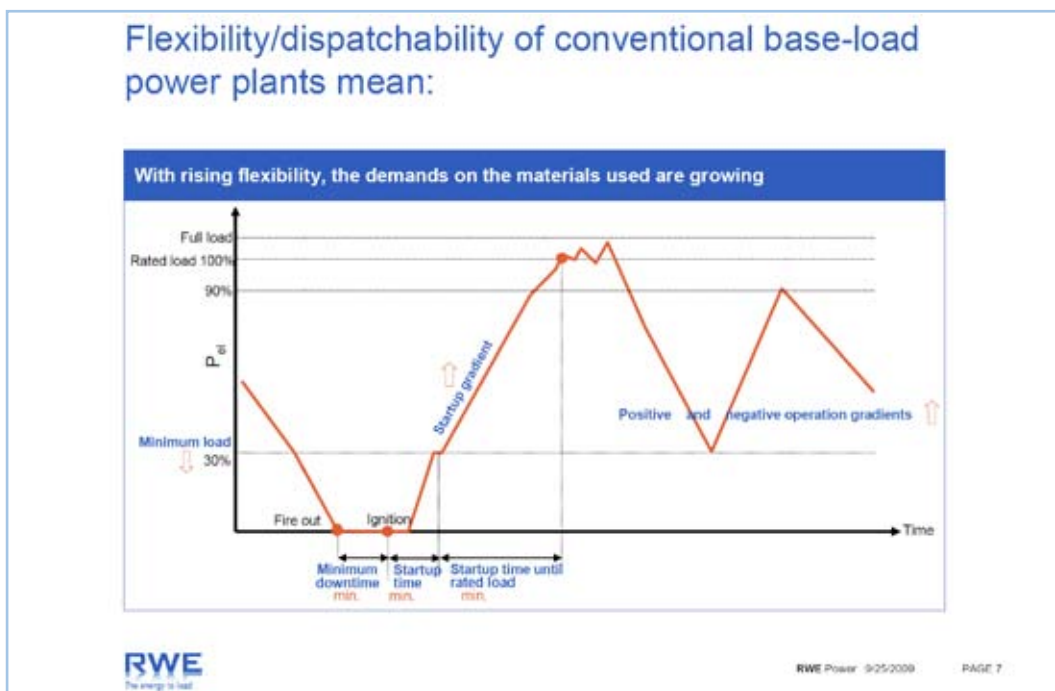
Der zweite wesentliche Aspekt, der bei der Anlagenkonzeption zukünftiger Kraftwerke eine entscheidende Rolle

spielen wird, ist die bereits erwähnte Versorgungssicherheit und Flexibilitätsanforderung. Der konventionelle Kraftwerkspark der Zukunft wird sich sehr auf die Einspeisecharakteristik der stark im Zubau befindlichen Erneuerbaren Energien einstellen müssen. Aufgrund der prioritären Einspeisung der Regenerativen ist die Differenz zwischen Nachfrage und aktueller Einspeisung aus Erneuerbaren Energien, die sogenannte Residualkapazität, stets vom konventionellen Kraftwerkspark zu gewährleisten. Der Effekt der stark unterschiedlichen Nachfrage an Residualkapazität basiert demnach nicht nur auf den Tages- und Jahresschwankungen in der Stromnachfrage, sondern wird auch noch durch die unetstetige Einspeisung, vor allem die der Windenergie, verstärkt. Zwar verbes-

sert sich die Prognosegenauigkeit der Windeinspeisung kontinuierlich, aber dennoch sind weiterhin hohe Gradienten in der Erzeugung möglich. Der schnelle Ausgleich durch die Residualkapazität erfordert demnach ähnlich hohe Gradienten und begründet somit die Anforderung an eine schnelle Regelfähigkeit und Flexibilität. Neben diesen notwendigen Anforderungen, um die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, kann mit einer ausgeprägten Flexibilität des Kraftwerksparks besser auf Marktbesonderheiten, wie negative Strompreisen reagiert werden.

Um die Anforderungen, die aus der geforderten Flexibilität stammen, herzustellen, ist zunächst eine Begriffsdefinition notwendig.

Flexibilität und eine hohe Regelfähig-





keit von kohlegefeuerten Kraftwerken bedeutet:

- hohe Laständerungsgeschwindigkeiten
- möglichst tiefe Mindestlast für einen unendlich langen, stabilen und störungsfreien Dauerbetrieb
- kurze Mindeststillstandszeiten
- kurze Anfahrtszeiten bis Mindest- und Nennlast

Die Merkmale eines flexiblen Kraftwerkes rufen hohe Temperatur- und Druckgradienten und signifikantes Dehnungswechselverhalten hervor. Der Einfluss auf Bauteillebensdauer, Invest- und Instandhaltungskosten stellen daraus resultierende Herausforderungen dar.

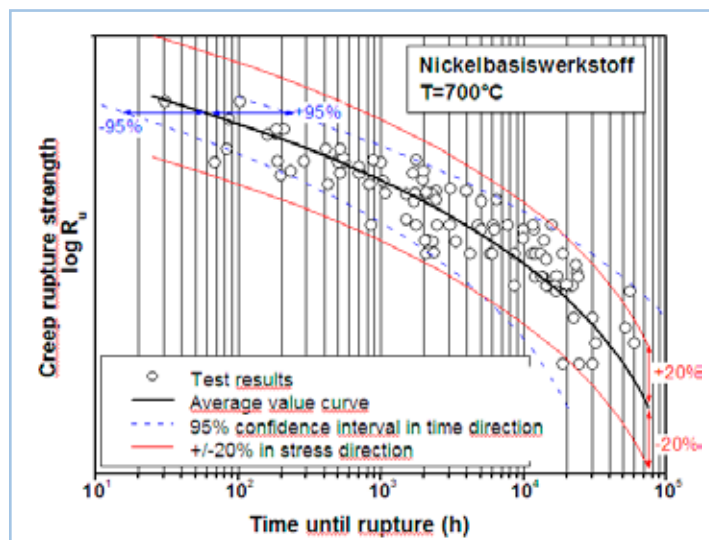
#### 4 Anforderungen an Kraftwerkskomponenten und Werkstofftechnik

Die aus den angestrebten, hohen Dampfparametern und der geforderten flexiblen Einsatzfahrweise resultierenden Anforderungen stellen enorme Herausforderungen an bestimmte Kraftwerkskomponenten. Im Fokus steht dabei der Dampfzeuger, speziell die Frischdampfleitung sowie die hier eingesetzten Formstücke und Armaturen. Eine detaillierte Betrachtung der „kritischen“ Bauteile

hinsichtlich der Werkstoffauswahl, der jeweiligen Auslegungsmethoden, des Werkstoffverhaltens unter statischer und zyklischer Belastung, des Einflusses von Bau und Montage auf das Werkstoffverhalten, des Einflusses von Oxidation und Korrosion und der Inspektionsintervalle sind daher dringend notwendig.

#### 4.1 Zeitstandsverhalten

Das Zeitstandsverhalten und der zugehörige Chargeneinfluss eines Werkstoffs sind entscheidend für die Auslegung von Kraftwerkskomponenten. Im Folgenden sind typische Zeitstandergebnisse für einen Nickelwerkstoff bei 700°C beispielhaft dargestellt. Aufgetragen ist dabei in logarithmischer Skala die Nennspannung über der Probenlebensdauer. Die schwarze Kurve beschreibt den Mittelwert. Wohingegen die roten Kurven das +/- 20 % Streuband für die Spannung und die blauen strichlierten



Kurven das +/- 95 % Streuband für die Probenlebensdauer angeben.

Die Einführung eines Streubandes resultiert aus auftretenden Schwankungen zwischen den Fertigungschargen der Hochtemperaturwerkstoffe. Aufgrund der Variationen der chemischen Zusammensetzung und anderen Parametern bei der Herstellung sind Bandbreiten von +/- 20 % der Nennspannung beim Komponentendesign zu berücksichtigen, wobei die Mindestwerte entscheidend sind. Die Zeiträume für die wiederkehrenden Prüfungen im Betrieb sind ebenfalls von diesen Schwankungen betroffen, die zu Lebensdauerunterschieden von bis zu einem Faktor 2 - 3 führen können.

Entscheidend für die Auslegung von Kraftwerkskomponenten ist deshalb die Lage der unteren roten Kurve. Ziel ist es, durch geeignete Maßnahmen diese Kurve im Bereich langer Lebensdauer zu größeren Spannungswerten hin zu verschieben, um durch eine dünnwandige Komponentenauslegung einen direkten Gewinn an Betriebsflexibilität des Kraftwerkes zu erreichen.

Als zukünftige Maßnahmen zur Reduzierung des Chargeneinflusses und genaueren Berechenbarkeit des Zeitstandsverhalten können gesehen werden:

1. Einschränkung der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe im Rahmen der fertigungstechnischen Spielräume.
2. Verifizierung und Standardisierung der Fertigungsabläufe für kritische

Bauteile (Wärmeführung, Gieß- und Schmiedeparameter).

3. Weiter gehende Untersuchung der Einflüsse der Verarbeitung (Trennen, Umformen, Schweißen, Schleifen, ...).
4. Für die Simulation von Fertigung, Verarbeitung und Betriebsverhalten könnten Modelle und Simulationsmethoden entwickelt und für Optimierungen eingesetzt werden (Gießen, Schmieden, Schweißen, Betrieb einschließlich An- und Abfahrprozessen).
5. Mit der Untersuchung von chargenspezifischem Werkstoffverhalten an Proben und am Bauteil (z. B. mit in-situ Messungen) sollten diese Modelle und Methoden verifiziert werden (online Bestimmung des Lebensdauer- verbrauchs kritischer Bauteile).

## 4.2 Kriech-Ermüdungs- Wechselwirkung

Für die beschriebenen Anforderungen an neue Kraftwerke muss das reale Betriebsverhalten von kritischen Komponenten für eine quantitative Lebensdauerbewertung in statische Anteile (Zeitstandanteil) und in zyklische Anteile (Temperatur- und Druckwechsel) aufgeteilt werden. In Fällen, bei denen sowohl der Zeitstandanteil als auch der Ermüdungsanteil relevant sind, muss die Wechselwirkung von Kriechen und Ermüdung betrachtet werden. Es müssen also Regeln entwickelt und angewandt werden, die eine Aussage liefern, um welchen Betrag sich die zyklische

Lebensdauer verkürzt, wenn parallel Kriechvorgänge stattfinden und umgekehrt.

Das DIN EN Regelwerk, wie die DIN EN 12952-4, schlägt eine lineare Addition vor. Das ASME Regelwerk, wie die ASME Section 8 Division 2 mit API FFS1, unterstellt einen stark nichtlinearen Zusammenhang. Die Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung wurde bisher schon intensiv für die Rotorwerkstoffe von Dampfturbinen untersucht. Das Lebensdauerverhalten dieser Rotorwerkstoffe folgt qualitativ dem ASME Regelwerk.

Die Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung muss zukünftig auch für Grund- und Mittellast-Kraftwerke betrachtet werden, weil zahlreichere und vor allem schnellere An- und Abfahrvorgänge erwartet werden. Neben der dominierenden Zeitstandbelastung von kritischen Komponenten muss die überlagerte Ermüdungsbelastung durch behinderte thermische Dehnungen berücksichtigt werden. Wenn die Lebensdauerverbräuche durch Kriechen und Ermüdung eine vergleichbare Größe haben, ist nach heutiger Einschätzung die Anwendung der DIN EN Regelwerke nicht konservativ. Für Turbinenwellenwerkstoffe liegen zahlreiche Laborergebnisse vor, für Rohrleitungen, Formstücke und Schweißnähte jedoch nicht.

Der Lösungsweg in der Zukunft sollte folgende Teilschritte beinhalten:

1. Entwicklung eines Teststandards für

Versuche zur Messung von Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung unter Berücksichtigung betrieblicher Belastungsprofile (Kriechversuche mit überlagerter thermo-mechanischer Ermüdung).

2. Entwicklung und Verifizierung von Modellen und Simulationsmethoden für die Kriech-Ermüdungs-Wechselwirkung.
3. Einfließen neuer und zusätzlicher Erkenntnisse in DIN EN Regelwerke.

### 4.3 Einfluss von Bau und Montage

Die Werkstoffe, die heute für kritische Kraftwerksbauteile eingesetzt werden, verhalten sich eher wie „Rennpferde“ und nicht wie „Lastenesel“, das heißt sie reagieren bei der Fertigung und der Montage empfindlich auf Fehlbehandlung. Die Auswirkungen solcher Fehlbehandlungen auf das Betriebsverhalten der Bauteile ist oft nicht hinreichend geklärt. Für einzelne Fertigungs- und Montageschritte liegen zwar Prozessfenster vor, ihre individuelle Auswirkung auf die finalen Bauteileigenschaften sind jedoch weitest gehend unklar. Viele dieser Eigenschaften lassen sich nur mit (zerstörender) Werkstoffprüfung untersuchen, ein Umstand, der entsprechende Bauteilkosten erzeugt.

Diese Situation äußert sich in folgenden Befunden:

- Das Langzeitverhalten von ungünstigen Werkstoffbereichen, wie z. B. in Schweißverbindungen, ist nicht aus-

reichend bekannt.

- Die finalen Bauteileigenschaften erfüllen die Vorgaben in manchen Fällen nicht, obwohl die Prozessfenster für einzelne Fertigungs- und Montageschritte eingehalten wurden.
- Der Nachweis von Bauteileigenschaften mit zerstörungsfreien Prüfverfahren ist bisher wenig entwickelt

Folgende Lösungen bieten sich an:

1. Abbildung relevanter Prozessfenster der Fertigungsverfahren mit Simulationmethoden (Simulation von Gieß-, Schmiede- und Wärmebehandlungsprozessen).
2. Entwicklung verifizierter Fertigungsabläufe für kritische Bauteile, Untersuchung des Verarbeitungseinschluss und Definition weitergehender Standards.
3. Weiterentwicklung zerstörungsfreier Prüfmethode (ZfP) mit Sicht auf Nachweis von Bauteileigenschaften.

#### **4.4 Oxidations- und Korrosionsverhalten**

Das Oxidations- und Korrosionsverhalten spielt heute vor allem im Dampferzeuger eine große Rolle. Das Verhalten der eingesetzten ferritisch-martensitischen und austenitischen Werkstoffe unter Oxidations- und Korrosionsbedingungen wird im Labor zumeist an mechanisch unbelasteten Oberflächen untersucht. Es ist ungeklärt, ob diese Einschränkung auch für zunehmend zyklisch betriebene Kraftwerke sinnvoll ist.

Die Situation äußert sich in folgenden Befunden:

- Die Laborergebnisse sind auch heute schon nur bedingt auf Bauteilsituationen übertragbar, vermutlich, weil meist ohne mechanische Belastung gemessen wird.
- Der Einfluss von mechanischer Belastung auf das Korrosions- und Oxidationsverhalten wird in den Regelwerken bisher nicht angemessen berücksichtigt.

Der Lösungsweg sollte folgende Teilschritte beinhalten:

1. Entwicklung von geeigneter Prüftechnik.
2. Entwicklung von Modellen und Simulationmethoden.
3. Weiterentwicklung von Regelwerken
4. Weiterentwicklung von in-situ Messtechnik für Kraftwerke.

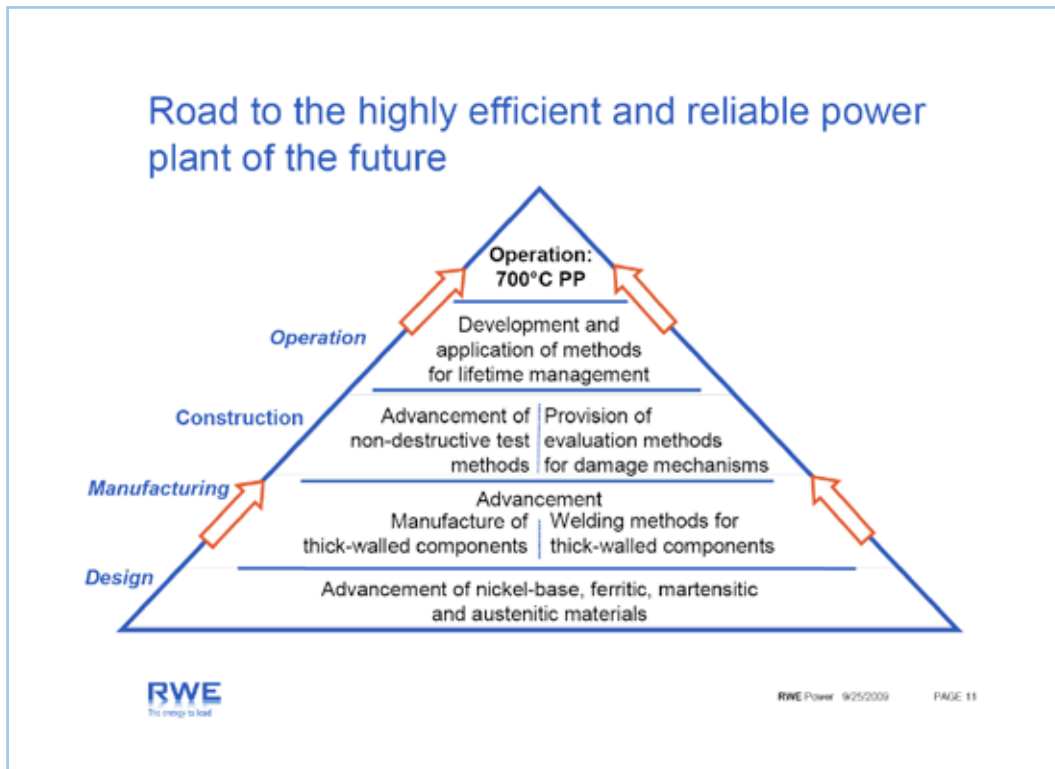
#### **5. Fazit: Der Weg zum Kraftwerk der Zukunft**

Der Fokus kommender Kraftwerksgenerationen liegt auf einer flexiblen Anlagenauslegung mit höchsten Wirkungsgraden. Auf dem Weg zu diesen hochmodernen, effizienten Kraftwerken von morgen sind die erläuterten Werkstoffeigenschaften und daraus entstehende Herausforderungen grundlegende Voraussetzungen.

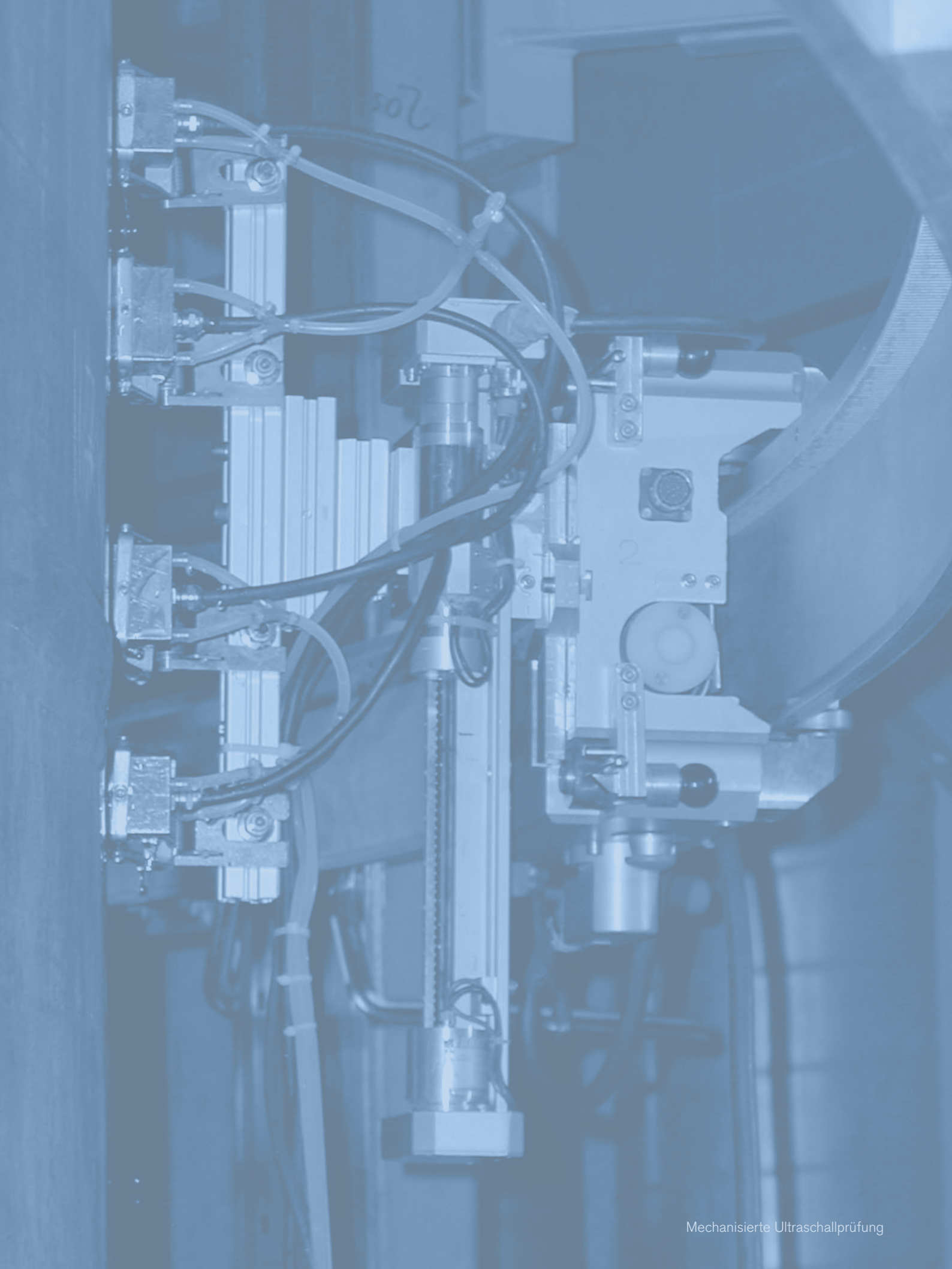
Sowohl in der Anlagenauslegung, in der Fertigung, dem Bau als auch dem Betrieb sind Anlagenbauer und Betreiber auf Forschung und Weiterentwick-

lung der Werkstofftechnik angewiesen. Denn nur mit neusten Werkstoffen und verbesserten Charakteristika, optimierter Fertigung und Verarbeitung und intensiven Werkstoff- und Bauteilsimu-

lationen sind die Schlüsselaspekte für die flexiblen, effektiven und langlebigen Kraftwerken von morgen zu realisieren.







Dr. Robert Tregoning<sup>1</sup>

*Technical Advisor for Materials, US Nuclear Regulatory Commission, Rockville/ USA*

Mrs Carol Moyer<sup>2</sup>

*Program Manager – Codes & Standards, US Nuclear Regulatory Commission, Rockville/ USA*

## **Collaboration between the U.S. Nuclear Regulatory Commission and the Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart: Past successes and future opportunities**



### **Abstract**

The Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) has been prominent in materials testing and materials research in nearly all fields of mechanical engineering and civil engineering since the end of the 19th century. During this time, a principal MPA vision has been to develop knowledge and then to transfer this knowledge into technological innovations that have practical benefits. Of particular note has been MPA's role in fostering the safe application of nuclear technologies. The marking of the 125<sup>th</sup> anniversary of the MPA is a testimony to the successful implementation of its vision.

The U.S. Nuclear Regulatory Commission's (NRC's) mission to license and regulate the civilian use of byproduct, source, and special nuclear materials in the United States to ensure adequate protection of public health and safety is consistent with MPA's vision and, in particular, its work related to nuclear safety. Hence, MPA and NRC have long shared similar technological interests and issues that have led naturally to fruitful interac-

tions. This paper highlights several past successful collaborations between the MPA and NRC and describes the eventual research findings and/or regulatory products that derived from these collaborations. Subsequently, several ongoing NRC research activities are described that may provide opportunities for continued, mutually beneficial collaboration between the MPA and NRC.

### **Introduction**

The Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) has been prominent in materials testing and materials research in nearly all fields of mechanical engineering and civil engineering since the end of the 19th century. During this time, a principal MPA vision has been to develop knowledge and then to transfer this knowledge into technological innovations that have practical benefits. Of particular note has been MPA's role in fostering the safe application of nuclear technologies. The marking of the 125<sup>th</sup> anniversary of the MPA is a testimony to the successful implementation of its vision.

<sup>1</sup> Author

<sup>2</sup> Co-Author/Lecturer

The list of MPA technical contributions is too impressive to adequately summarize in this paper. However, one lasting and living legacy has been MPA's role in founding and maintaining the *International Journal of Nuclear Engineering and Design* (NED). NED is a highly respected technical journal that covers a broad range of nuclear technologies. Many important research activities related to nuclear safety have been published in NED throughout the years. Another important legacy is the MPA seminar series, with the 35<sup>th</sup> seminar being held this year. This seminar is a valuable international forum for discussing research findings and technical issues. The MPA's reputation and involvement have been vital to the seminar's success since its inception and will undoubtedly continue to ensure its future importance.

In comparison to MPA, NRC is a relatively new organization. However, NRC's mission to license and regulate the U.S. civilian use of byproduct, source, and special nuclear materials is consistent with MPA's vision and its role in developing technologies to foster nuclear safety. The U.S. Congress created NRC as part of the 1974 Energy Reorganization Act (ERA) to be the independent regulatory body for the U.S. commercial nuclear enterprise. Prior to NRC's founding, the Atomic Energy Commission carried out nuclear safety research in the United States. The ERA recognized the importance of NRC's independent research ca-

pability, and it specified the establishment of an NRC Office of Nuclear Regulatory Research (RES). Since that time, RES has managed research related to materials, component integrity assessment, and inspection technology. Currently, the RES Division of Engineering conducts the research activities in these areas.

NRC's approach has largely focused on performing confirmatory research to validate the technical bases of the safety regulations that govern operating facilities. NRC research, along with programs carried out within the nuclear industry and international community, has led to an evolution of materials and structures technologies that have either validated the acceptability of methods and data within the U.S. regulatory processes or provided the basis for modifying these processes. A principal research focus is to understand the margins embedded within the regulatory procedures using a balance of experimental and analytical studies.

During the 20<sup>th</sup> MPA seminar, Serpan et al., [1] provided a review of NRC research results up to 1994. That review depicted how research findings were developed into regulatory tools for safety evaluations and into national consensus codes and standards. The review summarized activities in several prominent fields including reactor pressure vessel (RPV) integrity, piping integrity, steam generator integrity, subcritical crack growth (e.g., by fatigue or stress corrosion cracking),

fracture mechanics, and nondestructive inspection.

As part of the 30th MPA seminar, Mayfield, et al., [2] provided a subsequent review of research activities conducted between 1994 and 2004 and described how these activities contributed to the development of regulatory tools. The research program in that decade reflected the fact that regulatory tools increasingly emphasize the analysis and management of risk by probabilistic methods. Their review updated the research activities previously addressed in [1], but also summarized research related to primary pressure boundary integrity and the proactive management of materials degradation.

This paper does not provide a similar comprehensive update on the nexus between NRC research activities and regulatory tools. Rather, it focuses on the similar technological interests long shared between MPA and NRC that have led naturally to fruitful interactions. Therefore, this paper highlights some past successful collaborations between MPA and NRC and describes the eventual research findings and/or regulatory products that derived from these collaborations. Subsequently, several ongoing NRC research activities are described that may provide opportunities for the continued, mutually beneficial collaboration between NRC and MPA.

### **Prior collaboration between MPA and NRC: A few highlights**

NRC has a long history of collaborating and sharing information with MPA, especially on materials and structural performance and the implications for nuclear safety. Most materials research topics of interest to NRC require specialized experimental or analytical facilities and in-depth skills and knowledge within the topic areas. Because NRC does not possess such facilities, contractors typically conduct NRC's materials research under the direct supervision of NRC staff. NRC has employed a wide variety of commercial, private, and university contractors, but the majority of this research has been performed at Battelle Memorial Institute (Battelle) and U.S. Department of Energy (DOE) national laboratories, including Oak Ridge National Laboratory (ORNL), Argonne National Laboratory (ANL), and Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).

Battelle, the DOE national laboratories, and MPA share a similar structure and role in evaluating research issues related to material performance and nuclear safety. Therefore, many of the most fruitful collaborations have occurred directly between MPA and the various laboratories. Collaboration started in the 1970s between ORNL and MPA on various metallurgical issues such as underclad cracking of RPVs. Collaboration on materials issues increased during the 1980s and 1990s.

### **Reactor Pressure Vessel Integrity**

In the early 1980s, various MPA staff members were temporarily assigned at ORNL to support the thermal-shock experiments. These experiments evaluated the feasibility of crack initiation, subsequent crack arrest, and then reinitiation of the crack due to the thermal-shock induced by cooling water injected to mitigate a large break (LB) loss-of-coolant accident (LOCA). MPA staff assisted in both the testing and the analysis of the test results. These tests demonstrated that thermal-loading alone was not sufficient to cause RPV through-wall crack propagation, and they helped establish the conditions for more representative pressurized thermal-shock (PTS) tests that accounted for the vessel resurization that can occur coincident with a thermal shock. The PTS experiments were used as part of the technical basis supporting the development of the PTS rule, 10 CFR 50.61 [3].

During the 1980s and 1990s, MPA and ORNL were both engaged in other complementary and important large-scale fracture validation experiments. Those activities involved direct staff collaborations and broad international exposure, which MPA and ORNL collectively organized through forums such as International Atomic Energy Agency (IAEA) and Committee on Safety of Nuclear Installations (CSNI) technical specialists' meetings. For example, the MPA and ORNL experiments that used very large-

scale cylinder and plate specimens were highlighted in an IAEA meeting held at MPA in May 1988 [4]. MPA and ORNL were concurrently exploring a variety of questions relative to fracture behavior of RPV steels, including the crack arrest toughness values that RPV steels can exhibit as the temperature approaches or exceeds the value where onset of Charpy upper-shelf behavior occurs. Other questions under study related to the effects of stress state, specimen size, loading rates, and load history (e.g., warm prestressing). A sequel IAEA/CSNI meeting was then held at ORNL in October 1992 [5]. Additional large-scale test data and associated analytical results were discussed in detail at the ORNL meeting. MPA and ORNL collaborated in this manner not only to exchange information directly but to also engage the international community of experts to collectively assess state-of-the-art technology.

In addition, significant collaboration occurred during the 1980s and 1990s on investigating the effects of irradiation on material fracture performance. This collaboration included a 1-year assignment of an MPA staff member to ORNL. Two ORNL employees during this time period also had multiyear assignments to MPA to study irradiation effects. More recently, in 1998–2004, ORNL collaborated with MPA on irradiating and characterizing a specially fabricated high-copper, high-nickel weld to investigate a bounding material composition that may exhibit the

most sensitivity to radiation embrittlement. MPA supplied the material and measured unirradiated properties. ORNL irradiated the material and determined the effect of irradiation on the shape of the fracture toughness master curve.

Knowledge of the effects of irradiation on RPV material performance provided the basis first for Regulatory Guide (RG) 1.99, Revision 2 [6]. This RG contains models for estimating the shift in the fracture toughness transition curve as a function of material and irradiation damage. This is one of the principal tools used to evaluate RPV susceptibility to PTS using 10 CFR 50.61. Revision 2 of RG 1.99 provided separate models for base and weld materials.

The ORNL and MPA collaboration has contributed, in part, to the increased mechanistic understanding of irradiation embrittlement of RPV steels since Revision 2 of RG 1.99 was drafted. Currently, embrittlement trend curves incorporate physically based and statistically calibrated semi-empirical models that account for the effects of both matrix damage and solute-enriched precipitates. The latest correlations include a greater number of variables and variable interactions than those in RG 1.99, Revision 2, including the effects of copper, nickel, phosphorus, fluence, flux, and irradiation temperature. Although Revision 2 incorporated different chemistry factors for welds and base metals, the more extensive database now available has allowed for development of

separate trend curves for welds based on type of welding flux and metal product forms (plates and forgings).

The increased understanding of irradiation effects will be the technical basis for Revision 3 of RG 1.99, which is currently under preparation. More importantly, the improved knowledge of irradiation effects has been a critical underpinning of the recently approved revision of the PTS rule, 10 CFR 50.61a [7]. The revision was undertaken because the current understanding of PTS events and the risks they pose demonstrate that the requirements in 10 CFR 50.61 is overly conservative. As a result, under 10 CFR 50.61, about 8 to 12 operating pressurized-water reactors (PWRs) would not meet the screening criteria of the rule through 60 years of operation.

The principal features of 10 CFR 50.61a include limitations on applicability to existing reactors, less restrictive screening criteria, evaluation of plant-specific flaw distributions, implementation of the new embrittlement models discussed previously, and RPV surveillance data evaluations. The less-restrictive screening criteria arise from evaluations of PTS risk that demonstrate that PWR facilities can safely operate to higher levels of RPV embrittlement. A principal factor contributing to this demonstration is the use of a more realistic flaw distribution in the evaluations. Therefore, facilities implementing 10 CFR 50.61a are required to verify that this flaw distribution is ap-



plicable through ASME Code-required in-service inspections. The enhanced RPV surveillance data evaluations are more statistically rigorous than in 10 CFR 50.61 and ensure that the embrittlement models remain conservative. In summary, the technical basis supporting 10 CFR 50.61a was developed through broad, multidisciplinary research activities spanning more than 20 years. Contributions from MPA played an important role in developing this technical basis.

### **Environmental Effects on Fatigue**

In the early 1990s, MPA and ANL began extensive knowledge transfer on parallel research efforts to understand the environmental effects on material fatigue performance. This issue is important because the ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section III [8] fatigue design curves were developed in the late 1960s and early 1970s for materials in air environments at ambient temperatures. Design requirements impose a safety margin of 2 on the applied strain and a margin of 20 on cyclic life. However, the Section III fatigue design curves do not address the impact of the reactor coolant system environment, which may accelerate fatigue failure.

Initial research, both within the United States (i.e., at ANL and elsewhere) and internationally, indicated the potentially significant effects of reactor coolant water environments (i.e., high temperature, dissolved oxygen) on the fatigue life of

steels. Significant research was undertaken during the 1990s and 2000s to understand the role of a wide array of variables (e.g., strain amplitude, strain rate, hold time, temperature, alloy chemistry, heat treatment, dissolved oxygen, water purity, water flow rate, surface finish) on the fatigue life of carbon and low-alloy steels, austenitic steels, and nickel-based alloys. This extensive study led to the development of fatigue design curves that explicitly account for these variables through correlation with experimental data. This research is summarized in NUREG/CR-6909, "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials" [9].

This research validated the original Section III air design curves for carbon and low-alloy steels but led to a proposed updated air design curve for stainless steel and nickel-based alloys. More importantly, an environmental correction factor ( $F_{en}$ ) is defined as the ratio of the number of cycles to failure in air ( $N_{air}$ ) to the number of cycles to failure in light-water reactor coolant water ( $N_{water}$ ).  $F_{en}$  is then multiplied by the fatigue usage factor in air for each cyclic loading sequence to account for environmental effects. Interestingly, some recent work conducted, in part, by MPA demonstrated that the design curves summarized in NUREG/CR-6909 provide appropriately conservative estimates of fatigue life (i.e., measured life less than 3 times the predicted life) for niobium-stabilized and titanium-

stabilized austenitic stainless steels in German boiling-water reactor (BWR) environments [10]. RG 1.207, “Guidelines for Evaluating Fatigue Analyses Incorporating the Life Reduction of Metal Components due to Effects of the Light-Water Reactor Environment for New Reactors” [11] endorses the updated fatigue curves and the  $F_{en}$  approach for addressing environmental effects.

Currently in the United States, environmental effects must be considered using RG 1.207 (or an acceptable alternative approach) for new reactor design. The current operating fleet of reactors does not have to consider environment effects out to 40 years of life because sufficient margins on life remain. However, the current fleet does need to address these effects within the license renewal period—between 40 and 60 years of life. Earlier ANL-derived correlations for calculating the environmental life correction factors contained in NUREG/CR-6583 [12] for carbon and low-alloy steels and in NUREG/CR-5704 [13] for austenitic stainless steels are acceptable for use within the license renewal period.

### **Piping Integrity**

Since 1965, NRC has been involved in research on various aspects of pipe fracture in nuclear power plant piping systems. Several notable early programs include the degraded piping program, the NRC pipe crack study group, and the program on short cracks in piping and

piping welds. These programs were followed by more expansive international efforts, including two International Piping Integrity Research Group programs (IPIRG I and II), the Battelle Integrity of Nuclear Piping (BINP) program, a program to evaluate loss-of-coolant accident (LOCA) frequencies, and the Maximizing Enhancements in Risk-Informed Technology (MERIT) program. These programs have developed and validated “state-of-the-art” structural analysis methods and data for nuclear piping systems.

Information developed under the degraded piping program and pipe crack study group formed part of the technical basis for the development of NRC’s Standard Review Plan (SRP) 3.6.3 [14]. SRP 3.6.3 is used to evaluate licensee applications to credit leak-before-break (LBB) for plant-specific piping systems to eliminate the consideration of the design-basis dynamic effects of pipe ruptures required by 10 CFR 50, Appendix A, General Design Criterion (GDC) 4 [15]. An approved LBB analysis permits licensees to remove protective hardware such as pipe whip restraints and jet impingement barriers; redesign pipe connected components, their supports and their internals; and make other related changes in operating plants.

MPA contributed to the development of the LBB basis by sending two visiting scientists to Battelle to work on the Degraded Piping Program in the 1980s. Specifically, MPA helped develop ana-

lytical methods to predict piping failure through J-estimation schemes, analyzed test results, studied crack arrest, and conducted finite element analysis to predict piping performance. This work has formed the basis of the piping failure prediction used in LBB applications and reviews. This work also supported the simplified flaw disposition evaluations for nuclear piping that are contained in ASME Section XI [16].

Subsequent piping research up through the BINP program considered the effects of a myriad of phenomena on piping failure. Some phenomena that have been studied include seismic loading, residual stresses, thermal stresses, short crack effects, crack-tip plasticity effects, stress analysis considerations, constraint effects, dynamic strain aging, crack orientation, piping geometry, complex cracks, leak rate predictions, and crack morphology, to identify but a few. Most of this research has focused on creating conservative, deterministic analysis methods for the evaluation of design basis events. The analysis methods were developed and also validated using numerous large-scale tests of flawed piping system mockups under both static and seismic loading.

Later efforts under the LOCA and MERIT programs started to address probabilistic considerations in piping failure prediction. The objective of this research was to predict the frequency of piping failure as a function of the break

size. This approach utilized best-estimate models of crack initiation, crack propagation, piping failure, and leak rate determination to model the failure process. The crack driving forces also were determined using best-estimate operational and transient loading sequences that incorporate seismic and other rare event transients. Uncertainties in the model estimates and input variables were explicitly considered as part of this approach. This approach also credited inspection and other mitigation actions for repairing or arresting crack development. The research resulted in the development of NRC's latest PFM code for piping integrity, PRO-LOCA.

### **Nondestructive Evaluation**

Technical discussions and information exchange related to nondestructive evaluation of reactor components and piping between NRC and MPA have spanned over thirty years. A cooperative program on acoustic emission techniques in the early 1980's combined the efforts of MPA, NRC, PNNL, and the Fraunhofer Institute for Nondestructive Testing (IzfP). Research was conducted in a test bunker at the Grosskraftwerk Mannheim power plant in Mannheim, West Germany. PNNL staff actually worked on site for approximately 1 year during the program. Results of the results were published in 1985 [17]. In the early 1990's, MPA also collaborated with PNNL as part of the Program for the Inspection of Reactor Steel Components (PISC) III. Specifically,

MPA introduced flaws into a BWR RPV that were used to assess sizing capabilities of ultrasonic testing techniques. PNNL staff performed NDE inspections of the vessel at MPA's laboratories and published the results as a PISC III project report [18].

### **Knowledge Transfer**

NRC, affiliated contractors, and MPA have conducted extensive knowledge transfer through both formal and more informal means. NRC and affiliated contractors have made prominent contributions to NED. For many years, NED published a special edition that contained important papers from NRC's annual Water Reactor Safety Meeting. The meeting summarized research progress from NRC-sponsored, U.S. nuclear industry-sponsored, and international programs addressing water reactor safety issues. MPA personnel typically attended and had a prominent role in these meetings. Many important NRC-sponsored research findings have been published in NED. In addition, for many years, Dr. C. Pugh from ORNL and Dr. S. Doctor from PNNL served as members of the NED editorial board.

NRC and affiliated contractors have also historically maintained an active role in the annual MPA seminars. NRC has sponsored presentations and papers at nearly every seminar and has participated in panel discussion sessions and several affiliated workshops. In addition, NRC has provided invited papers as part

of MPA's 110th [1] and 120th [2] Anniversary Seminars. The aforementioned site details of MPA and NRC-sponsored personnel also have proven to be a valuable tool for indepth technical exchange and professional development of NRC-sponsored personnel.

Also, numerous site visits have occurred among MPA, NRC, and NRC's contractors. These site visits provided overviews of a broad range of ongoing and planned research programs at each organization. In addition, these site visits were used to identify and plan collaboration among the organizations. These continuous interactions mutually benefited NRC, NRC contractors, and MPA over the decade and also advanced the confirmatory knowledge of structural and material behavior in nuclear applications. As a result, cost savings were realized as research findings and lessons learned were transmitted among the organizations.

### **Current research activities at NRC: Possible collaborative opportunities**

MPA and NRC continue to share many common general research interests that enable continued and future interactions. Of particular interest to NRC are current MPA research activities in areas related to materials and component testing, materials development and optimization, and component safety and design. In addition, MPA's technology transfer efforts related to damage prevention, modern compu-

tational methods, adequate materials selection, and adequate materials production methods are of interest. MPA's evaluation of the adequacy of existing codes, regulations, and product certification also parallels similar NRC activities to ensure that nuclear codes, regulations, and quality assurance measures provide adequate protection of public health and safety.

More specifically, MPA has programs on the fatigue strength of ferritic and austenitic nuclear components, characterization and quantification of the performance of cracked dissimilar metal welds (DMW), assessment and lifetime management of industrial piping systems, and nuclear plant life prediction (NULIFE). These programs are very similar to several current NRC research activities that are evaluating plant aging issues. Specifically, NRC has programs evaluating DMW performance, environmental cracking of nuclear components, and the proactive management of materials degradation that are similar to current MPA initiatives. A brief overview of these specific NRC programs and other programs of possible interest follows. The programs described do not represent a comprehensive list of NRC's research related to material performance, structural integrity, and nondestructive evaluation (NDE). Rather, programs are identified in research areas that either have previously resulted in fruitful interactions between the NRC and MPA or

appear to coincide with MPA's current interests.

### **Reactor Pressure Vessel Integrity**

NRC continues to focus on RPV integrity. Many of the governing codes and regulations require deterministic evaluation of design basis events or other stylized transients. These evaluations are often extremely conservative in an attempt to bound existing uncertainties. Because the uncertainties are not explicitly addressed, however, the risk associated with violating the codes and regulations is typically not well understood. Over the past decade, NRC has increasingly used probabilistic assessment of RPV integrity to more accurately quantify risk. The development of 10 CFR 50.61a represents the culmination of research on the probabilistic assessment of risk associated with PTS events. Ongoing research activities are addressing other RPV integrity issues models the PTS program.

#### Probabilistic Reactor Pressure Vessel Assessment

The objectives of these research activities are to develop more realistic flaw evaluation tools and fracture mechanics models to assess the risk of failure for reactor pressure vessels by validating and benchmarking physically based material models and generic analysis methodologies. This will provide more robust prediction and assessment tools than current-day design-specific empirical and experimental

approaches. The approach is to extend the existing technical understanding and analysis methods used in the evaluation of PTS risk to perform probabilistic safety assessments of the mechanical integrity of pressurized components in general and not to limit their applicability to only the beltline region of the RPV (as is currently the case). These evaluations are considering plant life through the license renewal period out to 60 years of operation.

Specifically, this research is aimed at developing technical bases for revising the plant heatup and cooldown limits in Appendix G to 10 CFR Part 50, the surveillance requirements in Appendix H to 10 CFR Part 50, and the embrittlement trend curves in RG 1.99, Revision 3. In addition, this research will be used to develop plant-specific guidance on performing a PTS analysis by revising RG 1.154, "Format and Content of Plant-Specific Pressurized Thermal Shock Safety Analysis Reports for Pressurized-Water Reactors" [19]. Another research objective is to make the probabilistic RPV assessment tools increasingly modular so that aspects can be adapted to evaluate the structural integrity of other nuclear components (e.g., piping, steam generators). Opportunities for more open-source-type programming also will be investigated so that coding can be performed by multiple parties.

NRC and NRC contractors are participating in several international activities supporting this research area. One of these activities is the European Commis-

sion (EC) Program on the Prediction of the Effects of Radiation for Reactor Pressure Vessel and In-core Materials using Multi-scale Modeling - 60 Years Foreseen Plant Lifetime (PERFORM 60). The objective of PERFORM 60 is to develop multiscale tools aimed at predicting the combined effects of irradiation and corrosion on both austenitic stainless steel reactor internal components and RPV bainitic steels. The goal is to assess the structural integrity of these components out to 60 years of life. NRC also participated in the recently concluded International Atomic Energy Agency (IAEA) Coordinated Research Project (CRP)-8 on "Master Curve Approach to Monitor the Fracture Toughness of RPV in NPPs" and CRP-9 on "Review and Benchmark of Calculation Methods for Structural Integrity Assessment of RPVs during PTS." Both of these programs have provided some additional validation of the probabilistic approach and methods used by NRC in the reassessment of PTS.

#### Advanced Fracture Mechanics Material Modeling

This research focuses on the development and validation of predictive material property models to continue to develop, refine, and generalize structural integrity assessment procedures for pressurized components. Accurate structural integrity predictions rely heavily on data and models that describe the mechanical behavior of RPV materials across a spectrum of



loading rate, temperature, and irradiation conditions. Relationships between upper-shelf fracture toughness ( $J_{Ic}$ ), toughness within the ductile-to-brittle transition regime ( $K_{Jc}$ ), temperature, crack arrest ( $K_{Ja}$ ), and Charpy V-notch energy (CVE) have been developed that may be common for a wide variety of ferritic steels. This includes those steels used to construct the primary pressure circuit of current-generation reactors and those expected to be used in next-generation reactors. These relationships are part of the basis of the probabilistic fracture mechanics (PFM) computer codes that NRC used in the PTS evaluation. These same tools are also being used to revise the related RPV regulations discussed previously.

The objective of this effort is to confirm the validity of the probabilistic material models that have been developed based on an amalgam of smaller datasets and to quantify and refine the uncertainty provisions of current models. Because failure is a function of the tails of distributions in probabilistic models, better characterization of model uncertainty is a particularly important step toward improving the accuracy of failure predictions made by these codes.

Several specific improvements in the following regulatory procedures may be possible through this effort. The uncertainties associated with the 10 CFR 50 Appendix G equivalent margins analysis needed when the upper-shelf CVE toughness falls below 50 ft-lb may be

greatly reduced. The requirements associated with 10 CFR 50 Appendix H and RG1.99 may be simplified by eliminating the need to perform independent testing and assessment to measure and demonstrate the adequacy of the transition and upper shelf fracture toughness measures. The uncertainty in the crack arrest calculations performed in the PTS evaluation may be reduced. Finally, the accuracy of characterizing surveillance capsule data may be improved. Beyond these specific regulatory impacts, refinements in the probabilistic material models will provide an important component to the probabilistic assessment tools that can, among other benefits, increase the accuracy with which new reactor designs may be assessed.

### **Piping Integrity**

NRC also has increased its focus on piping integrity over the last decade. The piping research has two principal thrust areas. The first, shorter-term thrust area is evaluating the structural integrity of primary pressure boundary piping in PWR plants. This work stems from the primary system leaks discovered in 2000 in RCS hot legs at the Ringhals and VC Summer plants. These leaks were caused by primary water stress corrosion cracking (PWSCC) of Alloy 82/182 dissimilar metal welds (DMWs) at the RPV nozzle weld. Subsequently, cracks and indications have been found in reactor coolant system (RCS) DMWs at other PWR plants.

As discussed previously, SRP 3.6.3 describes a deterministic LBB assessment procedure that can be used to demonstrate compliance with the 10 CFR 50 Appendix A GDC-4 requirement that RCS piping exhibit an extremely low probability of rupture. SRP 3.6.3 does not allow for assessment of RCS piping with active degradation mechanisms. Therefore, systems with PWSCC no longer satisfy the SRP 3.6.3 requirements. However, the great majority of PWSCC-induced cracks/indications that have been found are axially oriented and/or relatively small, such that the associated safety risk is negligible. In addition, PWSCC mitigation activities have been implemented (e.g., reduction of mechanical stresses via the application of weld overlays or inlays over the PWSCC-susceptible welds, etc.) that are expected to effectively mitigate any residual failure risk.

The second, longer-term thrust area is involved with developing tools to predict piping failure locations and frequency as a function of postulated break size. This information will be used in probabilistic risk assessment (PRA) tools being developed to support more rigorous risk-informed decisionmaking. Work in this area has evolved from MERIT and companion programs aimed at developing a probabilistic piping integrity code. NRC has several current programs addressing both thrust areas that either have or are expected to have significant international collaboration. These programs also

appear to align with MPA's interests and strengths.

#### Extremely Low Probability of Rupture (xLPR)

This program, and planned follow-on activities, will address both thrust areas. In the short-term, this project will focus on evaluating the effects of PWSCC on the LBB tolerance of RCS piping (i.e., first thrust area). The short-term objective is to develop an assessment tool that can be used to directly demonstrate compliance with the probabilistic acceptance criterion of 10 CFR 50 App-A GDC-4. This tool would properly model the effects of PWSCC and the associated mitigation activities. This program is currently being supported in collaboration with the U.S. nuclear industry through the Electric Power Research Institute (EPRI). The feasibility of this project is being evaluated over the next year using a pilot problem to evaluate the failure probability of a DMW with a circumferential crack in a pressurizer surge nozzle. The objective of the pilot study is to identify the feasibility of the models, inputs, computational codes, and computational framework needed to solve the pilot and more general problems. The intended outcome of the pilot study is to identify the requirements, knowledge gaps, approach, and acceptance criteria needed to develop the comprehensive, robust computational code that can comprehensively address PWSCC. This comprehen-

sive code is planned to provide a basis for evaluating and demonstrating compliance with GDC-4 for RCS piping subject to PWSCC within the next 3 years.

After the effects of PWSCC on LBB have been evaluated, follow-on activities will focus on generically evaluating failure frequencies within the RCS (i.e., second thrust area). The long-term objective over the next 5 years is to develop a modular computer code based on verified and validated methodologies for predicting low probability of failure events. This computer code will be capable of considering applicable degradation mechanisms that may contribute to low-probability failure events while properly addressing both model (i.e., epistemic) and random (i.e., aleatory) uncertainties. The code will be modular so that, as additional situations arise, additions or modifications can be easily incorporated without completely restructuring the code.

#### Weld Residual Stress Modeling

The residual stress distributions associated with RCS piping weld joints significantly contribute to the failure likelihood associated with stress corrosion cracking (SCC). The stress distributions affect SCC initiation and growth, crack shape, crack-opening displacement, and the coalescence of individual cracks. These factors affect the likelihood that the SCC will cause RCS leaks before they significantly challenge the weld-joint structural integrity. Some of these factors also af-

fect the probability of detecting SCC using NDE techniques, which also influences the likelihood of failure.

The importance of weld residual stress (WRS) on PWSCC failure likelihood has been extensively evaluated for NDE indications found in a pressurizer surge nozzle DMW at Wolf Creek [20]. Even though the importance of WRS is widely recognized, significant uncertainty exists in the stress distributions determined either analytically or experimentally. Experimental uncertainties are related to measurement and analysis uncertainties while analytical uncertainties typically stem from the lack of detailed weld fabrication knowledge as well as model uncertainties. In addition, few rigorous studies have been carried out to compare measured and predicted residual stress distributions in the more complex structural welds that are representative of RCS piping.

More advanced, benchmarked WRS models are necessary to support the xLPR program to reduce the uncertainty of the failure predictions. The objective of this program is to refine WRS models of DMWs for subsequent use in xLPR. The approach is to conduct a blind validation of analytical WRS predictions using well-controlled mockups that have been characterized extensively using various measurement techniques to determine through-wall axial and hoop WRS distributions. Although more accurate WRS predictions are certainly desired, it is also important to understand and develop the

uncertainty distributions associated with these predictions

This project has four phases with each phase becoming more complex and representative of nuclear components. In the first phase, EPRI is fabricating simple plates and cylinders using a variety of welding parameters. The WRS distributions will be characterized using neutron diffraction (ND) and deep hole drilling (DHD) techniques, and analytical models will be used to predict the results. During phase II, NRC will create a pressurizer mockup. This mockup will be characterized using X-ray diffraction (XRD), incremental hole drilling (ICHHD), DHD, and ND. A second mockup will include a full structural weld overlay (FSWOL). Plans are in progress for analyzing residual stress before and after the FSWOL application. A wide range of U.S. and international organizations will be making blind predictions of WRS. Phases III and IV will evaluate WRS distributions in safety and relief valve line pressurizer components (phase III) and a cold leg (phase IV) from a canceled U.S. plant. After initial characterization of WRS distributions in phase IV, an optimized weld overlay (OWOL) will be added to the cold leg to examine the effect of this process on the WRS distribution.

#### International Program on Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk-Informed Decision Guidance

The PFM code currently being devel-

oped under the xLPR project has evolved, in part, from the PRO-LOCA code created under the LOCA and MERIT programs. MERIT was an international cooperative research program with participants from the United States (NRC and EPRI), Canada, South Korea, Sweden, and the United Kingdom. At the end of the MERIT program, its members identified four principal objectives for a new international cooperative research program. That program, called PARTRIDGE (Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk-Informed Decision Guidance), is scheduled to start in 2010. Participants are currently being solicited.

The possible objectives of PARTRIDGE include:

- Enhancing the quality assurance basis for PRO-LOCA.
- Enhancing the efficiency of the computational processes in PRO-LOCA so that probabilities for very rare events (i.e., frequencies on order  $10^{-9}$  /year) can be assessed in a reasonable computation time.
- Updating the graphical user interface for PRO-LOCA.
- Providing additional user support for PRO-LOCA.

PARTRIDGE is also intended to facilitate international participation in the xLPR modular code development. PARTRIDGE will also support the xLPR project by performing enhanced quality assurance on many deterministic submodules that will ultimately be incorporated into xLPR. In

addition, PARTRIDGE will support the development of plant-specific modules (e.g., a CANDU module) to ensure that these modules are correctly interfaced with the xLPR code.

### **Nondestructive Evaluation**

The inspection of components and structures using NDE techniques plays a critical role in the aging management of nuclear power plant structures and components. The detection and sizing of degradation using NDE determines, in part, if it is necessary to repair or replace the component or if the component can be monitored to assess the future degradation rate. The accuracy and reliability of the NDE techniques are also critical for developing acceptable inspection intervals and requirements. Virtually all materials-degradation-related research sponsored by NRC evaluates the acceptability of NDE to characterize the degradation. This section summarizes several NDE activities sponsored by NRC. The International Program for Inspection of Nickel Alloy Components (PINAC) and possible follow-on international activities are discussed in additional detail.

#### NDE Activities

The focus of NRC-sponsored NDE research is to evaluate the effectiveness of in-service inspection (ISI) techniques for detecting and characterizing degradation mechanisms. The effectiveness of a technique is a function of the accuracy

and reliability of the technique, the inspection acceptance criteria, and planned inspection procedures (i.e., preparation, qualification, inspection intervals, etc.). All of these aspects may be evaluated to provide NRC with information to assess the adequacy of existing or proposed ISI programs.

Specific NDE research is evaluating the effectiveness of characterizing:

- PWSCC in Alloy 600 and in Alloy 82/182 DMW welds and J-groove penetrations.
- Intergranular SCC in austenitic stainless steel welds.
- Fabrication and service-induced defects in cast stainless steel and welded components,
- Defects and joint fidelity in high-density polyethylene piping (HDPE).
- Defects in Alloy 690 and in Alloy 52/152 weld overlays, onlays, and inlays.
- Degradation in RPV internal components.
- PWSCC and defects in RPV penetrations (i.e., CRDM and bottom-mounted instrumentation [BMI] nozzles).

The results of the evaluation are used to assess the adequacy of industry programs in each of these areas. In addition, results are used to assess the adequacy of existing ISI inspection and acceptance criteria in ASME Code Section XI or to develop criteria where none exists.

### International Program for Inspection of Nickel Alloy Components

RCS leaks have been caused by PSWCC in nickel-based materials in the hot leg at VC Summer and in nozzle penetrations (i.e., CRDM or BMI) at Oconee, Davis Besse, South Texas Project, and North Anna 2. The ISI techniques were not effective in detecting PWSCC before the leaks initiated. In 2004, as a response to the ineffectiveness of existing ISI programs, NRC initiated a major international Program for Inspection of Nickel Alloy Components (PINC).

The PINC objectives are to:

- Document the range of locations and crack morphologies associated with PWSCC.
- Correlate observed NDE results with the level of PWSCC degradation.
- Test representative NDE mockups with flaws to simulate the NDE responses from service-induced PWSCC cracks.
- Identify and quantitatively assess NDE methods for accurately detecting, sizing and characterizing PWSCC.

In addition, PINC was initiated to share results among other international research activities that are evaluating the effectiveness of NDE for characterizing PWSCC. Organizations from five countries are participating in PINC including Sweden (SKI); Japan (JNES, JAPEIC, Kansai Electric Corp., Tohoku University, other industry partners); Finland (VTT and Helsinki University); Korea (KINS, KAERI, other industry partners); and the

United States (NRC and EPRI).

The program has two basic tasks—to create an atlas of PWSCC morphology and to assess NDE technologies. The morphology Atlas is an information technology tool with compiled data on existing PWSCC crack morphology information, correlations of PWSCC degradation with NDE characterizations, and metallographic/fractographic information. The NDE assessment task created mockups and used ex-plant components with existing damage to evaluate (through round-robin testing) a variety of crack depths formed by SCC, solidification cracking, or thermal fatigue cracking. The mockup geometries included vessel head penetrations (BMI) and piping DMWs.

The PINC project has recently ended and the final project report is nearly complete. A principal conclusion from the round-robin testing is that combining several NDE techniques is the most effective way to provide adequate flaw detection and sizing in DMWs. Eddy current testing provided adequate flaw detection from the inner diameter. Combined conventional and phased array ultrasound provided adequate depth-sizing. However, several issues still remain. A reliable NDE technique for volumetric inspection of seal welds in CRDM and BMI penetrations was not found. In addition, the Atlas requires additional modifications and review before it is a useful knowledge management tool.

A follow-on international program to



PINC is of interest. Currently, several research topics have been proposed. The proposal for the PINC II program would focus on examining tight cracks in DMW welds caused by PWSCC and hot cracking and would address unresolved issues from the PINC project. This project would expand the BMI examinations and further evaluate the best techniques from the PINC BMI round-robin testing. Also, NDE techniques would be investigated for examining (1) the inside surface of large-diameter DMWs, (2) overlay and inlay samples, and (3) small flaws in smaller bore ( $\approx$ 12-inch) piping. The PINC II project also would review the PWSCC Atlas and extend the compiled information, as necessary, to support improved ISI inspections.

The Program to Assess Reliability of Emerging Nondestructive Techniques (PARENT) has also been proposed as a follow-on to PINC. The PARENT initiative will evaluate new NDE techniques for detecting rapid-growth degradation mechanisms. This task would focus on techniques that (1) are in the early stages of deployment, (2) are deployed in other industries and could be applied to NDE in nuclear reactors, or (3) could be deployed within 5 years. Some examples include advanced phased array ultrasound, filmless radiography, acoustic emission, guided wave ultrasound, remote field eddy current, and Barkhausen noise measurements. This program would also assess NDE techniques for new (i.e., Gen

III) reactors. Ideas for the PINC follow-on project are still being solicited. The final project scope will identify those issues that are of interest to the United States and the broadest section of international participants and may include a blend of the PINC-II and PARENT proposals.

### **Steam Generator Integrity**

The understanding of steam generator (SG) tube degradation phenomena is continually evolving to keep pace with advances in SG designs and materials. To date, degradation mechanisms have been observed in SG tubes including bulk corrosion and wastage, crevice corrosion, pitting, denting, SCC, and intergranular corrosion attack. Flaws have developed on both the primary and the secondary side of SG tubes. If such flaws go undetected or unmitigated, they can lead to tube rupture and possible radiological release to the environment. The main objective of the NRC research program is to ensure that SG tubes continue to be inspected effectively, flaw evaluations continue to be conducted correctly, and repair or plugging criteria are implemented appropriately.

This research program addresses several areas. Research is assessing the reliability of current inspection methods based on the operating experience and evaluating the potential of emerging inspection methods such as fully automated eddy current inspection. Companion research is assessing the reliability of

various eddy current methods (e.g., bobbin coil, rotating pancake, and x-probe) for both original and repaired SG tubes. In addition, substantial research exists to calibrate and experimentally validate models used to predict leak rate and SG tube integrity. One focus is to improve current models by gaining more understanding of crevice conditions and the subsequent effects on crack initiation and growth.

A critical component of the NRC steam generator research is the 4th International Tube Integrity Program (TIP-4). This program builds upon the knowledge gained in previous TIP programs and NRC research programs. The TIP-4 participants include the United States (EPRI and NRC), Korea (KINS/KAERI), Japan (JNES), and Canada (CNSC, AECL, and B&W). The TIP-4 is a venue for participating countries to share both operating experience associated with SG tube performance and the plans and results associated with their SG research programs.

## **Management of Age-Related Degradation**

### Proactive Management of Materials Degradation

Materials degradation phenomena, if not appropriately managed, have the potential to adversely impact the design functionality and safety margins of nuclear power plant systems, structures, and

components. Often, the nuclear industry and NRC have developed aging management programs only after degradation has been observed in the field. However, as plants have been granted license renewals to operate between 40 and 60 years, and as long-term operation (i.e., beyond 60 years) is being considered, widespread recognition exists that proactive management of materials degradation (PMMD) is a more effective strategy that will increase safety, minimize the likelihood of unplanned plant shutdowns, and ultimately decrease operational costs.

NRC is planning research to develop an improved understanding of materials degradation failure mechanisms that will support PMMD. The research objectives are to develop the technical information needed to address future materials degradation and, in collaboration with the nuclear industry, develop preemptive mitigation measures. The planned research program is based on an expert panel study that NRC conducted to identify components most susceptible to degradation [21]. The study developed a Phenomena Identification and Ranking Table (PIRT) based on independent input from a panel of five international experts. The experts' analyses focused on degradation modes associated with the operating environment of specific components, and it identified and evaluated over 2,000 representative components for a typical PWR and a BWR plant. This information is also summarized within the PMMD In-

formation Tool that can be accessed at <http://pmmd.pnl.gov/>.

The PMMD Research Program has five focus areas. The objectives of these focus areas are briefly summarized as follows:

- Materials Aging, Mitigation, and Repair. (a) Develop fundamental understanding of the existing and emerging degradation mechanisms that could impact the long-term safety-related functions of structural materials and (b) Investigate the suitability of associated mitigation and repair options.
- Detection and Monitoring. Investigate the effectiveness of existing and emerging NDE technologies and methodologies to provide early detection and monitoring of degradation before structural integrity is challenged.
- Risk and Prognostics. (a) Develop risk indices associated with each plant component and associated degradation mechanisms and (b) Evaluate effectiveness of emerging prognostic modeling tools.
- Information Tool Knowledge Capture and Utilization. Expand the breadth and depth of the PMMD Information Tool based on results of Tasks 1-3 above and information from related open-literature research.

- Collaborative Research Activities. Develop domestic and international collaborative research activities to better leverage resources, minimize the duplication of efforts, and promote knowledge-sharing.

In recent years, the Materials Aging Institute (MAI) has been established by Électricité de France (EDF), EPRI, and the Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Part of MAI's mission is to understand and anticipate the aging of materials in existing power production facilities. In addition, some networks and technical meetings are focused on various PMMD aspects. However, no mechanism is available to align the diverse PMMD activities, provide coordinated information exchange, and prioritize PMMD research. NRC is working with regulators from other countries and other nongovernmental organizations to implement an International PMMD Forum that would create a network for exchanging information on operating experience, best practices, and emerging knowledge in these areas. Another objective of this forum is to coordinate the separate efforts of existing national programs into a unified approach directed at ensuring safe and economical long-term operation of nuclear power plants.

#### Stress Corrosion Cracking: Alloy 690 Research Program

As previously discussed, PWSCC in Alloy 600 and Alloy 82/182 weld metals

is a significant safety concern because it erodes the LBB margin in affected DMWs. PWSCC also can lead to RCS leaks that can contribute to boric acid corrosion of low alloy steels within the leak path. In addition, PWSCC mitigation requires component repair or replacement and may increase plant downtime and worker radiation exposure.

High chromium materials (e.g., Alloy 690 and Alloy 52/152 welds) are generally less susceptible to PWSCC. The nuclear industry is currently using (or planning to use) these materials as a replacement for Alloy 600 in some components or to repair existing DMWs. Alloy 690 is currently used in existing reactors for SG tubes in replacement SGs and control rod drive mechanism (CRDM) penetrations in RPV replacement heads. New reactors are planning to use the Alloy 690 materials in the initial construction of CRDM penetrations, SG tubes, and DMWs.

Several options exist for using these alloys to repair existing DMWs. One option is a FSWOL, which is applied around the pipe diameter with a thickness that satisfies ASME Code Section III requirements even if the underlying DMW is completely failed [22]. NRC currently allows the use of FSWOL repairs on a case-by-case basis after approving relief requests submitted by individual licenses [e.g., 23]. The nuclear industry also has proposed the use of thinner OWOLs. The thickness of the OWOLs is sized to sat-

isfy Section III requirements assuming that the outer 25 percent of the existing DMW is uncracked [24]. Alternatively, the Alloy 690 materials may be applied over the inner pipe diameter to reestablish a corrosion-resistant barrier. The nuclear industry has proposed two types of inner diameter repairs—onlays and inlays. The difference between these repairs is that a portion of the original DMW is excavated in an inlay repair while onlays are applied directly to the existing DMW [25].

Although the initial performance of Alloy 690 materials has been promising, questions still exist about the performance of these alloys in reactor environments. The nuclear industry and NRC reviewed existing knowledge of PWSCC in Alloys 690/52/152 and jointly identified substantial gaps that should be addressed through future research [26]. High-priority topics include understanding (1) the susceptibility of the heat-affect zone, (2) the effect of weld defects on susceptibility, (3) the effect of weld composition and welding procedure (including dilution effects) on weldability and susceptibility, and (4) the role of welding fabrication and repair on defect population, residual stresses, and susceptibility.

The U.S. nuclear industry (through EPRI) has created an informal network of international vendors, universities, technical support organizations, manufacturers, and material suppliers to coordinate research to address the current knowledge gaps. This collaboration is desirable be-

cause it allows a more comprehensive assessment of the knowledge gaps by evaluating a wider range of materials and principal variables. Collaboration also reduces cost and schedule to individual participants. Current participants include EPRI, Bechtel Bettis, Inc., BPMI, EDF/MAI, KAERI, KAPL, Ringhals, Rolls Royce/SERCO, and UNESA. Additional participation from AREVA/FROG, CEA, CRIEPI, Doosan, INSS, MHI, Tohoku University, VTT, and Westinghouse/Toshiba is also likely. NRC is also coordinating its research activities with the industry consortium to address any remaining knowledge gaps and to ensure that confirmatory research has addressed the most important safety issues. The consortium is divided into working groups on crack initiation, crack growth, and the application of data to assess structural performance. NRC has representatives on each working group.

From NRC's perspective, the research has several broad objectives that, when achieved, should address the existing knowledge gaps. One principal objective is to develop data and understand the causes and mechanisms of PWSCC in Alloy 690 materials to independently estimate crack growth rates (CGRs) in reactor components. This information will be used to predict component life, validate inspection intervals, assess repair/mitigation methods and criteria, evaluate the effectiveness of mitigation procedures that use high Cr materials, and review

new reactor designs and applications. It also will be important to characterize the effect of important variables (i.e., composition, microstructure, environment, and fabrication methods, etc.) on CGRs so that the fabrication process can be controlled and optimized. This information also will be used to assess uncertainties in CGRs due to variability in material properties and differences in test procedures and analysis.

A longer-term objective is to develop best-estimate quantitative models of PWSCC. These models will support the development of the PFM code (i.e., xLPR). Models of crack initiation, crack coalescence, and crack growth are required. In addition, it will be necessary to characterize crack driving forces in reactor components fabricated with Alloy 690 materials. This characterization requires knowledge of the fabrication methods and the associated weld residual stresses that form.

#### Environmental Effects on Fatigue in Structures and Components

NRC is not currently sponsoring research related to environmental fatigue. As discussed earlier in this paper, prior research resulted in the issuance of RG 1.207 [11] and the publication of the technical basis for this RG, NUREG/CR-6909 [9]. The principal remaining issue in the United States is the development of an ASME Code Case on environmental fatigue. Currently, two Code Cases have been drafted—one that provides separate

fatigue curves as a function of the strain rate of the applied loading cycles and one that uses the  $F_{en}$  approach to scale a material's fatigue performance in air. Neither of these drafts has been approved.

However, the effect of the service environment on fatigue performance remains an important topic for regulatory agencies in many countries. The research activities and regulatory positions of countries participating in the Nuclear Energy Agency (NEA) Committee on the Safety of Nuclear Installations (CSNI) was summarized during the 2009 meeting of the Working Group on the Integrity and Aging of Components and Structures (WGIAGE). There is good agreement that the behavior of small specimens can be adequately predicted using the  $F_{en}$  approach in NUREG/CR-6909.

Regulatory organizations from several CSNI countries are interested in predicting structural performance using small-specimen data and addressing the effects of, among other issues, surface finish, component size, mean stress, residual stress, and welds on these predictions. Current code design curves are based on small specimen data measured in air and/or in reactor environments. Design margins on the raw data exist to account for specimen size, surface roughness, and other effects. However, it is not clear if these margins are appropriate. It also is important to ensure that small-specimen and component testing is performed at sufficient strain rates such that

SCC does not occur, which confounds the evaluation.

A CSNI project has been initiated to evaluate the transferability of fatigue data from standard specimens to structures and components. The principal project objective is to confirm Code practices used to analyze fatigue of structures and components in participating countries. The approach is to:

- Collect information on existing fatigue tests performed on structures and components.
- Use small-specimen reference tests to evaluate current and proposed design rules in different countries.

This project will draw from results from previous CSNI projects on thermal fatigue and workshops and from major international programs conducted in the United States, France, Germany, Finland, UK, Japan, Canada, Korea, and other member countries. The countries participating in this project are still being finalized. However, interest has been expressed by regulatory organizations in France, Japan, Germany, Canada, Finland, Korea, and the United States (i.e., NRC).

### **Advanced Reactors Materials**

The next-generation nuclear plant (NGNP) will be a very-high-temperature gas-cooled reactor (VHTR) that will be designed and built by the U.S. Department of Energy (DOE). The VHTR system is designed to be a high-efficiency



system that can produce process heat or hydrogen for a broad spectrum of high-temperature and energy-intensive, non-electric processes such as the petrochemical industry. The system may incorporate electrical generating equipment to meet cogeneration needs. The VHTR is currently planned to be a helium-cooled, graphite-moderated, thermal neutron spectrum reactor with a reactor outlet temperature in the range of 700°C to 950°C. The reactor core technology will either be a prismatic block or pebble bed concept. The VHTR will employ a once-through uranium fuel cycle with the flexibility to adopt uranium/plutonium fuel cycles and offer enhanced waste minimization. The NGNP will produce both electricity and hydrogen using an indirect cycle with an intermediate heat exchanger to transfer the heat to either a hydrogen-production demonstration facility or a gas turbine. The objectives of the NGNP are to (1) demonstrate safe and economical nuclear-assisted production of hydrogen and electricity; (2) demonstrate the basis for commercialization of the nuclear system, the hydrogen production facility, and the power conversion concept; and to (3) establish the basis for NRC licensing of the commercial version of NGNP [27].

The performance of critical materials is a principal safety consideration for the VHTR design and operation. Therefore, NRC has initiated research and development (R&D) to understand the behavior of metallic and graphite components that

provide structural, barrier, or radionuclide retention functions during high-temperature operating and accident conditions [28]. A sound technical basis must be developed for evaluating expected lifetime and failure modes of pressure boundary materials and structural components whose failure would result in a loss of core geometry and/or ingress of air, water, or steam into the reactor coolant pressure boundary.

The integrity of the pressure boundary and structural components is related to nearly all other safety research areas and, in fact, may determine the useful life of the plant. High-temperature materials are required to maintain core geometry, provide adequate core cooling, and provide access for reactivity control and shutdown systems. These materials (i.e., graphite, metallic, and composites) and the VHTR environments are distinctly different from current U.S. commercial light-water reactors and therefore lead to unique performance concerns.

#### High-Temperature Performance of Metallic Materials

Currently, NRC is identifying the confirmatory R&D needed to evaluate the safety and integrity of VHTR high-temperature metallic components. Some areas to address include fabrication and joining methods, baseline mechanical and fracture properties, thermo-physical properties, environmental and irradiation-induced degradation, high-temperature

design criteria, inspection and condition-based monitoring, and the adequacy of existing codes and standards. Many issues associated with these topics are currently being addressed by the DOE R&D plan. The initial NRC effort is focused on identifying (1) those issues that are most important to safety and (2) gaps in the DOE R&D plan. Subsequent NRC confirmatory R&D will be focused within these areas.

NRC has initiated R&D to address subcritical crack growth due to creep and creep-fatigue loading because this phenomenon significantly affects the integrity of the candidate VHTR RPV and intermediate heat exchanger (IHX) materials [29]. The  $C^*$  integral is a fracture mechanics parameter representing the nonlinear-elastic energy release rate per unit of crack extension, for materials undergoing steady-state creep. A review of current creep and creep-fatigue crack growth literature has concluded that the  $C^*$ -based flaw evaluation procedures in current British, French, and Japanese design codes and guidelines could potentially lead to nonconservative lifetime predictions. Because  $C^*$  is based on a steady-state creep model, its applicability to nickel-base alloys that exhibit pseudo-tertiary creep response also requires a critical assessment.

To address these issues, a roadmap for developing creep and creep-fatigue crack growth evaluation methods and analysis tools has been developed. These

methods and tools will support an independent assessment of the structural integrity of NGNP pressure boundary and metallic components under normal operating conditions, design-basis conditions, beyond-design-basis conditions, and conditions that result in significant component degradation and failure. The overall goal of the roadmap is to develop a qualified and validated creep-fatigue flaw growth evaluation procedure. Initial tasks are determining the appropriate crack tip parameters for use in characterizing subcritical crack growth and evaluating behavior at lower temperatures. Subsequent tasks will develop plans for evaluating lower temperature creep crack growth, higher temperature creep crack growth, and implementing a flaw evaluation procedure.

#### Graphite Performance

Although most of the issues associated with metallic VHTR components are associated with high-temperature performance, a much wider range of issues is related to the use of graphite because it is fundamental to the VHTR operation and accident mitigation. Graphite blocks will provide neutron moderation and reflection; structural support; channels for the fuel elements, helium coolant flow, control rod, and shutdown rod insertion; and neutron shielding. Graphite structures and components also will furnish a major heat sink and heat-transfer pathway when a loss of normal core cooling occurs. Dur-

ing reactor operation, many physical and thermal properties of graphite change significantly as a result of the effects of temperature, the environment, and irradiation. Significant internal shrinkage, bowing, and stresses can develop that can cause component cracking, change the shape of the graphite core blocks, and/or alter the core geometry [26].

NRC sponsored a workshop on graphite to summarize general R&D needs, identify gaps in current DOE R&D plans, and recommend confirmatory R&D that NRC should pursue [30]. In FY 2010, NRC plans to initiate a number of programs to address confirmatory R&D needs. The objectives of these programs are briefly summarized as follows:

- Air Oxidation / Accident Modeling. Determine what information exists on the effects of air ingress, moisture ingress, and oxidation of graphite on design-significant properties and assess the potential loss of structural safety margins.
- Evaluate NDE and Inspection Methods. Assess the adequacy of existing quality assurance methods (e.g., X-ray imaging and ultrasonic imaging techniques) for nuclear graphite material and component production. As applicable, determine the uncertainties in probability of detection and sizing of flaws.
- High-Dose/High-Temperature Irradiation Experiments. Participate in national and international programs to irradiate candidate graphite materials

under representative VHTR conditions. Review the results of destructive tests and post irradiation examinations to provide information for development of predictive models.

- Development of Predictive Model of Irradiation Behavior. Assess existing irradiated properties data and develop models to predict irradiation behavior using nonirradiated properties data.
- Stress Analysis and Failure Criteria. Establish requirements for independent analysis tools and procedures to assess graphite performance. Conduct preliminary evaluation of the structural integrity of HTGR graphite core components.

In addition to these research programs, NRC will continue to participate in the development of consensus design codes and standards related to the production, design, operation, and inspection of graphite materials and components.

## Summary

MPA's role in fostering the safe application of nuclear technologies is consistent with NRC's mission to license and regulate the civilian use of nuclear materials to ensure adequate protection of public health and safety. Hence, MPA and NRC have long shared similar technological interests and issues that have led naturally to fruitful interactions. Scientist exchanges between MPA and NRC directly supported research programs associated with RPV and piping integrity.

These research programs have provided the technical foundation for many principal aspects of NRC's regulations associated with RPV and piping safety. Parallel research efforts at NRC and MPA studying the environmental effects of fatigue have been extended to an understanding of the effects of a wide array of environmental, loading, material, and fabrication variables that all can contribute to component fatigue life in light-water reactor primary coolant systems.

In addition, a wide array of forums has been vital in transferring knowledge between the organizations. These interactions have advanced the understanding of structural and material behavior in nuclear applications and resulted in cost savings as research findings and lessons-learned have been shared. The International Journal of Nuclear Engineering and Design, founded by MPA, has been a particularly important forum for publication of NRC-sponsored research results. Participation in both the MPA seminars and NRC's Water Reactor Safety Meetings has resulted in a timely communication of current research plans, findings, and status. Site visits and other more informal information exchanges also have proven to be valuable.

MPA and NRC continue to share many common general research interests that are available for future interactions. Various NRC-sponsored research activities provide opportunities for continued, mutually beneficial collaboration. NRC is

currently using probabilistic methods to investigate the risk associated with challenges to RPV integrity. The probabilistic tools used to evaluate the beltline region for PTS are being generalized to analyze the mechanical integrity of the entire RPV out to 60 years of operation. These tools also are being improved by refining and validating the best-estimate predictive fracture behavior models. This research is aimed at developing technical bases for revising the plant heatup and cooldown limits in Appendix G to 10 CFR Part 50, the surveillance requirements in Appendix H to 10 CFR Part 50, the embrittlement trend curves in RG 1.99, and the plant-specific guidance for performing PTS analysis in RG 1.154.

NRC's piping integrity research is focused on both evaluating the structural integrity of primary pressure boundary piping in PWR plants and developing general tools to predict piping failure locations and frequency as a function of break size. The xLPR project, in the short term, is using probabilistic methods to evaluate the effects of PWSCC on the LBB tolerance of RCS piping. The long-term objective is to develop a modular computer code for predicting low-probability failure events that properly accounts for both epistemic and aleatory uncertainties. Because unfavorable weld residual stress distributions are necessary for SCC growth, a comprehensive U.S. and international program is refining and validating weld residual stress models of dissimilar metal welds for sub-

sequent use in xLPR. This research also is intended to support the xLPR development through the PARTRIDGE program. This program could enhance quality assurance and computational efficiency and expand xLPR's capabilities to reactor platforms in other countries.

The principal objective of the NDE research programs is to evaluate the effectiveness of ISI techniques for detecting and characterizing degradation mechanisms. Specific activities are investigating the characterization of PWSCC in Alloy 600 and 690 materials; intergranular SCC in austenitic stainless steel welds; defects in cast stainless steels, welds, and HDPE; and degradation in RPV internal components. A follow-on program to the international PINC program has also been proposed. The PINC program focused on both characterizing PWSCC and evaluating the effectiveness of NDE techniques for characterizing PWSCC. The follow-on effort may continue and broaden the initial PINC focus on PWSCC or it may concentrate on identifying emerging NDE techniques for detecting rapidly advancing degradation and/or for use in high temperature, advanced reactor environments. Additional program topics and participants are currently being solicited.

Steam generator research is assessing the reliability of current inspection methods based on the operating experience and evaluating the potential of emerging inspection methods (e.g., fully automated eddy current inspection). In addition, re-

search exists to improve current leak rate and SG tube integrity models through calibration and experimental validation. The 4<sup>th</sup> International Tube Integrity Program (TIP-4) is a venue for participating countries to share both operating experience associated with SG tube performance and the plans and results associated with their SG research programs.

NRC is engaged in targeting current and future research to address materials degradation before it becomes evident in the field. The PMMD research is focused on understanding materials aging, mitigation, and repair; detecting and monitoring of degradation; developing risk and prognostic tools; capturing and transferring knowledge; and developing collaborative research activities. A prominent example of PMMD research is NRC's research on Alloy 690 materials for use in mitigating PWSCC in both existing and planned nuclear reactors. This research is being extensively coordinated with the U.S. nuclear industry and international vendors, universities, technical support organizations, manufacturers, and material suppliers. Although not an example of a PMMD-focused program, a project is being sponsored by CSNI to evaluate the transferability of fatigue data from standard specimens to structures and components in reactor system environments. Participants in the CSNI fatigue program currently are being solicited.

Finally, the performance of critical materials is a principal safety consider-

ation for advanced reactor design and operation. Therefore, NRC has initiated research to understand the behavior of metallic and graphite components that provide structural, barrier, or radionuclide retention functions during high-temperature operating and accident conditions. The objective of this research is to develop a sound technical basis for evaluating expected lifetime and failure modes of pressure boundary materials and components whose failure would result in a loss of core geometry and/or ingress of air, water, or steam into the reactor coolant pressure boundary. Graphite, metals, and composite materials are required to operate at high temperatures and to maintain core geometry, provide adequate core cooling, and provide access for reactivity control and shutdown systems. These materials and the advanced reactor primary system environments are distinctly different from current U.S. commercial light-water reactors and therefore lead to unique performance concerns.

## **Acknowledgements**

The authors would like to acknowledge several people who contributed to this report. Dr. Randy Nanstad and Dr. Richard Bass of ORNL and Dr. Claud Pugh of ORSA, Inc., provided vital information on the historical interactions between NRC, ORNL, and MPA. Dr. Pugh also provided timely insights on the previous NRC contributions to the 1994 and 2004 MPA Seminars. Dr. Omesh Chopra of ANL provided important details on the historical interactions between MPA and ANL, and Dr. Bud Brust of EMCC detailed MPA's participation in Battelle's visiting scientist program. Mr. Paul Scott contributed the writeup on the PARTRIDGE program and provided salient details associated with the history of NRC-sponsored work in piping integrity. Dr. Steven Doctor of PNNL summarized the interactions between MPA and PNNL related to NDE. From NRC, Mr. Timothy Lupold, Mr. Charlie Harris, Dr. Iouri Prokofiev, and Dr. Aladar Csontos contributed to the description of current NRC-sponsored research programs. The author is indebted to Dr. Bass, Dr. Pugh, and Dr. Prokofiev for reviewing this manuscript.



**LIST OF ABBREVIATIONS**

AEC	United States Atomic Energy Commission	IAEA	International Atomic Energy Commission
AECL	Atomic Energy of Canada, Limited	ICHD	incremental hole drilling
ANL	Argonne National Laboratory	IHX	intermediate heat exchanger
ASME	American Society of Mechanical Engineers	INSS	Institute of Nuclear Safety System, Incorporated, Japan
B&W	Babcock and Wilcox	IPIRG	International Piping Integrity Research Group
BINP	Battelle Integrity of Nuclear Piping	ISI	in-service inspection
BMI	bottom mounted instrumentation	JAPEIC	Japan Power Engineering and Inspection Corporation
BPMI	Bechtel Plant Machinery, Inc.	JNES	Japanese Nuclear Energy Safety Organization
BWR	boiling-water reactor	KAERI	Korea Atomic Energy Research Institute
CANDU	Canada Deuterium Uranium reactor	KAPL	Knolls Atomic Power Laboratory
CFR	U.S. Code of Federal Regulations	KINS	Korea Institute of Nuclear Safety
CGR	crack growth rate	LB	large break
CNSC	Canadian Nuclear Safety Commission	LBB	leak before break
CRDM	control rod drive mechanism	LOCA	loss of coolant accident
CRIEPI	Central Research Institute of Electric Power Industry, Japan	LWR	light-water reactor
CRP	Coordinated Research Project	MAI	Materials Aging Institute
CSNI	Committee on the Safety of Nuclear Installations	MERIT	Maximizing Enhancements in Risk-Informed Technology
CVE	Charpy V-notch energy	MHI	Mitsubishi Heavy Industries, Inc.
DE	Division of Engineering	MPA	Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
DHD	deep hole drilling	ND	neutron diffraction
DMW	dissimilar metal weld	NDE	nondestructive examination
DOE	United States Department of Energy	NEA	Nuclear Energy Agency
Doosan	Doosan Heavy Industries, Inc.	NED	International Journal of Nuclear Engineering and Design
EC	European Commission	NGNP	next-generation nuclear plant
EDF	Électricité de France	NPP	nuclear power plant
EMCC	Engineering Mechanics Corporation of Columbus	NRC	U.S. Nuclear Regulatory Commission
EPRI	Electric Power Research Institute	NULIFE	nuclear plant life prediction
ERA	Energy Reorganization Act of 1974	ORNL	Oak Ridge National Laboratory
FSWOL	full structural weld overlay		
GDC	general design criterion		
HDPE	high-density polyethylene		

OWOL	optimized weld overlay
PARENT	Program to Assess Reliability of Emerging Nondestructive Techniques
PARTRIDGE	Probabilistic Analysis as a Regulatory Tool for Risk-Informed Decision Guidance
PERFORM 60	Program on the Prediction of the Effects of Radiation for Reactor Pressure Vessel and In-core Materials using Multi-scale Modeling - 60 Years Foreseen Plant Lifetime
PFM	probabilistic fracture mechanics
PISC	Program for the Inspection of Reactor Steel Components
PINC	Program for the Inspection of Nickel Alloy Components
PIRT	Phenomena Identification and Ranking Table
PMMD	Proactive Management of Materials Degradation
PNNL	Pacific Northwest National Laboratory
PRA	probabilistic risk analysis
PTS	pressurized thermal shock
PWR	pressurized-water reactor
PWSCC	primary water stress corrosion cracking
RCS	reactor coolant system
RES	Office of Nuclear Regulatory Research
RG	regulatory guide
RPV	reactor pressure vessel
SCC	Stress Corrosion Cracking
SG	steam generator
SKI	Swedish Nuclear Regulatory Authority
SRP	Standard Review Plan
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
TIP	International Tube Integrity Program
VHTR	very-high-temperature gas-cooled reactor

VTT	Technical Research Centre of Finland
WGIAGE	Working Group on the Integrity and Aging of Components and Structures
WRS	Weld Residual Stress
xLPR	Extremely Low Probability of Rupture
XRD	X-ray diffraction

## REFERENCES

1. C.Z. Serpan, M. E. Mayfield, and J. Muscara, "U.S. Nuclear Regulatory Commission Research for Primary System Integrity Regulations," *International Journal of Nuclear Engineering and Design*, 171, pp. 1-14, 1997.
2. M. E. Mayfield, N. C. Chokshi, and J. Muscara, "Historical Perspective of Advances in Materials Engineering and Their Contributions to Nuclear Safety in the U.S.," 30th MPA-Seminar, 2004, Safety and Reliability in Energy Technology, in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar, Stuttgart, Germany, October 6-7, 2004.
3. U.S. Code of Federal Regulations, "Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities," Part 50, Title 10, Section 50.61 and Appendix G.
4. Fracture Mechanics Verification by Large-Scale Testing, Editor: K. Kussmaul (MPA), EGF/ESIS Publication 8, Mechanical Engineering Publications Limited, London, 1991.
5. Proceedings of the Joint IAEA/CSNI Specialists' Meeting on Fracture Mechanics Verification by Large-Scale Testing, U.S. NRC Report NUREG/CP-0131 (ORNL/TM-12413), Editors: C. E. Pugh, B. R. Bas, and J. A. Keeney (ORNL), October 1993.
6. Regulatory Guide 1.99, "Radiation Embrittlement of Reactor Vessel Materials," Revision 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., May 1988.
7. Rulemaking Issue Affirmation, Final Rule Related to Alternate Fracture Toughness Requirements For Protection Against Pressurized Thermal Shock Events, (10 CFR 50.61a) (RIN 3150-AI01),

SECY 09-0059, dated April 9, 2009.

8. Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1969.

9. O. K. Chopra and W. J. Shack, "Effect of LWR Coolant Environments on the Fatigue Life of Reactor Materials," NUREG/CR-6909, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., February 2007.

10. R. Gersinska, L. Weil, K.H. Herter, and X. Schuler, "Results of Low Cycle Fatigue Experiments in German Boiling Water Reactor Environments," to be published in the Proceedings of the Fourteenth International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Virginia Beach, VA, August 23–27, 2009.

11. Regulatory Guide 1.207, "Guidelines for Evaluating Fatigue Analyses Incorporating the Life Reduction of Metal Components due to the Effects of the Light-Water Reactor Environment for New Reactors," Revision 0, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., March 2007. [ADAMS Accession No. ML070380586]

12. O.K. Chopra and W.J. Shack, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Carbon and Low-Alloy Steels, NUREG/CR-6583, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., February 1998.

13. O. K. Chopra, "Effects of LWR Coolant Environments on Fatigue Design Curves of Austenitic Stainless Steels," NUREG/CR-5704, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., April 1999.

14. NUREG-0800, Section 3.6.3, Revision 1, "Leak-Before-Break Evaluation Procedures," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., March 2007, [ADAMS Accession No. ML063600396.

15. U.S. Code of Federal Regulations, "General Design Criteria for Nuclear Power Plants," Appendix A to Part 50, Title 10.

16. Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Plant Components," American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 2007 Edition.

17. Hutton, P. H. et al., "Acoustic Emission Results Obtained From Testing the ZB-1 Intermediate Scale Pressure Vessel," NUREG/CR-3915, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., September 1985.

18. PISC III, "Evaluation of the Sizing Results of 12 Flaws of the Full scale Vessel Installation." PISC III Report No. 26 – Action 2 – Phase I, JRC Report, EUR 15371 EN, 1993.

19. Regulatory Guide 1.154, "Format and Content of Plant-Specific Pressurized Thermal Shock Safety Analysis Reports for Pressurized Water Reactors," U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., 1987.

20. D. Rudland, D. J. Shim, H. Xu, and G. Wilkowski, "Summary Report on Evaluation of Circumferential Indications in Pressurizer Nozzle Dissimilar Metal Welds at the Wolf Creek Power Plant," Engineering Mechanics Corporation of Columbus, Columbus, OH, April 2007. [ADAMS Accession No. ML071560398]

21. P.L. Andresen, F.P. Ford, K. Gott, R.L. Jones, P.M. Scott, T. Shoji, R. W. Staehle, and R.L. Tapping, "Expert Panel Report on Proactive Materials Degradation Assessment," NUREG/CR-6923, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., February 2007.

22. Code Case N-504-4, "Alternative Rules for Repair of Classes 1, 2, and 3 Austenitic Stainless Steel Piping," Section XI, Division 1, Cases of ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 2007 Edition.

23. Letter from N.L. Salgado (NRC) to Site Vice President, Entergy Nuclear Operations, Inc., Pilgrim Nuclear Power Station, "Relief Request (PRR)-19, Install A Weld Overlay on Jet Pump Instrumentation Nozzle Weld RPV-N9A-1 – Pilgrim Nuclear Power Station (TAC NO. ME1151)," September 11, 2009. [ADAMS Accession No. ML092370549]

24. Materials Reliability Program: Technical Basis for Preemptive Weld Overlays for Alloy 82/182 Butt Welds in PWRs (MRP-169), Revision 1, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, April 2008. [ADAMS Accession No. ML090360429]

25. Draft Code Case N-766, "Rules for DMW Inlay or Corrosion Resistant Cladding for Migration of PWR Full Penetration Circumferential Nickel Alloy Welds of Class 1 Items", Section XI.

26. Materials Reliability Program: Resistance of Alloys 690, 52 and 152 to Primary Water Stress Corrosion Cracking (MRP-237, Rev. 1): Summary of Findings from Completed and Ongoing Test Programs Since 2004. EPRI, Palo Alto, CA, 2008.

27. Next-Generation Nuclear Plant Licensing Strategy: A Report to Congress, August 2008. [ADAMS Accession No. ML082290017]

28. Advanced Reactor Research Infrastructure Development Assessment, Draft, Office of Nuclear Regulatory Research, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C., March 2007. [ADAMS Accession No. ML070740637]

29. T.L. Sham, "Research Program Plan for Modeling of Creep and Creep-Fatigue Crack Growth in HTGR and VHTR Materials (JCN-6554)," ORNL/TM-2009/197, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, September 2009.

30. N.C. Gallego, T.D. Burchell, and M. Srinivasan, "Milestone Report on the Workshop on Nuclear Graphite Research," ORNL/NRC/LTR-09/03, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, September 9, 2009. [ADAMS Accession No. ML092530202]



Behälter nach Berstversuch

Hari Shankar Kushwaha

*Director of Health, Safety and Environmental Department at  
Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai/ India*



## Integrity Assessment of Nuclear Power Plants

### ABSTRACT

Leak-Before-Break (LBB) concept involves detailed integrity assessment of primary heat transport system piping of nuclear power plants (PHWR and PWR type reactors). While significant research activities have been going on improving upon the integrity assessment methodologies for last several decades throughout the world, there are still several issues that need to be resolved. To address these issues, a comprehensive Component Integrity Test Program was carried out at Bhabha Atomic Research Center (BARC), India. In this program, both theoretical and experimental investigations were undertaken to address various issues related to the integrity assessment of pipes and elbows. In this paper only some important issues are highlighted. The salient outcomes of this program are as follows: (i) Several new limit load equations of pipe bends are proposed, the predictions of which matched closely with test data. (ii) The importance of stress triaxiality has been investigated in the transfer of J-R curve from specimen to component. (iii) A new mathematical

formulation has been proposed on mesh-independent non-local damage mechanics modeling of ductile fracture process. (iv) New limit load formulations of limit loads of specimens made of dissimilar materials are proposed from slip line field theory. (v) A Modified LBB design rule has been recommended for LBB qualification of PHT piping of NPPs during earthquake loading. (vi) The results indicate that Z-factor for Elbow is always less than those of corresponding straight pipe.

### 1. INTRODUCTION

One of the hypothetical design basis accidents that was traditionally considered for the design of primary heat transport (PHT) system piping of PHWR and PWR was the double-ended guillotine break (DEGB) of the largest size pipe. A natural consequence of this postulation was the necessity of provisions for pipe whip restraints to prevent the dynamic whip effect of the pipe and also to protect the nearby equipments from the jet impingement forces. However, the concept of leak-before-break (LBB) has re-



cently replaced the postulate of DEGB to design the PHT system piping of nuclear power plants.

The LBB concept basically demonstrates through fracture mechanics analysis that there is negligible chance of any catastrophic break of PHT pipes without giving prior indication of leakage. This involves detailed fracture mechanics studies of different piping components. LBB is ensured by demonstrating three levels of safety assessment against sudden DEGB. Level 1 is inherent in the design philosophy of piping with a well-defined factor of safety and choice of ductile material for pipe. The demonstration of Level 2 safety consists of postulating a surface crack most likely in the welded pipes, which may go undetected during the non-destructive examination. It is then shown that there is insignificant crack growth of this surface crack during the entire life period of the reactor. In this crack growth study, one should consider all the possible crack growth mechanisms whichever may be operative for the particular piping system. In one such study [2], it was shown that the crack growth of a postulated flaw of 25% of pipe thickness was less than 3% of pipe thickness during the entire life period of the reactor under the maximum fluctuating load that may act during normal/upset operating condition. In the Level 3 safety assessment, a throughwall crack is postulated at the location of maximum stress with the worst material properties. The size of the

crack is chosen based on the minimum detection capability with a factor of safety of 10. This is known as Leakage Size Crack (LSC). In India, minimum detectable limit of leakage in PHT system piping of PHWR is usually taken as 0.05 kg/s. The high factor of safety of 10 is mainly to account for the general inaccuracies in the theoretical leak rate model through the cracks in a piping system. Finally, it is shown that LSC will withstand the maximum credible load that may act during a safe shutdown earthquake (SSE).

It is, therefore, clear from the above discussion that integrity assessment of piping components is very essential for safe and reliable operation of nuclear power plants. Integrity assessment of any cracked structure made of ductile material is normally done through limit load approach or Elastic-plastic Fracture Mechanics (EPFM) approach. While significant research activities have been going on in these areas for last several decades throughout the world, there are still several issues that need to be resolved.

To address these issues, a comprehensive Component Integrity Test Program has been carried out at Bhabha Atomic Research Center (BARC), India. In this program, both theoretical and experimental investigations were undertaken to address various issues related to the integrity assessment of pipes and elbows. In this paper mainly five issues are described briefly: (a) Improvements in the integrity assessment of piping com-

ponent under monotonic loading through improved limit load and EPFM equations, (b) Improvements in the micromechanical modeling, (c) Cyclic loading effect on the integrity assessment of piping components and (d) Compliance effect on load carrying capacity of cracked piping system (e) Simplified Z factor approach to account for ductile tearing in design through limit load approach. In addition to these four main areas related to component integrity assessment, significant progress has been made by BARC in investigating the issue of weld mismatch effect at specimen levels. These are described below in subsequent five sections.

## 2. FRACTURE EXPERIMENTS UNDER MONOTONIC LOADING

As a part of Component Integrity Test Program at Bhabha Atomic Research Centre (BARC), India, 200-400mm diameter straight pipes and 900 pipe bends (elbows) containing throughwall flaws are tested. Figure 1 shows the geometry of the straight pipe specimens. Figure 2 shows the schematic diagram of the test set up for elbows. Tables 1,2 show the details of the geometry of the pipe and elbow specimens, respectively. All these specimens are made of carbon steel (ASTM-A333 Gr.6) material and tested at room temperature. The test specimens are fatigue pre-cracked by small amount (~2-10mm each side) prior to performing the experiment. This ensures a sharp crack tip. Details of

the experiments can be found in references [5,6]. Tensile and fracture specimens namely, Side Edged Bend (SE(B))/Compact Tension (CT) specimens are machined from these pipes and tested to obtain the tensile and fracture properties respectively. Details of the experiments have been discussed in the report [7]. Table 3 summarizes the tensile properties. Referring to Table 3, it can be observed that there are small differences of mechanical properties of 200-400 mm sizes of the components. This is because of the heat-to-heat variation of pipe/elbow materials.

### 2.1 Experimental Limit Load

During the experiments, load, load-line displacement, crack mouth opening displacement (CMOD) and crack growth are measured. The crack growth is measured by image processing technique as described by Chattopadhyay et al.[5]. Twice elastic slope (TES) method has been employed to determine the collapse load from experimental load-deflection curve. Table 4 summaries the crack initiation load, TES collapse, maximum load/moment and the crack growth at the maximum load obtained from the experiments. As the point of physical crack initiation is difficult to identify experimentally, the load at a crack growth of 0.2 mm (Stretched Zone Width  $\approx$  200  $\mu$ m for this material [7]) is considered the crack initiation load. The following observations are noted from the experimental investigations.

a) The crack initiation load precedes the TES collapse load in all the cases.

b) No significant difference observed between the TES collapse and maximum load for the cases of straight pipes and elbows subjected to closing bending moment.

c) Elbows subjected to opening bending moment exhibit higher load bearing capacity than the load obtained from TES method.

d) Significant amount of crack growth is observed at maximum load for higher sizes of straight pipe specimens and elbows subjected to opening bending moment.

## 2.2 Limit Load Analyses of Test

### Data

For piping components of small size or made of highly tough material, the role of fracture mechanics in assessment of integrity may not be significant. For these cases, the plastic zone at the crack tip engulfs the entire tensile ligament before the crack driving force exceeds the material fracture toughness and hence the plastic limit load governs the load bearing capacity of the components. There are various plastic limit load formulae for piping components. These are described below briefly.

### 2.2.1 Straight pipe

The plastic collapse moment of a straight pipe with throughwall circumferential flaw subjected to bending moment

is calculated as follows: [8].

$$M_L = 4R^2t\sigma_f \left[ \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) - 0.5\sin\theta \right] \quad (1)$$

where, R is the mean radius of the pipe cross section, t is the wall thickness,  $\sigma_f$  is the pipe material flow stress usually taken as the average of yield and ultimate stress and  $\theta$  is the semi-crack angle. Table 5 shows the comparison of the experimentally observed maximum moment with the predictions of the collapse moments (Eq.(1)).

### 2.2.2 Elbow

Miller [9] proposed in-plane collapse moment (ML) equations for through wall circumferentially cracked (TCC) elbows as follows:

$$\frac{M_L}{M_o} = 1 - \frac{3\theta}{2\pi} \quad (2)$$

$$M_o = 0.935 (4R^2t\sigma_f)h^{2/3} \quad (3)$$

where,  $2\theta$  is the circumferential crack angle,  $h = tR_b/R^2$  is the elbow factor or bend characteristics,  $R_b$  is the mean bend radius, R is the mean radius of elbow cross section, t is the wall thickness and  $\sigma_f$  is the material flow stress usually taken as average of yield and ultimate strength. The equation proposed by Zahoor [10] for TCC elbow is as follows:

$$M_L = M_o \left[ 1 - 0.2137\left(\frac{a}{D_m}\right) - 0.0485\left(\frac{a}{D_m}\right)^2 - 1.0559\left(\frac{a}{D_m}\right)^3 \right] \quad (4)$$

Applicability :  $a/D_m \leq 0.8$  ,  $h \leq 0.5$  and  $D_m/t \geq 15$

where,  $M_o$  is as defined in Eq.(3), a is

the half crack length and  $D_m$  is the mean diameter of the elbow cross section. The in-plane collapse moment equation proposed by Zahoor [10] for through wall axially cracked short radius elbow is as follows :

$$M_L = M_o \left[ 1 - 0.15 \left( \frac{a}{D_m} \right) \right] \quad (5)$$

However, these equations do not differentiate between opening and closing modes of bending moment. Recently, Chattopadhyay et al [11,12] proposed improved collapse moment formulas for TCC elbows under closing and opening moments. These newly proposed equations for closing moments are as follows:

$$X = \frac{M_L}{M_o} \quad (6)$$

$$M_o = 1.075h^{\frac{2}{3}} (4R^2t\sigma_y) \quad (7)$$

The function X is shown in Table 6.

For opening moment, the basic form of the equation is same as closing mode given in Eq.(6) with  $M_o$  and X defined for  $5 \leq R/t \leq 20$  as follows:

$$\frac{M_o}{4R^2t\sigma_y} = 1.0485h^{\frac{1}{3}} - 0.0617 \quad (8)$$

$$\begin{aligned} X &= 1.127 - 1.8108 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) && \text{for } 45^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ \\ &= 1 - 0.8 \left( \frac{\theta}{\pi} \right) && \text{for } 0^\circ \leq 2\theta \leq 45^\circ \end{aligned} \quad (9)$$

The experimental collapse moments evaluated by twice-elastic slope (TES) method are compared with the theoretical predictions through Eqs.(2-9). The experimental TES collapse loads are con-

verted to moment by multiplying the load with the moment arm length as given in Table 2 and shown in Figure 2. Table 7 shows the comparison of collapse moments. It may be seen from Table 7 that the predicted collapse moments using the Eqs.(6-9) are quite close (within 8%) to the test data. In contrast, the predictions by Zahoor's [10] Eqs. (3-5) are mostly non-conservative (maximum 39%) and also not close to test data. It may also be noted that Zahoor's equations are not strictly applicable here as these elbows have  $R/t \approx 5$  where as Zahoor's equation are valid for  $R/t \geq 7.5$ . This highlights the geometric limitations of the Zahoor's equations. The predictions by Miller's [9] Eqs.(2-3) are seen to be very conservative (maximum 25%) with respect to the test data, which was also observed by Yahiaoui et al [13].

## 2.3 Finite Element Analysis of Test Data

This section describes briefly the finite element analysis of the SE(B)/CT specimens, pipes and elbows for comparison between test results and numerical prediction. More details may be found in [14,15].

### 2.3.1 Finite element model

A fine mesh has been made near the crack front to capture the steep stress/strain gradients accurately. Figure 3 shows the typical finite element mesh used for the cracked elbow. The isopara-

metric 20-noded elements are employed in the models. Reduced order of integration (2x2x2) is used to eliminate artificial locking under incompressibility condition imposed by plastic deformation. Large strain, large displacement relations are assumed in the analysis. The finite element models are analyzed under displacement control to simulate the experimental procedure. Nonlinear material behavior is modeled using incremental plasticity with von Mises yield function associated flow rule and isotropic hardening. The true stress-strain curve obtained from a uniaxial test has been used in the analysis. The finite element code WARP3D [16] is used to analyze all the models presented here.

## 2.3.2 Finite element analysis results

### 2.3.2.1 Load deflection curve

The comparison of numerical and experimental load-deflection characteristics of the typical SE(B) specimen, full-scale elbow is shown in Figures 4 and 5. The numerical and experimental results agreed well. The good matching between experimental and numerical results ensures the validation of the numerical model as well as experimental results. As expected, the numerical model shows higher stiffness just before the maximum load occurs. This is because of the assumption of the stationary crack in the model without considering the crack growth.

### 2.3.2.2 Comparison of crack initiation load

The initiation toughness  $(J_i)_{SZW}$  obtained from the stretched zone width (SZW) can be used to determine the load at onset of ductile crack growth. Investigations [3,4,17,18] have shown that  $(J_i)_{SZW}$  is more or less independent of stress triaxiality and can be treated as a material property. Hence, it is possible to predict the crack initiation loads by comparing  $(J_i)_{SZW}$  determined from the laboratory specimen with the calculated crack driving force (applied J-integral) of the cracked component. The comparison here is shown for 200 and 400 mm NB pipes and elbows. The  $(J_i)_{SZW}$  for these pipe/elbow materials is shown in Table 3. Figure 6 shows the variation of crack driving force (J-integral), obtained from finite element analysis, with the load for 200 mm NB pipes and elbows. It should be noted that the J-integral varies across the thickness. The J-integral is maximum at the mid-thickness and low at the outside/inside surfaces. The average J-integral is calculated using the following equation.

$$J_{avg.} = \frac{J_{in} + 4J_{mid} + J_{out}}{6} \quad (10)$$

This average J-Integral is used to predict global crack initiation load. Table 8 compares the experimental and numerical results. The crack initiation loads predicted by finite element method show good agreement with the experimental results.

### 2.3.2.3 Transferability of J-R curve from specimen to component

The fracture resistance (J-R) curve obtained from specimen testing cannot be employed directly for analysis of component. The J-R curve is known to be geometry dependent and it exhibits difference in its slope depending on stress triaxiality /constraints ahead of crack tip [1-4]. The stress triaxiality ahead of the crack tip has to be identical in the specimen and component for transfer of fracture properties from specimen to component.

There are various parameters to quantify the stress triaxiality or constraint ahead of the crack tip. However, in this study, the multi-axiality quotient, 'q' as proposed by Clausmeyer et al [18] and later modified by Pavankumar et al [15] is used. The parameters are as defined below:

$$q = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}\sigma_m} \quad (11)$$

where, hydrostatic stress,  $\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3.0$  and von-Mises effective stress,  $\sigma_e = [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2}\sqrt{2}$  with  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  being the principal stresses.

The small values of 'q' represent high degree of stress triaxiality according to this definition. Since, 'q' varies across the ligament for low constraint geometries, a question may arise regarding the extent of ligament length to be considered for the comparison of stress triaxiality of specimen and various components.

Further, 'q' alone cannot describe the level of stress triaxiality in a geometry. The slope of 'q' i.e. dq/dx has also to be considered along with 'q' to assess the crack growth behavior. Therefore, the triaxiality has to be considered over a certain length in the ligament ahead of the crack tip. Consequently, Pavankumar et al [15] modified the 'q' parameter and proposed a new parameter,  $A_{nq}$  as defined below :

$$A_{nq} = \frac{\int_{J(\sigma_0)}^{5J(\sigma_0)} q dx}{\int_{J(\sigma_0)}^{5J(\sigma_0)} q_c dx} \quad (12)$$

where, q is the multi-axiality quotient,  $q_c$  is the critical value of multi-axiality quotient (0.27) [18] s

dx is the distance across the ligament

J is the J-integral

$\sigma_0$  is the yield stress

These parameters (i.e. q and  $A_{nq}$ ) have been evaluated for fracture specimens ( $a/w \approx 0.5$ ) which are machined from pipes and the 200, 300 mm NB pipes having various sizes of throughwall circumferential crack subjected to four point bending load (Table1) and also for 200, 400 mm NB elbows having throughwall circumferential cracks at extrados/intrados subjected to closing/opening bending moment (Table 2). Figure 7 shows the typical variation of ' $A_{nq}$ ' with J-integral for SE(B) specimen and 200mm NB pipes and elbows. It may be seen that stress triaxiality ahead of crack tip, quantified by the parameter ' $A_{nq}$ ' is almost identical for all these pipes and elbows and SE(B)



specimen. Hence, specimen J-R curve can be transferred from the specimen to the cracked piping components. Figure 8 shows that J-R curves of these 200 mm NB pipes and elbows and SE (B) specimen are almost identical [19,20]. This shows the importance of stress triaxiality in the transfer of fracture properties from specimen to component.

### 2.3.2.4 Extrapolation Of specimen J-R Curve.

As the crack growth is limited in the specimens, it is often necessary to extrapolate the specimen J-R curve for the prediction of resistance property at the large crack growth in real life components. Proper extrapolation method has to be selected so that it can estimate the instability closely and conservatively. Ideally, the curve-fit of test data should be such that it allows conservative extrapolation of J-R curve. In the present analysis the three-parameter power law is fitted for specimen J-R curve which is having similar triaxiality level as that of component. The fitted curve is extrapolated up to the point of interest. Figure 9 shows the specimen J-R curves transferred to the components. Table 9 gives the geometric details of the specimens. The three-parameter power law is of the following form.

$$J_R = c_1 + c_2(\Delta a)^{c_3} \quad (13)$$

where  $c_1$ ,  $c_2$  and  $c_3$  are the fitting constants.

### 2.3.2.5 Prediction of load deformation behaviour for the cracked components considering crack growth.

As discussed earlier, the specimen J-R curve has been selected on the basis of similar triaxiality level and extrapolated with three-parameter power law fitted equation (Eq.13). The specimen J-R curve can be used to predict the load deformation behaviour of cracked pipes and elbows. Following numerical approach is used to predict the load deformation behaviour considering crack growth. Figure 9 explains the numerical methodology used.

1. Calculation of set of load vs load-line-displacement and CMOD curves for different stationary crack angles using finite element analysis.

2. Prediction of onset of crack growth initiation for the original crack configuration when

$$J_{(a_0)} = (J_i)_{SZW} \quad (14)$$

where  $(J_i)_{SZW}$  is crack initiation toughness based on SZW.

3. Increment the crack length by  $\Delta_a$ ,

$$a = a_0 + \Delta_a$$

4. Predict the load, load line displacement, CMOD when

$$J(a_0 + \Delta_a) \approx J-R(\Delta_a)$$

5. Repeat the step 3-4 for further crack growth by increasing  $\Delta_a$

Figure 11 shows the comparison of numerical predictions using the above-mentioned approach for a 400mm NB cracked elbow with the experiments.

Table 10 summarizes the maximum load predicted by the numerical analysis and the experiments. A very good matching between the test results and prediction may be observed.

### 3. A NEW DAMAGE MECHANICS BASED APPROACH FOR INTEGRITY ASSESSMENT OF PLANT COMPONENTS

Prevention of failure of pressurized and high-energy components and systems has been an important issue in the design of all types of power and process plants. Instead of the traditional fracture mechanics based approaches, it is now possible to model different fracture or material degradation processes. In these models (popularly known as continuum damage models or local models), the effect of material damage is usually considered as an internal variable in the expressions representing the constitutive behavior of engineering materials [21-22]. Numerical analyses based on these local damage models, however, are often found to depend on the spatial discretisation (i.e. mesh size). The increasingly finer discretisation grids can lead to earlier crack initiation and faster crack growth [23]. In this paper, a non-local form of the Rousselier's model developed by Samal et al. [24-25] has been described. The damage diffusion equation has been discretised along with the stress equilibrium equation using finite element method. Fracture behavior of a compact tension

specimen has been modeled both in the upper shelf and the ductile to brittle transition region of a pressure vessel steel.

#### 3.1 A mesh-independent ductile damage model and Beremin's model for cleavage fracture

Recently, a nonlocal formulation of Rousselier's model using nonlocal damage  $\dot{d}$  as a nodal degree of freedom has been developed by Samal et al. [24-25]. The increment of the nonlocal damage variable  $\dot{d}$  in a material point  $\vec{x}$  is mathematically defined as a weighted average of the increment of the local void volume fraction  $\dot{f}$  in a domain  $\Omega$ , i.e.,

$$\dot{d}(x) = \frac{1}{\Psi(\vec{x})} \int_{\Omega} \Psi(\vec{y}; \vec{x}) \dot{f}(\vec{y}) d\Omega(\vec{y}) \quad (15)$$

where  $y_r$  is the position vector of the infinitesimally small volume  $d\Omega$  and  $\Psi \vec{y} \vec{x}$  is the Gaussian weight function. The damage diffusion equation relating the evolution of the nonlocal damage parameter  $d$  with respect to the local void volume fraction  $f$  can be written as

$$\dot{d} - \dot{f} - C_{length} \nabla^2 \dot{d} = 0 \quad (16)$$

where  $C_{length}$  is the characteristic length parameter of the material. The yield function of the Rousselier's model is modified by substituting the nonlocal damage in place of the local ductile void volume fraction  $f$  as

$$\phi = \frac{q}{1-d} + D\sigma_k d \exp\left(\frac{-p}{(1-d)\sigma_k}\right) - R(\epsilon_{eq}) = 0 \quad (17)$$

where  $D$  and  $D\sigma_k$  are the parameters

of the Rousselier's model and are constants for a material. Eq.(16) along with the mechanical equilibrium equation incorporating the yield function (17) has been implemented in a Finite Element code to analyse different types of fracture mechanics specimens [24-25]. In order to model the cleavage fracture process, the nonlocal damage model has been coupled to the Beremin's model [26]. According to this model, the probability of cleavage fracture  $P_f$  at any given loading as

$$P_f = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_w}{\sigma_u} \right)^m \right] \quad (18)$$

where the loading parameter is defined as the Weibull stress  $\sigma_w$  and is expressed as

$$\sigma_w = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^n (\sigma_i)^m \frac{V_i}{V_0}} \quad (19)$$

It may be noted that  $m$  and  $\sigma_u$  are the Weibull's shape and size parameters respectively. Further details can be found in Ref. [27]. In the present work, Eq. (18) is used to calculate the probability of cleavage fracture of the CT specimen at different loading levels and at different temperatures, where the Weibull stress will be calculated using the stress field ahead of the growing crack using Eq.(19).

### 3.2 Analysis of a compact tension specimen in the upper shelf and DBT region

Experiments have been conducted at MPA Universität Stuttgart, Germany

on standard 1T CT specimens (with initial crack to width ratio  $a_0/W=0.522$ ) at different temperatures ranging from -100 to -20 deg. C in the DBT region as well as at room temperature (upper shelf). The specimens are made of German low alloy pressure vessel steel DIN 22NiMoCr3-7. Four different mesh sizes (near the crack tip of the specimen) are selected for the analysis, i.e., 0.4, 0.2, 0.1 and 0.02 mm respectively. Both local and non-local Rousselier's models have been used for the analysis. The material properties used in this analysis can be found in [24-25]. Fig. 12 shows the load-CMOD (crack mouth opening displacement) results of analysis of the local model with different mesh sizes with a comparison with the experimental data. It is clear that the results are highly mesh-dependent. Fig. 13 shows the load-CMOD results of the non-local analysis and it can be observed that the results are nearly mesh independent and compare very well with experimental data.

The variation of  $J$ -integral with crack growth in the CT specimen is shown in Fig. 14 for the local model and in Fig. 15 for the non-local model for analysis with different mesh sizes. As can be seen from Fig. 15, the predicted fracture resistance behavior is FE mesh independent for the non-local model, whereas the results are highly mesh dependent in case of the local model (Fig. 14). The results of both the analyses have been compared with those of experiment and it can be noted that the

results of non-local analysis compare very well with the experiment. Fig. 16 shows the comparison of predicted cleavage fracture probability curves with experimental scatter bands of the CT specimen. The lines (solid for 50%, dashed for 5% and dotted for 95% probability of cleavage fracture corresponding to fracture toughness) represent simulation results of combined elastic-plastic analysis and Beremin's model (without modeling of stable crack growth) and the dots (open dots for 5%, semi-open dots for 50% and closed dots for 95% probability of cleavage fracture) represent the simulation results using combined non-local damage mechanics analysis and Beremin's model. It can be observed from Fig. 16 that predicted fracture toughness values (corresponding to 5%, 50% and 95% probability of failure) match very well with those of experimental data except the fracture toughness corresponding to 5% probability of failure at  $-20^{\circ}\text{C}$ .

#### 4. COMPLIANCE EFFECT ON LOAD CARRYING CAPACITY OF CRACKED PIPING SYSTEMS

Level-3 LBB assessment requires integrity of piping system under accident loads which for most of the Indian nuclear power plants is Safe Shutdown Earthquake (SSE). These loads are usually determined from the elastic static and dynamic analysis of the un-cracked piping system. However, the presence of crack increases the local compliance re-

sulting in reduction of load at the cracked section. During integrity assessment the uncracked loads are then compared with the maximum critical load that the cracked piping component can sustain. Again the evaluation of critical load is done by means of fracture test performed on cracked stand-alone pipe and not on the cracked piping system (Fig.17).

These simplifications lead to a lot of conservatism in the LBB evaluation. Thus, for a realistic fracture assessment it becomes necessary to include the effect of piping system compliance on fracture load. BARC has performed detailed analytical investigation and has proposed a simple formula to evaluate the actual moment at the cracked section considering the piping system compliance [28].

$$M_c = \frac{M_u \left[ 1 + \frac{L_c}{L_{eff}} \right]}{\left[ 1 + \frac{L_c}{L_{eff}} \frac{I}{I_{eff}} \right]} \quad (20)$$

Here  $M_u$  is the moment evaluated on the assumption of uncracked piping system,  $M_c$  is the actual moment at cracked section,  $I_{eff}$  is the effective moment of inertia of the equivalent 1-D piping element,  $L_c$  represents the length of 1-D piping element over which thickness is reduced and  $L_{eff}$  is the effective length of the piping system representing global system compliance. This actual moment should be used in standard estimation schemes like R-6 (developed for piping components) to evaluate the J-integral of

cracked piping system. In addition, BARC has also proposed closed-form analytical expressions to evaluate the changes in reactions at the fixed ends of straight piping system [28].

$$\Delta M^L = \left( 2 \frac{L_{eff}^L}{L_1} - 1 \right) \Delta M_c \quad (21)$$

$$\Delta M^R = \left( 2 \frac{L_{eff}^R}{L_1} - 1 \right) \Delta M_c \quad (22)$$

In the above equations  $L_{eff}$  and  $L_1$  are the effective and physical length of the left portion of the un-cracked piping segment.  $L_{eff}^R$  and  $L_2$  are the effective and physical length of the right portion of the un-cracked piping segment.  $\Delta M^L$  and  $\Delta M^R$  are the changes in reactions of the left and right end supports respectively.

In order to demonstrate the compliance effect on load carrying capacity of piping system, 15 tests have been conducted on 8" NB reactor grade pipes. Through-wall cracks of different sizes were machined in the pipes (followed by fatigue pre-cracking) to simulate different local compliance and the system compliance was varied in terms of length of piping system (Fig.18). In all the tests piping ends were kept fixed to represent system behaviour and tests were carried out under load-controlled condition.

These experimental studies have revealed that

i. The critical load of a cracked piping system (with even large through-wall crack of about 120°) is of the order of 85-90% of the collapse load of uncracked piping system where as the critical

load of a simply supported pipe (which simulates piping system with infinite compliance) drops to 43% of collapse load of uncracked pipe (Fig.19).

ii. There exists a large margin between the crack initiation load and the maximum load that a piping system can sustain (Fig.19).

Both analytical and numerical studies (FEA), Fig.20, have been performed to develop in-house fracture assessment procedures for piping systems with postulated cracks.

## 5. FRACTURE MECHANICS ASSESSMENT OF SIMILAR/DISSIMILAR WELDED SPECIMENS

The structural integrity assessment of similar/dissimilar welded joints is an important issue for both the nuclear industry and power plants. Such dissimilar welds often occur between ferritic nozzles of the steam drum and austenitic piping. Recent international surveys of such welded joints have shown that there are several cracking problems, due to fabrication, ageing or corrosion. Typically cracks are most likely to occur in welds, either as a result of welding process itself or initiated during service at surface imperfections. Cracks may extend during service and lead to premature failure, i.e. failure before the design life has been reached. Failure of welded structures, such as nuclear components, represents potential risks to human lives, environment, and capital investment. Thus it is essenti-

al to develop detailed fracture mechanics assessment procedures for these welds and to validate them experimentally.

Detailed analytical studies were performed at BARC to understand the influence of weld mismatch (strength) on fracture behaviour. To overcome the limitations of classical Upper bound approach, a Modified Upper Bound (MUB) approach has been proposed. A rigorous mathematical proof to establish the equivalence of Proposed MUB approach with Slip-line field analysis for homogeneous material was presented. The proposed MUB approach works equally well for similar and dissimilar welds. Both weld center and interfacial cracks were analysed. MUB approach was successfully used to obtain accurate solutions of plastic  $\eta$ -factor [29] and limit load for commonly used fracture mechanics specimens like SE(PB), SE(B) and C(T) specimens (Figs. 21 & 22). Here  $M$  defines the ratio of yield strength of weld to yield strength of base material and  $\psi$  is defined as ratio of uncracked ligament length ( $L$ ) to half weld width ( $H$ ). In all the analytical studies an idealized butt-weld of rectangular cross-section was assumed.

For interfacial cracks simple guidelines to quantify the maximum effect of weld mismatch on limit loads and plastic  $\eta$ -factor were proposed. In addition, analytical solutions to evaluate crack-tip stresses in strength mismatch welded specimens have been proposed. The influence of crack-tip stresses on frac-

ture resistance of ductile material is well established. A high hydrostatic state of stress near the crack-tip significantly lowers the materials fracture toughness. Thus, quantification of crack-tip stresses is necessary for accurate fracture assessment of nuclear components. For homogeneous structures sufficient information on crack-tip stresses is available in literature, however, no such comprehensive work has yet been done on strength mismatched welds. Classical methods like slip-line field (SLF) analysis are applicable to macroscopically homogeneous/single material and cannot be readily extended to mismatch welds. A discontinuous stress solution for M(T) specimen has been proposed. Discontinuity is incorporated in the solution by assuming an unknown value of normal stress at the interface of two materials. In addition to global equilibrium equations, concepts of work principles were utilized to obtain this unknown normal stress and hence the whole plastic field. The results obtained were found to be in excellent agreement with the finite element solutions available in literature (Fig. 23). At present efforts are going on to propose similar analytical solutions for other welded specimens/geometries. These analytical studies would be extremely useful for simplified fracture assessment of these heterogeneous welds.

In addition to analytical investigations a comprehensive program on "Integrity Assessment of similar/dissimilar Welded



pipe joints” is going on in BARC. Both numerical (FE) and experimental studies are envisaged under this program to quantify the weld strength mismatch effects on fracture behaviour.

## **6. MODIFICATION IN LBB DESIGN: CYCLIC DUCTILE TEARING**

In level 3 of LBB assessment, as a worst-case assumption, it is postulated that a through-wall crack exists with maximum credible size, such that, flow through can be detected using leakage sensors under Normal Operating Conditions (NOC) loads. Such postulated crack is called Leakage Size Crack (LSC). LSC is postulated, at all the potential locations and rigorous fracture assessment is performed, for demonstration of LBB capability and safety margin against fracture failure, under postulated design basis accident event loading; which, in several countries including India, is Safe Shutdown Earthquake (SSE) event. Here, the pipe fracture analysis considers the seismic loading as a one time applied load of magnitude equal to peak load at the postulated flaw location during the earthquake event. There are no explicit considerations for the cyclic damage or for the number of applied load cycles during earthquake events. Some of the most referred LBB documents such as USNRC guides [30] and IAEA-TECDOC reports [31, 32] on LBB, are also silent on cyclic fracture aspects under earthquake conditions. However, during a typical SSE

event, the nuclear power plant piping experiences around 10-20 cycles of large amplitude reversible cyclic loads. It is a well-known fact that the reversible cyclic loading significantly reduces fracture resistance (J-R curve) of the material when compared to monotonic J-R curve. A cracked component, which is safe for monotonic load, may fail in limited number of reversible cyclic loads of the same amplitude. Hence, for a realistic assessment of LBB, experimental and analytical investigations on cyclic tearing were carried out. In view of this, experimental and analytical investigations have been carried out [36, 37] to understand and address the cyclic tearing damage into the LBB design. Thirty number of full scale pipe tests, on the PHT piping material of the Indian PHWRs and proposed Main Heat Transport (MHT) piping material of the Advanced Heavy Water Reactor (AHWR) were conducted under reversible cyclic loading conditions. It is well known that for a piping system that seismically induced response is combination of load and displacement controlled loadings. Hence, the tests have been conducted under both load and displacement controlled loadings. The test results have been studied in relation to the corresponding monotonic pipe fracture test results and a Cyclic Tearing Failure Assessment Diagram (CTFAD) has been developed to address the cyclic tearing issue in LBB design. Based on these investigations, new design rules for level 3 LBB assess-

ment were suggested to account for the damage due to reversible cyclic loading. A procedure for analytical evaluations of crack growth was also proposed and the predicted crack growth was compared with test measured crack growth.

### 6.1 Experimental Program

A total of 30 cyclic tearing tests have been conducted to cover the variability in the pipe sizes: 6", 8", 12" & 16" NB; through wall circumferential crack sizes: 60°, 90° & 120°; material: SA333Gr6. Carbon steel, SS304LN Stainless steel; notch location: base metal & weld metal; loading control mode: load controlled and displacement controlled; loading parameters: load amplitude, load ratio, displacement increment.

The pipes of 8", 12" & 16" NB sizes are made of SA333 Gr.6 carbon steel and are similar to the ones used in PHT System of Indian PHWR. The pipes of 6" NB size are made of SS304LN stainless steel and are representative of proposed feeder and tail piping of AHWR. Primarily the crack sizes are chosen such that, the experiments will provide the critical load of the pipe with a postulated through wall crack of size nearly equal to twice the LSC. However some tests are performed to study the crack size effects too. 15 cyclic tearing tests were conducted on carbon steel pipes and 15 other tests on SS-304LN stainless steel pipes. A four point bend loading setup as shown in Fig. 24 was used, for reversible loading. During

the test, Load, Load Line Displacement (LLD), Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) and Crack Growth were continuously monitored and recorded. The tests were conducted under quasi-static cyclic loading and are divided into following two categories.

**Load Controlled Tests:** In these tests the pipe was subjected to cyclic loading with constant load amplitude and constant load ratio. The load amplitude was kept between 60% and 95% of the predicted monotonic critical load.

**Displacement Controlled Tests:** In these experiments, a constant displacement increment is applied after every cycle and the load ratio was kept constant throughout the experiment. Here the displacement increment was controlled when the specimen was loaded in crack opening direction and load was controlled in the reverse direction loading in order to maintain the constant load ratio.

The cyclic fracture tests have shown that, the pipes may fail in limited number of load cycles with the load amplitude sufficiently below the monotonic fracture/collapse load as shown in Fig. 25. The comparison of the displacement controlled quasi-static cyclic test and the corresponding quasi-static monotonic test results given in Fig. 26a. This figure show that the cyclic loading has less influence on the maximum load carrying capacity, but there is significant loss in the energy absorbing capability of the piping during the cyclic loading. It has been

observed that there is significant reduction in fracture resistance i.e. J-R curve under cyclic loading conditions as shown in Fig. 26b. The J-integral is evaluated using the crack growth data and the area under the load versus load line displacement (or moment vs rotation) envelop curve through  $\eta$  and  $\gamma$  factors.

## 6.2 Cyclic Tearing and Current LBB Assessment

The current LBB design procedure and requirement are described at lengths in standard documents like, NUREG-1061 [30] and IAEA-TECDOC-710 and 774 [31, 32]. These standard documents recommend following safety margins to be demonstrated against the normal operating plus SSE loads.

Margin to Critical Crack Size:

$$(M_{noc} + M_{sse}) < M_{crit} \text{ (at } 2 \times \text{LSC)}$$

Margin on Loads:

$$(M_{noc} + M_{sse}) \times \sqrt{2} < M_{crit} \text{ (at LSC)}$$

The above equations ensure a margin of 2 on the leakage size crack (LSC) and a margin of  $\sqrt{2}$  on normal operating plus safe shut down earthquake load. These safety margins intend to account for uncertainties associated with leak detections capabilities, analytical flaw evaluation procedures, material properties and specified loadings. Although the above equations are recommended to be applied for SSE conditions but the evaluation of the critical load and the critical crack size are based on the monotonic collapse or monotonic fracture instability. Here the SSE load is

considered as a onetime applied load of magnitude equal to peak load at the postulated flaw. The above equations do not account for the cyclic tearing as a failure mode neither they ensure the safety margins for the desired number of load cycles of SSE load. Likewise the safety factors used in these equations are also not intended to cover the cyclic tearing damage and the number of load cycles. However, the displacement-controlled tests, figure 26, have shown the significant loss in the fracture resistance and the load-controlled tests, figure 25, have highlighted the importance of the number of load cycles in the fracture assessment of piping subjected to a cyclic loading event. Hence cyclic effects should be accounted in the LBB qualification of the piping components.

## 6.3 Development of Cyclic Tearing Failure Assessment Diagram (CTFAD)

The CTFAD curve is the plot of the cyclic tearing test load amplitude (given as % of maximum load recorded in corresponding monotonic fracture test) versus number of load cycles to failure ( $N_f$ ) and has been shown in figure 27. The curve plots all the load-controlled tests with load ratio equal to -1. The curves were plotted from base metal pipe as well as from welded pipe cyclic tearing tests. From literature, few available results on similar tests on 4" size pipe, CRIEPI Japan [33] have also been plotted in the

curve. This figure clearly shows that the results for load controlled cyclic tearing of Japanese carbon steel are in good agreement with the results of the present tests series on SA333Gr6 carbon steel base material. The small difference in the results is attributed to the difference in the material chemical composition. The CTFAD curve is developed directly from the experimental results and covers wide range of pipe sizes (NPS: 4", 6", 8", 12", 16") as well as crack sizes ( $2\theta$  : 60°, 90°, 120°) and relevant nuclear piping material (Low Carbon manganese steel, Stainless steel). It shows that the number of cycles to failure depends on the load amplitude and the initial crack length. Figure 27 clearly shows that the cracked pipe can fail in limited number of load cycles with the load amplitude sufficiently below the monotonic fracture/collapse load.

#### 6.4 New LBB Rules

Based on the CTFAD curve and the comparisons with corresponding monotonic tearing, new design rules for level-3 LBB assessment were suggested for accounting the damage due to reversible cyclic loading. Since the design basis loading is of a cyclic nature, the number of load cycles must be considered in the fracture assessment of the nuclear plant piping. Usually in a typical SSE, there are around 10-20 high amplitude cycles. Considering the uncertainty associated with the earthquake i.e. its magnitude, number of seismic load cycles and uncer-

tainties in the cyclic degradation of material, the factor of safety should be higher than the material specific CTFAD curves. Alternatively one can fix margins on higher number of cycles. Currently it has been decided to use a load reduction factor corresponding to 50 load cycles of SSE, in LBB qualification of the pipe. However, the number of cycles to which the piping components have to be LBB qualified is a matter of safety philosophy. From the CTFAD, figure 27, the failure load for 50 cycles reduces to 78% of the monotonic failure load for the base material and to 74% of the monotonic failure load for weld material for the present series of tests. It is suggested to use the reduction factor of 3/4 (75%) over the monotonic critical load. For any other number of cycles, the CTFAD can be readily used for reading the reduction factor ( $\beta_c$ ) as a function of number of load cycles and can be applied on the monotonic critical load in LBB assessment against SSE loads in order to account cyclic tearing damage. Hence, with the use of  $\beta_c$ , the required safety factors for LBB qualification have been modified as given below.

Margin to Critical Crack Size:

$$(M_{noc} + M_{sse}) < \beta_c \times M_{crit} \text{ (at } 2 \times \text{LSC)}$$

Margin on Loads:

$$(M_{noc} + M_{sse}) \times \sqrt{2} < \beta_c \times M_{crit} \text{ (at LSC)}$$

Apart from single event of SSE, 5 events of OBE are also considered in the design of piping components of Indian Nuclear Power Plants (NPPs). Extending the reasoning given above for SSE loa-

ding, it is suggested to use reduction factor of 2/3 on the monotonic critical load. The factor for OBE is smaller to account for their higher frequency of occurrence. It is apparent from the CTFAD that for load amplitude as 2/3 of monotonic failure load, the numbers of safe load cycles are more than 150. It is due to the fact that at low loads the fatigue crack growth is the predominant. These safety factors for OBE and SSE are directly derived from the load controlled tests and their use will guard against the instability under the seismic event. However, it is well known that the seismic event will also induce cyclic displacement-controlled loads. These loads may not lead to instability but they add to the damage due to cyclic fracture resistance degradation (Figure 26) and can cause large crack growth (Figure 28). Hence a safety margin is required to guard against excessive tearing. Usages of proposed reduction factors i.e. 3/4 for SSE or 2/3 for OBE loading reduces the critical load and the crack extension corresponding to the reduced critical load is insignificant under the cyclic loading as shown in figure 28. This fact shows that the proposed margin is sufficient and will guard against the excessive tearing also.

### 6.5 Methodology for Cyclic Tearing Evaluation

The results of above cyclic tearing tests have been investigated in detail and a methodology for evaluation of crack

growth and instability under fully reversible cyclic loads has been developed.

**Evaluation of Crack Growth:** Here the crack growth by both, fatigue and fracture mode have been considered. The total crack extension in let us say  $i^{\text{th}}$  cycle can be given by the following equation.

$$\frac{da}{dN}_i = \left(\frac{da}{dN}\right)_{i,\text{Fatigue}} + \left(\frac{da}{dN}\right)_{i,\text{Tearing}} \quad (23)$$

The fatigue crack growth has been evaluated using, Dowling's  $\Delta J$  integral and the extrapolated fatigue crack growth law i.e. Paris Law. Several experimental studies based on the  $\Delta J$  parameter, Miura et al. [33], Rahman et al. [34] have shown that the cyclic  $\Delta J$  is effective to describe the crack growth behaviour in a large scale yielding region. The  $\Delta J$  is evaluated from the loading branch of hysteresis through  $\eta$  and  $\gamma$  factors usages. The plastic part of  $\Delta J$ -integral for  $i^{\text{th}}$  cycle is evaluated using below equation.

$$\Delta J_{i,pl} = \int_{\phi_{i,pl}^A}^{\phi_{i,pl}^C} \eta (M - M_A) d\phi_p + \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \gamma J \Delta_{ip} d\theta \quad (24)$$

Here point 'A' corresponds to the minimum load and point 'C' corresponds to the maximum load of loading branch 'ABC' of the  $i^{\text{th}}$  cycle hysteresis. Further for fatigue crack extension evaluated total  $\Delta J_i$  value is converted into equivalent  $\Delta K_i$  using following relation.

$$\Delta K_i = \sqrt{\Delta J_i \cdot E} \quad (25)$$

The crack growth in this cycle is evaluated using the effective  $\Delta K_i$  and fatigue crack growth law.

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K_i)^m \quad (26)$$

The constant  $C$  and  $m$  can be determined from the FCGR tests as per the ASTM Standard E647 using three-point bend specimen of SA333 Gr.6 carbon steel and machined from the pipe material stock. The  $C$  is  $3.982 \times 10^{-12}$  and  $m$  evaluated is 3.01. In above equation unit of  $da/dN$  is  $m/cycle$  and of the  $\Delta K$  is in  $MPa\sqrt{m}$ . These tests have been carried out for stress ratios of 0.1, 0.3 and 0.5. The stress ratios have negligible effect in the Paris region.

The fracture crack growth has also been calculated cycle by cycle from the monotonic J-R curve and a new proposed J'-integral which accounts for the cyclic damage. The J integral is relevant for tensile plastic strains ahead of crack tip. Chang-Sung Seok et al. [35] has shown for reversible loading i.e. load ratio  $R=-1$ , at the minimum load, the crack tip positive plastic strains due to previous tensile load vanishes, and the compressive plastic strains are generated at tip and on release of load there will be residual stress/strain ahead of crack tip. Reloading in crack opening direction generates tensile plastic strain ahead of crack tip and the specimen will undergo the fracture process depending upon the loading magnitude. This shows that the positive part of the loading branch of a cycle is responsible for fracture mode crack growth. In view this, a new J'-integral has been proposed which is calculated cycle-by-cycle from the positive part of loading branch that is from zero

load point 'B' to the maximum load point 'C' of loading branch of let us say  $i^{th}$  cycle hysteresis. The plastic part of the proposed J'-integral for  $i^{th}$  cycle is evaluated, through  $\eta$  and  $\gamma$  factors usages, as given below

$$J'_{i,pl} = \int_{\phi_{i,pl}^0}^{\phi_{i,pl}^C} \eta M d\phi_{pl} + \int_{\theta_{i-1}}^{\theta_i} \gamma J'_{i,pl} d\theta \quad (27)$$

The crack growth calculation using above procedure have been made for four number of load control cyclic tearing test. The predicted crack growth are found in good agreement with corresponding test measured and have been plotted in figure 29.

Instability Criteria for Load Controlled Tests: In figure 30, the maximum moment points of the 5 load controlled cyclic tearing test have been plotted versus the test measured crack size. In the same figure the moment versus crack size for 3 monotonic fracture tests on similar pipes have also plotted. The monotonic failure line has been plotted by linear fitting to the maximum load point of the monotonic fracture test. The figure clearly shows that there is large crack growth in cyclic tests before the instability point. However in monotonic tests, there is very small crack growth up to the maximum moment (instability load). Further it also shows that the instability point of cyclic tearing tests lie close to the monotonic failure line. Hence, instability occurs when the current crack size ' $a_i$ ' in cyclic tests reaches to a critical size ' $a_c$ ' for the given loading amplitude and evaluated using monoto-



nic instability assessment. In term of load it also can be written as below

$$M_{Applied\ Maximum} \geq M_{Monotonic\ Critical\ Load}(a_i) \quad (28)$$

$$a_i = a_{i-1} + \left( \frac{da}{dN} \right)_i$$

## 7. FATIGUE-RATCHETING INVESTIGATIONS ON PRESSURISED PIPE-ELBOW

During the design basis earthquake events, the pressurized elbows experience inelastic cyclic excursions and can lead to ratcheting i.e. accumulation of plastic strains. In past, a number of investigators like Ohno et. al. [38], Chaboche et. al. [39], Hasan et. al. [40] etc. has been carried out investigations to understand the cyclic plasticity and ratcheting behavior of materials. However, they have concentrated mainly on material ratcheting behavior and its constitutive modeling but the ratcheting-fatigue interaction has not been addressed. To assess the structural integrity under ratcheting-fatigue, Yahiaoui [41] and Touble [42] have carried out experimental and analytical investigations which have led to changes in piping seismic design rules of various design codes.

The elbows, among other piping components, exhibit highly strained regions in the piping system because of their high flexibility and are vulnerable to failure by ratcheting-fatigue. Therefore, to understand the ratcheting-fatigue failure mechanism, eight numbers of ratcheting

experiments were conducted on 200 NPS Sch.100 size pipe-elbow assemblies made of carbon steel. These tests were conducted under combinations of constant internal pressure and quasi static reversible cyclic displacement loading of magnitude allowable during design basis earthquake event. In all these tests, there were significant accumulation of ratchet strain and ballooning of elbow at crown location. The presence of non-relaxing internal pressure stress along with ratcheting has led to very early fatigue crack initiation in the component. To understand the phenomena, a series of uniaxial ratcheting-fatigue experiments at specimen level have also been performed. To understand the analytical modelling aspects of ratcheting phenomenon, testing was followed by the finite element analyses. Further, number of cycle to fatigue crack initiation were also evaluated using various available strain-life equations and compared with the experimental results.

### 7.1 Experimental Programme

Fatigue ratcheting tests have been carried out on right angle large radius elbows of 219 mm outer diameter and 15 mm thickness. Its material conforms to specification of PHT piping of Indian PHWRs and is equivalent to ASME specification of SA333 Gr.6. The mechanical properties of pipe material, that is, yield stress, tensile strength and Young's modulus is 288 MPa, 420 MPa and 203 GPa respectively. Each elbow has been

marked in 12 divisions axially and 24 divisions circumferentially and thickness was measured at each grid point. It has been noticed that there is thickness variation of  $\pm 14\%$  with respect to average thickness. Eight numbers of Elbow Ratcheting Tests (ERT) have been conducted on the pressurised pipe-elbow assembly. Straight pipe of about 3D length is welded at both the ends of the elbow in order to include the boundary effects. The experimental setup of pipe-elbow assembly and instrumentation details used in the tests are shown in Fig. 31. The post yield strain gauge was used for strain measurements at crown, intrados, and extrados and near the fix end on the connected pipe. A set of bend clip gauges, as shown in Fig. 31, was used for crown-to-crown and intrados-to-extrados diametrical change measurements. In addition, the crack initiation event (except in ERT1-3) is also detected using online Acoustic Emission Technique (AET) and offline Ultrasonic Testing (UT).

Prior to the ratcheting-fatigue test, a trial test of 5 cycles each of  $\pm 5$  mm displacement load with and without pressure was performed in order to determine the stiffness of elbow assembly and to ensure the response of various sensor/instrument. After the initial trial testing the elbow assembly was pressurized to a constant test pressure and then subjected to large amplitude reversible cyclic displacement controlled loading at the free end. The pressure applied in different tests ranges

from 120 bar to 300 bar which generates nominal hoop stress as  $1/3\sigma_y$  to  $2/3\sigma_y$ . Magnitude of displacement amplitude is taken such that the corresponding pseudo linear bending moment ranging from 0.9 to 1.9 times of flow stress based collapse moment  $M_{collapse}$ .

In term of the ASME Section III piping Eq. (9) with  $B'_2$  stress index, the tests loading ranges from  $1.3\sigma_y$  to  $3\sigma_y$  (or  $2.7S_m$  to  $6.2S_m$ ; here  $S_m$  is based on the  $\sigma_u$ ). These limits have been selected to develop criteria for ratcheting-fatigue failure and to evaluate the safety margins available vis-à-vis the new design rules. The Table 11 gives the test matrix, input loading details as well as the response load reactions, number of cycles in which the crack initiated and cycles when the elbows have failed under given loading. The final failure is defined as when initiated crack grows to through wall and results in water leakage.

Among the eight tests, in six of them the elbows have failed, following an appearance of a through wall axial crack, near the crown location. There was significant ballooning (7-13% increase in diameter), with simultaneous fatigue damage followed by crack initiation on inside surface at crown location and it grows till it becomes through wall thickness (Fig. 32). The through wall crack is nearly 100 mm axially oriented and  $3-4^\circ$  down from crown towards intrados. In other two tests there was crack initiation too at the crown of the elbow but simultaneously

a crack appeared at the weld between elbow and vertical pipe and this crack grew to become through wall. Tested elbow, ERT2, has been cut open to see the inner surface of other side crown where through wall crack has not appeared. It is found that there was multiple crack initiation with axial orientation. The crack initiation ( $N_i$ ) has taken place in 30 to 210 cycles however, final failure ( $N_f$ ) in 62 to 625 cycles. The test results show that  $N_i$  and  $N_f$  depends upon the pressure and cyclic loading amplitudes.

Fig.33 shows the percentage increase in the crown to crown and extrados to intrados diameter with the number of load cycles for the ERT2 test. Similar results were obtained for other tests also and the final value is reported in the Table 11. Accumulation of strain or ratcheting response of ERT5 is shown in Fig. 34. It is clear that crown and intrados shows continuous stain accumulation, however at extrados strain accumulation ceases in few cycles owing to plastic shakedown and subsequent response is plastic cycling. It is important to notice that the cyclic strain amplitude at crown, in different tests, ranges from 0.5% to 1%. From the classical LCF curve it can clearly shown that strain cycling of such amplitudes could not lead to crack initiation and failure in such small number of cycles. These tests clearly points out to significant interaction of accumulated ratchet strain and sustained non-relaxing pressure stress with the LCF life.

The accumulation of ratchet strain leads to reduction in fatigue ductility and so LCF life. This aspect has been confirmed through a series of two step uniaxial specimen tests as shown in Fig. 35. In step-1, the specimen is subjected to 100 cycles of stress controlled loading such that it causes primarily accumulation of ratchet strain. In step-2, LCF tests were conducted to obtain the reduction in the fatigue life of specimen due to accumulated ratchet strain in step-1 loading. In this investigation a maximum ratcheting strain of about 8% has been observed in one of the test where the fatigue life has reduce to nearly half. This can be interpreted as the accumulation of plastic strain exhausts the ductility of material.

## 7.2 Analysis of Ratcheting-Fatigue Tests

Finite element analysis has been performed for few selected tests. Initially, linear elastic finite element analysis (FEA) was performed by applying trial test displacement loading to validate the FE model and its results found in good agreement with measured. This validated FE model was further used for ratcheting analysis where two cases, unstabilised (monotonic) and stabilised (cyclic) material stress-strain curve with multilinear kinematic hardening law, were considered.

The load versus load line displacement (Load-LLD), gross dilation and the strains at various locations have been

recorded and compared with the experimental results. From Fig. 36, it can be observed that the test measured Load-LLD response for the 1<sup>st</sup> cycle is closely simulated by the analyses with monotonic stress strain curve while 10<sup>th</sup> cycle onwards, it becomes close to the analyses with cyclic stress strain curve. This clearly demonstrates and validates the shift of the material's  $\sigma$ - $\epsilon$  response from monotonic to cyclic as results of cyclic loading. Hence the transition of the material's response from monotonic to cyclic should be considered in modeling in order to simulated complete test response.

As discussed earlier, there is significant interaction of ratchet strain and sustained non-relaxing pressure stress with the Low Cycle Fatigue (LCF) damage. This aspect was investigated vis-à-vis different strain-life equations available for LCF damage assessment.

The ASME has defined the procedure for evaluation the alternating stress intensity amplitude which is used in fatigue life evaluation in conjunction with S-N curve or strain life equation i.e. Basquin Coffin-Manson equation. It is assumed that at all the sections (containing stress concentration site) the primary + secondary stress range is less than or equal to  $3 S_m$ . The ASME code procedure assumes that mean stress would relax immediately, if the alternating exceeds the yield stress. However, in case of pressurized components, due to inter-

nal pressure, there is a sustained mean stress which does not relax. Further the ASME code usages the Ratchet-interaction or Bree diagram for identification of various regions such as Elastic, Elastic Shakedown, Plastic Cycling/Plastic Shakedown and Ratcheting regions. It has given a Simplified Elastic Plastic Analysis procedure (Plastification factor  $K_e$ ) for fatigue assessment in the plastic cycling/plastic shake down region. However, in condition of loading combinations falling in ratcheting region, the procedures for synergistic fatigue-ratcheting evaluations are not available in literature.

In view of this, efforts have been made to develop/modify the strain-life equation to account the effect of fatigue-ratcheting synergy on the fatigue life of the pressurized components. In past, many researchers, such as Morrow, Manson and Halford [43] etc, have modified the Basquin Coffin-Manson equation equation to account the effect of mean stress. However, in case of fatigue-ratcheting interaction, accumulated ratcheting strain exhausts the ductility and so reduces fatigue life. The synergistic damage process, leads to earlier crack initiation and subsequent crack growth. Therefore, based on understanding from the uniaxial two step ratcheting fatigue tests, the ratcheting strain was deducted from fatigue ductility coefficient of the Manson and Halford's strain life equation. Thus, the final proposed strain-life equation for fatigue-ratcheting synergy become as

$$\frac{\Delta \varepsilon}{2} = \frac{(\sigma'_f - \sigma'_m)}{E} (2N)^b + (\varepsilon'_f - \varepsilon'_r) \left( \frac{\sigma'_f - \sigma'_m}{\sigma'_f} \right)^{\frac{c}{b}} (2N)^c \quad (29)$$

The Basquin Coffin-Manson equation constants have been evaluated from classical LCF test for SA333 Gr.6 material, as per ASTM standard and these are given as follows:

Elastic modulus  $E = 200$  GPa,

Fatigue strength coefficient

$$\sigma'_f = 586.06 \text{ MPa,}$$

Exponents  $b = -0.0757$ ,  $c = -0.4814$ ,

Fatigue ductility coefficient  $\varepsilon'_f = 0.2406$ ,

Crack initiation calculations have been carried out for ERT2, ERT4, ERT5, ERT6 and ERT8. For these calculations stress/strain data is taken from finite element analysis, with monotonic stress-strain curve with multi-linear kinematic hardening rule, of the respective tests. Comparison of fatigue-life prediction using different strain-life equations against the test observed crack initiation and final rupture is shown in Fig. 37.

From the above study, it is clear that the classical low cycle fatigue procedure over predicts the number of cycles to crack initiation even more than final rupture, thus, it leads to un-conservative assessment. However, proposed strain-life equation, which accounts for ratcheting strain and non-relaxing mean stress, leads to conservative prediction of fatigue life with in a factor of 2. Thus, in situations of dominating fatigue-ratcheting synergy, the proposed strain-life equation

leads to much more reasonable prediction of fatigue-life.

## 8. Z FACTOR FOR CRACKED ELBOWS

The Z-factor approach involves highly simplified procedure and provides quick ductile fracture assessment of power plant components. This approach yields conservative results as compared to usual J-Tearing approach. The use of Z-factor approach is suggested in ASME B&PV Code Sec. XI [44, 45], for straight pipes. Its usage involves determination of Limit Moment. The Unstable Tearing Moment (or Unstable Ductile Fracture Moment) can be simply determined by dividing the Limit Moment (based on flow stress) by corresponding Z-factor. In ASME B&PV Code Sec. XI, although Z-factors are intended for part through wall crack, however, they are evaluated assuming through wall crack. Hence, the basic assumption is that for a given configuration the ratio of Ductile Tearing Moment to Limit Moment is constant irrespective of whether crack is part through thickness or through wall thickness. ASME Section XI has provided empirical equations to evaluate Z-factors for straight pipes.

The basic philosophy behind evaluation of Z-factors for straight pipes, with circumferential crack, has been discussed in EPRI report, [45], for carbon/ferritic steels. Based on similar philosophy, the Z-factors have been derived for elbow having through wall crack in circumfe-

rential orientation at extrados and axial orientations at crown as shown in figure 38. In EPRI report, an estimation scheme has been used to calculate the Crack Driving force ( $J_{app}$  or  $J$ ) & Tearing Modulus ( $T_{app}$  or  $T$ ) values. However, for the axially or circumferentially cracked elbows, this scheme cannot be used readily. Hence, R-6 method was used to derive the Z-factor for elbows. Before applying the R-6 method to elbows, it was used for determination of Z-factors for straight pipes with circumferential cracks. The aim was to assess the difference between Z-factors as determined using R-6 method and Z-factors as given in ASME Sec XI, which are based on GE/EPRI Estimation Scheme [46]. Finally, modifying factors have been arrived, which when multiplied to pipe Z-factor will yield Z-factors for corresponding elbows.

### 8.1 Procedure for Evaluation of Z-factor

As described in EPRI report [45], the Z factor provides conservative assessment of through wall cracked pipes against the unstable tearing and plastic collapse failures. Its evaluation procedure is demonstrated in figure 39. Here the unstable tearing load  $M_u$  is evaluated for a pipe with various size of cracks ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ) using J-tearing modulus method. Also for each crack size, the plastic collapse load  $M_o$  is evaluated for the considered pipe. The ratio of  $M_u$  to  $M_o$  is then plotted against the crack size and the reciprocal

of the minima of  $M_u/M_o$  is termed as Z-factor for that pipe size and material. It is noted here that Z-factor becomes independent of the crack size and takes care of both unstable tearing and plastic collapse mode of failure. The whole set of calculations can be repeated for different pipe sizes & different materials to develop equation of Z-factor as function of Pipe size and material properties.

In ASME, the Z-factor versus Nominal Pipe Size (NPS) data has been fitted in the form of empirical equations. ASME has given the equations broadly into two categories, namely category-I, for base metal and category-II for weld metal. In deriving the material independent ASME Z-factor equations for carbon steel, representing tensile and fracture properties of material such as stress strain curve, yield stress,  $J_{IC}$ , J-Resistance (J-R) curve, J-Tearing curves (J-T curve) etc. have been taken and are reported in EPRI report, [45]. Finally, ASME Sec. XI, has given the pipe Z-factor, in the form of following equations:

$$\text{Material Category I : } Z = 1.20 \times [1 + 0.021(NPS - 4).A] \quad (30a)$$

$$\text{Material Category II : } Z = 1.35 \times [1 + 0.0184(NPS - 4).A] \quad (30b)$$

Where, NPS is Nominal Pipe Size, in inches, and A is a function of pipe mean radius to thickness ratio ( $R/t$ ), [44].

### 8.2 Z-factor evaluations for Pipes and Elbows

The ASME Z-factor data and empiri-



cal equations, for straight pipes, were derived [45] using GE/EPRI fracture estimation scheme. The equation 31, gives the simplified definition [47] of J-integral used in GE/EPRI. Here the coefficient  $\phi$  is the crack tip plasticity correction and generally is less than one.

$$J = \left[ 1 + \phi \alpha \left( \frac{M}{M_o} \right)^{n-1} \right] J_e \quad (31)$$

In above equation,  $J_e$  elastic part of applied J-integral and  $M_o$  is Limit Moment based on reference stress, which is taken as equal to yield stress here. The  $J_e$  can be expressed as  $K^2/E$ , where  $K$  is Stress Intensity Factor (SIF). The expressions for  $K$  or  $J_e$  and  $M_o$  are easily available. Due to unavailability of  $\phi$  coefficients for Power Plant Piping components such as elbows, nozzles, tee-junctions etc., the above scheme cannot be used. Therefore, to calculate Z-factors for elbows, it was decided to use R-6 option-2 method which takes into account the actual stress strain curve and the  $\phi$  is taken equal to one. Therefore, option-2 R-6 method, in general, leads to overestimation of applied J and hence underestimation of unstable tearing loads ( $M_u$ ). Before application of R-6 method to elbows, it was first applied to, straight pipes with circumferential through wall crack. Then the calculations were performed for 16 different pipe sizes ranging from 6" Sch.40 to 24" Sch. 120 and for material belonging to category I and category II given in [45]. For both category of

material, the Z-factor was evaluated for two cases. In first case the R-6 option-2 based J-integral that is equation 31 with  $\phi = 1.0$  is used and in second case the J-equation with  $\phi$  coefficient equation proposed by [46] has been used. The results for both the cases are shown in Table 1 for category I material. The results show that Z-factor evaluated using condition B are quite close to ASME values. The average error is ~ 5%. The Z-factors calculated using R-6 method ( $\phi = 1.0$ ) are also reasonably close to ASME values. The average error is ~ 10%. Most of the values are on higher side, since standard R-6 method generally over-predicts the applied J values. Moreover, the proposed methodology is simple and quick since it requires very little computational effort. Similar conclusions were true for category-II materials also. This was done in order to assess the difference between Z-factors using R-6 method and Z-factors given in ASME Sec XI. After validation the R-6 method based Z-factor evaluation on pipes, the method was extended to 90° Long Radius Elbows with circumferential crack at extrados and axial crack at crown, Fig. 38.

In view of the reasonably comparison, the standard R-6 method ( $\phi=1$ ) is used for evaluation of Z-factors of Elbows. It was assumed that, internal pressure is absent, material for Elbow is same as that of Pipe material hence, same material properties are used and Elbows are seamless hence, Z-factors were evaluated

only for only Category I material. The axial and circumferential crack orientations are shown in Fig. 2. For both these crack orientations the expressions for  $J_e$  and limit moment  $M_o$  were taken from Ductile Fracture Handbook, [46]. The Z-factors for elbows were evaluated, using the procedure described earlier for straight pipes. The values, of Z-factor, are given in Table 12. It is observed, that Z- factor value are less than those of corresponding Straight Pipes

### 8.3 Development of Z-factor equation for Elbows

The elbow Z-factors evaluated above were normalized with the corresponding pipe Z-factors evaluated using standard R-6 method and the ratio were termed as Modifying Factors (MF). Further the MF for the elbow have been derived [48], using standard R-6 method and assuming elastic contribution to crack driving force is negligible as compared to plastic contribution. The equations were solved analytically, in terms of ratio of Elbow to Pipe expressions. The MF when multiplied to Pipe Z-factors will yield the Z-factor for the corresponding Elbows. As a result, the MF, for each crack configuration was obtained in the following form :

$$MF_c = [2\lambda]^{4/3(n+1)} ;$$

MF for circumferential crack at extrados

$$MF_a = [\lambda/8]^{4/3(n+1)} [R_o/t]^{1.18/(n+1)} ;$$

MF for axial crack at crown

Where,  $\lambda = 3t/R$ ;  $R_o$  = Outer Radius;

t = Pipe Thickness; R = Mean Radius.

Therefore, the Z-factor for Elbows with Circumferential crack at extrados is equal to 'MF<sub>c</sub> × Pipe Z-factor' and Z-factor for Elbows with axial Crack at Crown is equal to 'MF<sub>a</sub> × Pipe Z-factor'. The approximations involved in deriving these multiplying factors are not likely to cause large errors. It may be noted that these factors have been derived using standard R-6 method where  $\phi$  factor is taken as 1.0 and hence  $J_{app}$  values are slightly overestimated. Since, multiplying factors have been derived from ratios, hence effect of considering the actual value of  $\phi$  may not be significant. The figure 40 plots the Z-factors for Elbows, as given in Table1, against Z-factors as evaluated by using proposed MF with pipe Z-factors. The figure shows the MF evaluated Z-factor of elbows are in good agreement with those evaluated by detailed J-tearing calculation.

## 9. CONCLUSIONS

A comprehensive component integrity test program was initiated in BARC, India to address various issues related to the improved integrity assessment of the nuclear power plants. Both theoretical and experimental program was pursued. The salient conclusions of the work are as follows:

1. Large number of fracture tests have been carried out on full scale pipes and elbows under monotonic and cyclic loading.
2. New closed-form solutions of limit mo-

ments of pipe bend have been proposed. The theoretical predictions of these formulas matched very closely with the test data.

3. The importance of stress triaxiality has been investigated in the transfer of J-R curve from specimen to component. It has been shown that geometries having identical constraint exhibits identical fracture properties.

4. A new mathematical formulation has been proposed on mesh-independent non-local damage mechanics modeling of ductile fracture process.

5. It is shown that the current LBB assessment procedure is too conservative. There may be large inherent factor of safety due to system indeterminacy and, thus, the possibility of double-ended-guillotine-break (DEGB) may be remote in typical nuclear piping systems.

6. A rigorous mathematical formulation was worked out for the newly proposed Modified Upper Bound (MUB) approach of limit analysis. The proposed method was successfully used to obtain new limit load formulations for similar and dissimilar welded specimens.

7. Based on cyclic ductile tearing investigations, the Cyclic Tearing Failure Assessment Diagram (CTFAD) was developed and "Additional Safety Margins" were evaluated to account the cyclic tearing damage. A Modified LBB design rule has been recommended for LBB qualification of PHT piping of NPPs during earthquake loading.

8. The present fatigue investigations on pressurized elbows show that the current ASME design rule provides adequate safety margin. However, further relaxation in stress limits has to be adopted cautiously. The crack initiation study shows that the proposed strain life equation gives reasonable prediction of number of cycles for crack initiation.

9. New Z-factors have been proposed to evaluate the unstable ductile tearing load of cracked pipe bends through limit load approach. The results indicate that Z-factor for Elbow is always less than those of corresponding straight pipe.

## References

1. Kordisch, H., Sommer, E. and Schmitt, W., The influence of triaxiality on stable crack growth, Nuclear Engineering and Design, 1989, Vol. 112.
2. Faleskog, J., Effects of local constraint along three-dimensional crack fronts: a numerical and experimental investigation, Journal of Mechanics of Physics and Solids 1995; 43:447-493.
3. Joyce, J. A., Link, R.E., Application of two parameter elastic-plastic fracture mechanics to analysis of structures, Engineering fracture mechanics, 1997; 57(4): 431-446
4. Schuler, X., Blind, D., Eisle, U., Herter, K. H., Stoppler, W., Fracture mechanics evaluation of cracked components with consideration of multiaxiality of stress state, Nuclear Engineering and Design, 1994, 151:291-305.
5. Chattopadhyay, J., Dutta, B.K., Kushwaha, H.S., Experimental and Analytical study of TPB speci-

men and throughwall circumferentially cracked straight pipe, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2000; 77 : 455-471.

6.

Chattopadhyay, J., Pavankumar, T.V., Dutta, B.K., Kushwaha, H.S., "Fracture experiments on throughwall cracked elbows under in-plane bending moment: Test results and theoretical/numerical analyses", *Engg. Fracture Mechanics*, 72, 2005, pp 1461 – 1497

7.

Tarafder, S., Sivaprasad, S., Tarafder, M., Prasad, P., Ranganath, V.R. and Swapan Das, Specimen Size and Constraint Effects on J-R curves of SA 333 Gr.6 Steel, Technical report, National Metallurgical Laboratory, Jamshedpur, India, 2000.

8.

Kanninen, M.F., Zahoor, A., Wilkowski, G.M., Abousayed, I., Marschall, C., Broek, D., Sampath, S., Rhee, H. and Ahmad, J., "Instability Predictions for Circumferentially Cracked Type 304 Stainless Steel Pipes Under Dynamic Loading", EPRI-NP-2347, Vol. 1 & 2, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1982

9.

Miller, A.G., 1988, "Review of Limit Loads of Structures Containing Defects", *Int. J. of Pres. Ves. and Piping*, 32, pp 197 – 327.

10.

Zahoor, A., 1989-1991, "Ductile Fracture Handbook", Vol.1-3, EPRI-NP-6301-D, N14-1, Research Project 1757-69, Electric Power Research Institute.

11.

Chattopadhyay, J., Tomar, A.K.S., Dutta, B.K., Kushwaha, H.S., "Closed form collapse moment equation of throughwall circumferentially cracked elbows subjected to in-plane bending moment", *Journal of Pressure Vessel Technology*, ASME Transactions, 126, 2004, pp 307 – 317

12.

Chattopadhyay, J., Tomar, A.K.S., Dutta, B.K., Kushwaha, H.S., "Limit load of throughwall cracked

elbows: Comparison of test results with theoretical predictions", *Fatigue and Fracture of Engg. Materials And Structures*, 27, 2004, pp 1091 – 1103

13.

Yahiaoui, K., Moreton, D.N., Moffat, D.G., "Evaluation of limit load data for cracked pipe bends under opening bending and comparisons with existing solutions", *Int. J. of Pres. Ves. and Piping*, 79, 2002, pp 27 – 36.

14.

Pavankumar, T.V., Chattopadhyay, J., Dutta, B.K. and Kushwaha, H.S., "Transferability of specimen J-R curve to straight pipe with through wall circumferential flaw", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.79, 2002, pp 127 – 134

15.

Pavankumar, T.V., Chattopadhyay, J., Dutta, B.K. and Kushwaha, H.S., "Role of stress triaxiality (q) in assessing fracture behavior of cracked components", 29th MPA Seminar, Oct. 9 & 10, MPA, University of Stuttgart, Germany, 2003

16.

Kopenhoefer, K., Gullerud, A.S., Ruggieri, C., Dodds, R.H., Jr., WARP3D-RELEASE 10.8, 'Dynamic nonlinear analysis of solids using a preconditioned conjugate gradient software architecture', User's manual, University of Illinois, Urbana, Illinois, USA, 1998.

17.

Eisele, U., Herter, K.H. and Schuler X., 'Influence of the multiaxiality of stress state on the ductile fracture behaviour of degraded piping components', ECF 10, Structural Integrity: Experiments, Models and Applications, Vol.1, Ed. Schwalbe, K.H. and Berger, C., 1-10, 1994

18.

Clausmeyer, H., Kussmaul, K. and Roos, E., 'Influence of stress state on the failure behavior of cracked components made of steel' *ASME, Applied Mechanics Rev.*, 44, no.2, 1991, pp77-92

19.

Chattopadhyay, J., Dutta, B.K., and Kushwaha, H.S., "New ' $\eta_{pl}$ ' and ' $\gamma$ ' functions to evaluate J-R

curves from cracked pipes and elbows: Part I – Theoretical derivation”, Engineering Fracture Mechanics, 71, Issue no.18, 2004, pp 2635 – 2660  
20.

Chattopadhyay, J., Dutta, B.K., and .Kushwaha, H.S., “New ‘ $\eta_{pl}$ ’ and ‘ $\gamma$ ’ functions to evaluate J-R curves from cracked pipes and elbows: Part II – Experimental and numerical validation”, Engineering Fracture Mechanics, 71, Issue no.18, 2004, pp 2661 – 2675.  
21.

A.L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part-I: Yield criteria and flow rules for porous ductile media, Trans. ASME J. Eng. Mater. Technol. 99 (1977) 2-15.G.  
22.

Rousselier, Ductile fracture models and their potential in local approach of fracture, Nucl. Eng. Des. 105 (1987) 97-111.  
23.

F. Reusch, B. Svendsen, D. Klingbeil, A non-local extension of Gurson-based ductile damage modelling, Comput. Mater. Sci. 26 (2003) 219-229.  
24.

M.K. Samal, Nonlocal damage models for structural integrity analysis. Doctoral dissertation, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, Universität Stuttgart, Germany (2007).  
25.

M.K. Samal, M. Seidenfuss, E. Roos, B.K. Dutta, H.S. Kushwaha, Finite element formulation of a new nonlocal damage model, Fin. Elem. Anal. Des. 44 (2008) 358-371 .  
26.

F.M. Beremin, A local criterion for cleavage fracture of a nuclear pressure vessel steel, Metall. Trans. A, 14A (1983) 2277-2287.  
27.

H.P. Seebich, Doctoral Dissertation, Institut für Materialprüfung Werkstoffkunde und Festigkeitslehre, Universität Stuttgart, Germany (2007).  
28.

I.A. Khan, V. Bhasin, K.K. Vaze, A.K. Ghosh and H.S. Kushwaha, Significance of finite compliance of a cracked piping system on fracture integrity assessment, ASME Pressure Vessel and Piping Conference, PVP-2005, Colorado, U.S.A.  
29.

I.A. Khan, V. Bhasin, K.K. Vaze, A.K. Ghosh and H.S. Kushwaha, Fracture mechanics evaluation of similar and dissimilar welded fracture specimens under plane-strain, 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Espoo, Finland, August 9-14, 2009.  
30.

Report of the U.S. Nuclear Regulatory Commission Piping Review Committee, 1984 „Evaluation of Postulated Pipe Breaks“, NUREG-1061, Vol. 3, Prepared by the Pipe Break Task Group  
31.

International Atomic Energy Agency, 1993, „Applicability of the Leak Before Break Concept“, IAEA-TECDOC 710, Report of IAEA extra budgetary program on the safety of WWER-440 Model-230 Nuclear Power Plants.  
32.

International Atomic Energy Agency, 1994, „Guidance for the Application of the Leak Before Break Concept“, IAEA-TECDOC 774, Report of IAEA extra budgetary program on the safety of WWER-440 Model-230 Nuclear Power Plants.  
33.

Miura, N., Fujioka, T., Kashima, K., Kanno, S., Hayashi, M., Ishiwata, M., and Gotohm, N., 1994, “Low Cycle Fatigue and Ductile Fracture for Japanese Carbon Steel under Dynamic Loading” Nuclear Engineering and Design, vol-153, pp. 57-69.  
34.

S. Rahman, G. Wilkowski and R. Mohan, 1997 “ Low cycle fatigue crack growth considerations in pipe fracture analyses”, Nuclear Engineering and Design, vol-168, pp. 105-118  
35.

Chang-Sung Seok, K. L. Murthy, “ A study on the decrease of fracture resistance curve under

reversed cyclic loading", IJPVP, vol.-77, pg. 303-311, 2000

36.

Suneel K. Gupta, Vivek Bhasin, K. K. Vaze, A.K. Ghosh, H. S. Kushwaha "Experimental Investigations on Effects of Simulated Seismic Loading on LBB Assessment of High Energy Piping ", ASME-Journal of Pressure Vessel and Technology, Vol.-129, February 2007

37.

Suneel K. Gupta, V. Bhasin, J. Chattopadhaya, K. K. Vaze, A.K. Ghosh, H. S. Kushwaha, "Cyclic Tearing of Through Wall Cracked Pipes made of Carbon Steel", 20th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 20), Division-II, Paper 1861 Espoo, Finland, August 9-14, 2009

38.

Ohno, N., Kachi, Y., 1986. A constitutive model of cyclic plasticity for nonlinear hardening materials. J. Appl. Mech. Vol. 53. P. 395–403.

39.

Chaboche, J. L., 1991. On some modifications of kinematic hardening to improve the description of ratcheting effects. Int. J. Plasticity. Vol. 7. P. 661–678.

40.

Hassan, T., Kyriakides, S., 1992. Ratcheting in cyclic plasticity, Part I: uniaxial behavior. Int. J. Plasticity. Vol. 8. P. 91–116.

41.

Yahiaoui, K., Moffat, D. G. and Moreton, D. N. 1996. Pressurised piping elbows under simulated seismic bending: design code implications. Proc. Instn Mech Engrs. Vol-210.

42.

Touble, F., Baly, N. and Lacire, M. H. 1999. Experimental, Analytical and regulatory evaluation of seismic behaviour of piping system. ASME J. Pressure Vessel Technology. Vol. 121. P. 388-392.

43.

Manson, S. S. and Halford, G. R. 1981. Practical implementation of the double linear damage rule

and damage curve approach for treating cumulative damage. Int. Jour. Fract. Vol. 17. P. 169-172.

44.

"ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section XI, Appendix H", American Society of Mechanical Engineers.

45.

"Evaluation of Flaws in Ferritic Piping" Report No. EPRI NP-6045, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1988.

46.

Zahoor, A., "Ductile Fracture Handbook, Volume I : Circumferential Through Wall Cracks", Report No. EPRI NP-6301-D, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1989.

47.

Suneel K. Gupta, V.Bhasin, K. K. Vaze, H. S. Kushawaha, "Development of an Engineering Approach for Ductile Fracture Assessment of Straight Pipes" ASME PVP-Vol 410-1, pp.171-182, Assessment Methodologies for Preventing Failure: Deterministic and Probabilistic Aspects and Weld Residual Stresses Volume 1, ASME PVP-2000 Conference, Seattle, USA, 2000

48.

Suneel K. Gupta, V.Bhasin, K. K. Vaze, H. S. Kushawaha, "Ductile Fracture Assessment of Cracked Elbows using ASME Z-Factor Approach", ASME PVP-Vol 410-1, pp.137-149, Assessment Methodologies for Preventing Failure: Deterministic and Probabilistic Aspects and Weld Residual Stresses Volume 1, ASME PVP-2000 Conference, Seattle, USA, 2000



Table 1 Details of pipe test specimens

Specimen No.	Outer diameter (mm)	Thickness (mm)	Span (mm)		Crack angle, $2\theta$ (°)	
			Outer	Inner	As-machined	After fatigue precrack
SPBMTWC8-1	219	15.15	4000	1480	60	65.6
SPBMTWC8-2	219	15.10	4000	1480	90	93.9
SPBMTWC8-3	219	15.29	4000	1480	120	126.4
SPBMTWC8-4	219	15.11	4000	1480	150	157.0
SPBMTWC12-1	324	21.54	5000	1300	62.24	65.61
SPBMTWC12-2	324	21.31	5000	1300	91.94	95.67
SPBMTWC12-3	324	21.85	5000	1480	120.94	125.19
SPBMTWC16-1	406	32.38	5820	1480	90.9	96.0
SPBMTWC16-2	406	32.15	5820	1480	121.4	126.3
SPBMTWC16-3	406	32.36	5820	1480	153.0	157.8

Table 2 Details of elbow test specimens

Test no.	Rb (mm)	OD (mm)	$t_{av}$ (mm)	Moment arm length (mm) (Fig. 2 )	Crack orientation	Crack location	Bending mode	Crack angle after fatigue precrack ( $2\theta$ )
ELTWIN8-1	207	219	19.1	825.72	Circumferential	Intrados	Opening	94.96°
ELTWIN8-2	207	219	18.8	825.72	Circumferential	Intrados	Opening	125.16°
ELTWEX8-4	207	219	19.3	825.72	Circumferential	Extrados	Closing	98.24°
ELTWCR8-6	207	219	19.0	825.72	Axial	Crown	Closing	$2a = 109.2$ mm
ELTWIN16-1	609	406	36.4	840.22	Circumferential	Intrados	Opening	95.89°
ELTWIN16-2	609	406	36.8	840.22	Circumferential	Intrados	Opening	122.79°
ELTWEX16-3	609	406	35.1	840.22	Circumferential	Extrados	Closing	64.85°
ELTWEX16-4	609	406	35.7	840.22	Circumferential	Extrados	Closing	94.11°
ELTWEX16-5	609	406	37.6	840.22	Circumferential	Extrados	Closing	124.0°
ELTWCR16-6	609	406	36.2	840.22	Axial	Crown	Opening	$2a = 210$ mm

OD-Outer Diameter,  $t_{av}$ -average wall thickness, Rb-Mean Bend Radius

Table 3 Mechanical properties of SA 333 Gr 6 steel at room temperature

	200 mm NB pipe/el-bow material	300 mm NB pipe/el-bow material	400 mm NB pipe/elbow material
Yield stress, $\sigma_y$	288 MPa	340 MPa	312 MPa
Ultimate tensile stress, $\sigma_u$	420 MPa	485 MPa	459 MPa
Young's modulus of elasticity, E	203 GPa	203 GPa	203 GPa
Percentage elongation	36.2	27.6	39.1
Percentage reduction in area	76.64	76.96	76.15
Poisson's ratio,	0.3	0.3	0.3
Initiation toughness, $(J)_{szw}$	220 N/mm	-	236 N/mm

Table 4 Experimental crack initiation, TES collapse and maximum loads/moments

Test ref. no	Crack initiation		TES collapse		Maximum		Crack growth at max. load (mm)
	Load (kN)	Moment (kN-m)	Load (kN)	Moment (kN-m)	Load (kN)	Moment (kN-m)	
SPBMTWC8-1	194	122.22	240.6	151.58	245.7	154.79	7.4
SPBMTWC8-2	148	93.24	192.6	121.34	197.2	124.24	8.8
SPBMTWC8-3	126	79.38	138.2	87.07	141.8	89.334	7.4
SPBMTWC12-1	578.2	534.84	602	556.85	625.4	578.5	16.2
SPBMTWC12-2	438.6	405.71	463.3	428.55	475.2	439.56	19.6
SPBMTWC12-3	-	-	388.9	342.232	392.9	345.752	-
SPBMTWC16-1	523	567.5	684.83	743.04	742.9	806.04	20.9
SPBMTWC16-2	395	428.6	550.31	597.08	578.08	627.22	19.3
SPBMTWC16-3	286	310.31	375.8	407.7	396.2	429.9	14.7
ELTWIN8-1	112	92.48	119.2	98.4	154	127.2	8.9
ELTWIN8-2	92	75.97	96.9	80	125	103.2	10.5
ELTWEX8-4	125	103.2	131.6	108.7	136	112.3	2.0
ELTWC8-6	No initiation		142	117.2	142	117.2	Nil
ELTWIN16-1	665.1	558.83	1020	857	1130	949.4	24.0
ELTWIN16-2	601.6	505.5	832	699.1	943	792.3	25.0
ELTWEX16-3	1360.4	1143	1382	1161.2	1387	1165.4	0.6
ELTWEX16-4	995.5	836.4	1173	985.6	1275	1071.3	10.6
ELTWEX16-5	742.5	623.9	943	792.3	976	820.1	7.5
ELTWC16-6	No initiation		> Test range		1403*	1178.8*	-

\*Test discontinued at almost elastic range

Table 5 Comparison of maximum experimental moments with theoretical predictions (numbers in the bracket show the percentage difference)

Test no.	$\frac{(M_{max, \text{expt}})}{4R^2 t \sigma_f}$	$\frac{(M_{i, \text{En(1)}})}{4R^2 t \sigma_f}$
SPBMTWC8-1	0.6965	0.688 (+1.22)
SPBMTWC8-2	0.559	0.552 (+1.25)
SPBMTWC8-3	0.3977	0.405 (-1.83)
SPBMTWC8-4	0.2702	0.284 (-5.11)
SPBMTWC12-1	0.7145	0.688 (+3.7)
SPBMTWC12-2	0.5429	0.543 (-0.02)
SPBMTWC12-3	0.4270	0.415 (+2.8)
SPBMTWC16-1	0.4626	0.542 (-17.2)
SPBMTWC16-2	0.3622	0.406 (-12.1)
SPBMTWC16-3	0.2468	0.281 (-14.0)

\* % difference = [(expt. - predicted) / expt.] × 100%

Table 6 Equations of weakening factor (X) for TCC elbows under closing mode  
 $A_0$ ,  $A_1$  and  $A_2$  values for function  $X = A_0 + A_1 \cdot (\theta/\pi) + A_2 \cdot (\theta/\pi)^2$

R/t	$A_0$	$A_1$	$A_2$	$\theta$
5	1.1194	-0.7236	-2.0806	for $45^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ and $X=1$ for $2\theta < 45^\circ$
7.5	1.1185	-0.3420	-2.5200	for $60^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ and $X=1$ for $2\theta < 60^\circ$
10	0.9655	1.0152	-4.6800	for $60^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ and $X=1$ for $2\theta < 60^\circ$
15	1.1400	0.3000	-3.6000	for $90^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ and $X=1$ for $2\theta < 90^\circ$
20	0.6400	3.4200	-7.9200	for $90^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ and $X=1$ for $2\theta < 90^\circ$

Table 7 Comparison of experimental collapse moments with theoretical predictions  
 (The bracketed numbers indicate the percentage difference with respect to experimental values)

Test no.	Expt. TES collapse moment (kN-m)	Predicted Collapse moment (kN-m)		
		Chattopadhyay et al [11,12], Eqs.(6-9)	Miller [8], Eqs.(2-3)	Zahoor [10], Eqs.(3-5)
ELTWIN8-1	98.4	101.1 (-2.7%)*	82.3 (16.4%)	112.8 (-14.6%)
ELTWIN8-2	80.0	76.0 (5%)	63.6 (20.5%)	92.65 (-15.8%)
ELTWEX8-4	108.7	100.2 (7.8%)	82 (24.6%)	113.2 (-4.1%)
ELTWCR8-6	117.2	-	-	129.5 (-10.5%)
ELTWIN16-1	857.0	847.1 (1.2%)	807.9 (5.7%)	1109.6 (-29.5%)
ELTWIN16-2	699.1	678.8 (2.9%)	669.2 (4.3%)	971.8 (-39%)
ELTWEX16-3	1161.2	1092.3 (5.9%)	923.4 (20.5%)	1153.6 (0.7%)
ELTWEX16-4	985.6	962.1 (2.4%)	792.5 (19.6%)	1083.3 (-9.9%)
ELTWEX16-5	792.3	819.4 (-3.4%)	682.8 (13.8%)	993.1 (-25.3%)
ELTWCR16-6	> test range	-	-	-

\* % difference = [(expt. - predicted) / expt.]  $\times$  100%

Table 8 Comparison of crack initiation load

Component	Test no.	Crack initiation load (kN)		% difference (Eq.(5))
		Expt.	Predicted by FEM	
Throughwall cracked pipe	SPBMTWC8-1	194	195	-0.5
	SPBMTWC8-2	148	150	-1.3
	SPBMTWC8-3	116	114	1.7
	SPBMTWC16-1	523	550	-5.2
	SPBMTWC16-2	395	422	-6.8
	SPBMTWC16-3	286	297	-3.8
Throughwall cracked elbow	ELTWIN8-1	112	104	7.1
	ELTWIN8-2	92	70	23.9
	ELTWEX8-4	125	134	-7.2
	ELTWIN16-1	665.1	621	6.6
	ELTWIN16-2	601.6	474	21.2
	ELTWEX16-3	1360.4	1249	8.2
	ELTWEX16-4	995.5	989	0.6
ELTWEX16-5	742.5	770	3.7	

Table 9 Details of laboratory fracture specimens

Test no.	Type of specimen	Source	Thickness, B (mm)	Thickness after sidegrooving, (BN) (mm)	Width (W) (mm)	a/w
T08-5B	SE(B)	200 mm NB pipe	8.06	7.00	25.06	0.513
JUBHCT1	CT	300 mm NB pipe	12.45	No side groove	25.20	0.516
T12-5C	SE(B)	400 mm NB pipe	12.64	10.14	25.08	0.43

Table 10 Comparison of predicted maximum loads with experiments

Test no.	Experiment	Prediction using Reference J-R curve	% difference
SPBMTWC8-1	245.7	244.48	0.5*
SPBMTWC8-2	197.2	197.97	-0.39
SPBMTWC8-3	141.8	150.44	-6.09
SPBMTWC12-1	625.50	617.54	1.27
SPBMTWC12-2	475.20	499.69	-5.15
SPBMTWC12-3	392.89	405.6	-3.24
ELTWIN8-1	154	159.58	-3.62
ELTWIN8-2	125	115.78	7.4
ELTWEX8-4	136	150.78	-10.8
ELTWIN16-1	1130	1186	-4.9
ELTWIN16-2	943	935	0.9

\* % difference = [(expt. - predicted) / expt.] × 100%

Table 11 Details of the fatigue ratcheting tests conducted on pressurized pipe elbow

Test name	Internal Pressure (MPa)	Bending loading				Number of cycles			Average Ovalization / % Diameter Increase
		Applied LLD mm		Typical Reactions kN		Applied in blocks	Total Till failure	Crack initiation using AET / UT	
		Closing	Opening	Closing	Opening				
ERT1	12	-50	50	-80	88	3	339	--	7
		-55	55	-77	100	39			
	20	-51	79	-83	111	31			
		-50	75	-85	105	129			
	25	-50	75	-87	108.3	137			
ERT2	25	-91	44	-71	85	1	184	--	7
		-81	43	-83	101	5			
		-88	42	-97	115	178			
ERT3	30#	-84	42	-99	114	123	123	--	9
ERT4	30	-110	25	-108	113	94	94	30	10.5
ERT5	30	-61	25	-84.3	69.2	5	282	60	11.3
		-56	25	-85.8	70.4	2			
		-51	25	-82.6	68.7	1			
		-43	25	-85.6	61.3	194			
		-101	30	-109.1	113.1	80			
ERT6	25	-66	65	-145	165	62	62	35	13.1
ERT7	18.5	-50	50	-126	130	87*	87*	55	
ERT8	21.0	29	29	-101	83	675*	675*	210	6.8

Note: \* Failed at weld joint between the elbow and fixed end pipe. # Pressure make up system failed in 70th cycles. In subsequent cycles there was steady pressure drop due to ratcheting and at failure the pressure was 25 MPa. ERT-4 is the repeated with same pressure as in ERT3.

Table 12 Z-factors for straight pipes and elbows of Category II material

Pipe or Elbow No.	Size of Pipe or 90° L.R. Elbow	Z-factor based on ASME equation	Straight Pipe Z-Factor		Elbow Z-Factor using Standard R-6 method [ $\phi=1$ ]	
			Case-1 $\phi = 1$	Case-2 $\phi = \phi_{approx}$	Axial Crack at Crown	Circumferential Crack at Extrados
1	6" Sch 40	1.256	1.442	1.375	1.0316	1.2113
2	6" Sch 80	1.245	1.367	1.280	1.0252	1.3069
3	6" Sch 120	1.241	1.334	1.243	1.0157	1.3827
4	8" Sch 40	1.322	1.550	1.491	1.0835	1.2490
5	8" Sch 80	1.294	1.450	1.364	1.0791	1.3342
6	10" Sch 60	1.385	1.625	1.566	1.1300	1.2969
7	12" Sch 60	1.417	1.625	1.550	1.1677	1.3676
8	16" Sch 80	1.492	1.660	1.573	1.2196	1.4713
9	16" Sch 100	1.472	1.627	1.532	1.2145	1.5405
10	16" Sch 120	1.455	1.602	1.502	1.2079	1.6006
11	20" Sch 80	1.593	1.749	1.662	1.2772	1.5339
12	20" Sch 100	1.564	1.713	1.616	1.2715	1.6137
13	20" Sch 120	1.543	1.685	1.584	1.2650	1.6747
14	24" Sch 80	1.693	1.829	1.742	1.3274	1.5901
15	24" Sch 100	1.656	1.788	1.690	1.3213	1.6791
16	24" Sch 120	1.626	1.756	1.653	1.3139	1.7487

Figure 1 Geometry of pipe specimen

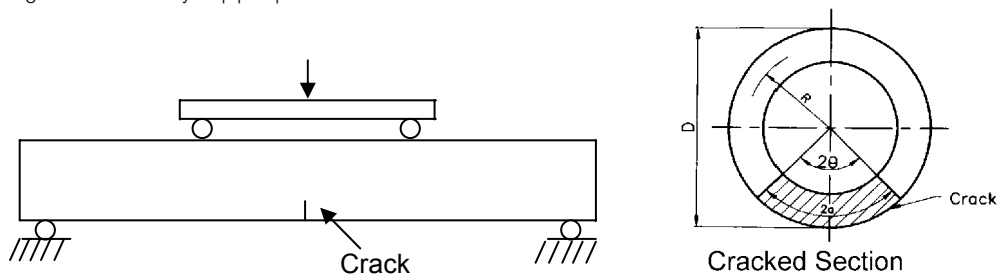


Figure 2 Schematic drawing of elbow test set up

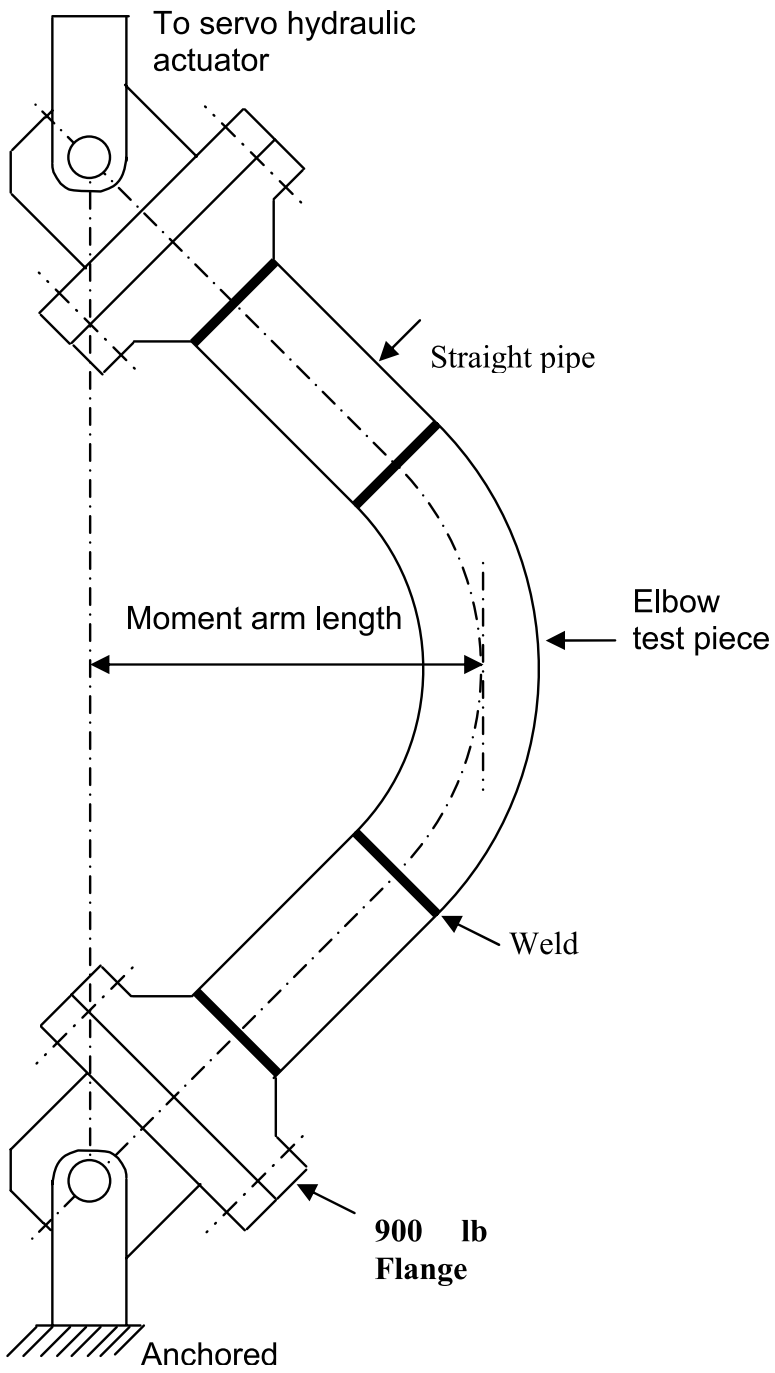




Figure 3 Typical Finite Element Mesh used for cracked elbow

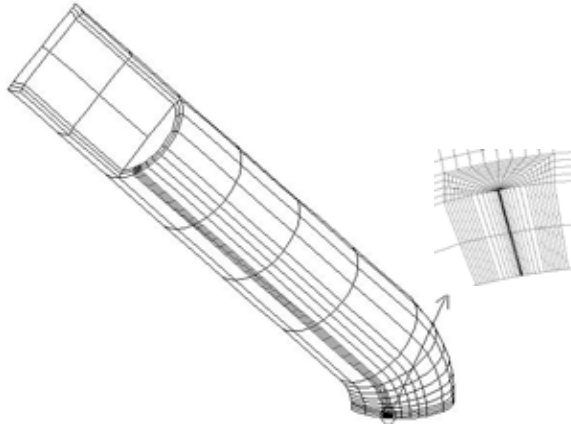


Figure 4 Load-deflection curve for SE(B) specimen

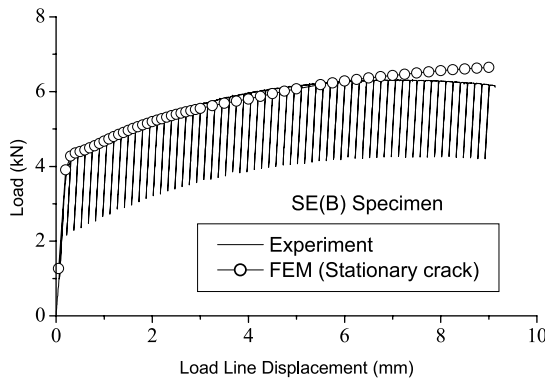


Figure 5 Typical load-deflection curve for a cracked elbow

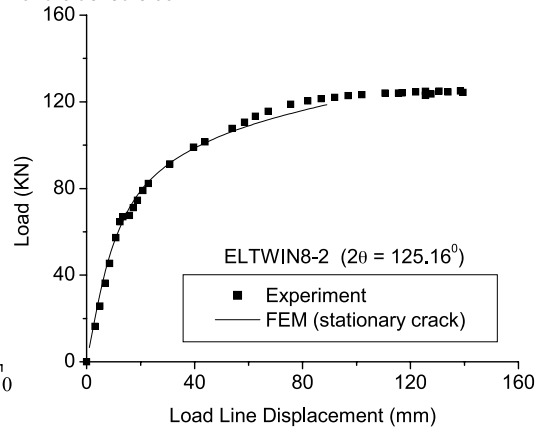


Figure 6 Determination crack initiation load by finite element analysis for 200 mm NB pipes and elbows

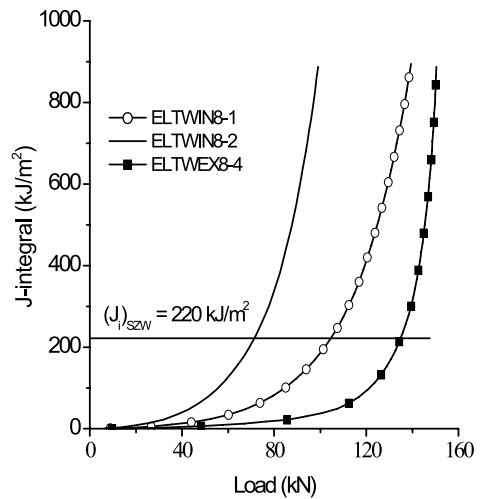
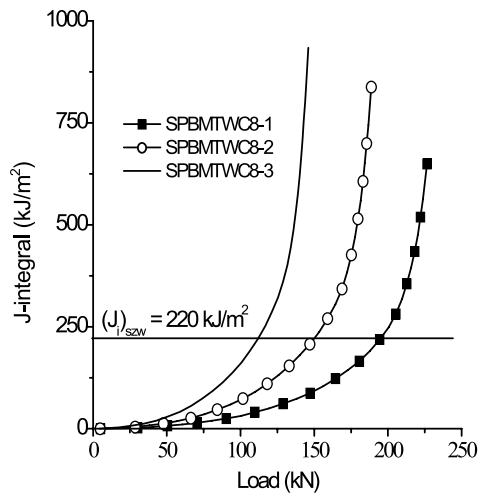


Figure 7 Variation of constraint parameter ( $A_{n,q}$ ) with J-integral for various pipes and elbows

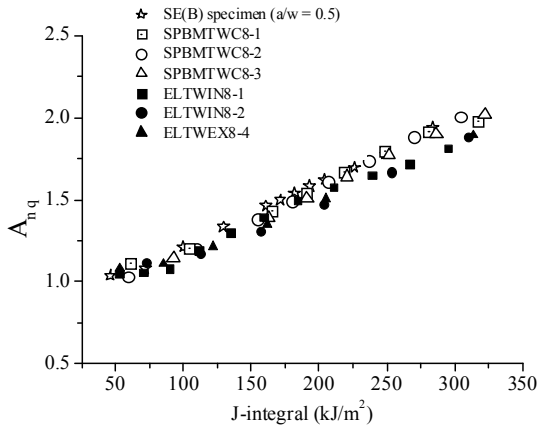


Figure 8 Comparison of J-R curves from side-grooved SE(B) specimen and throughwall circumferentially cracked pipes and elbows

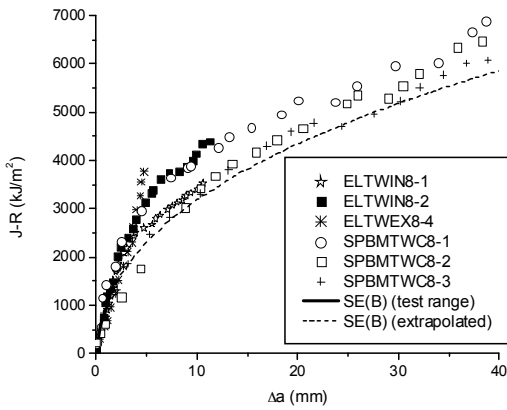


Figure 9 Reference J-R curves used for the analysis

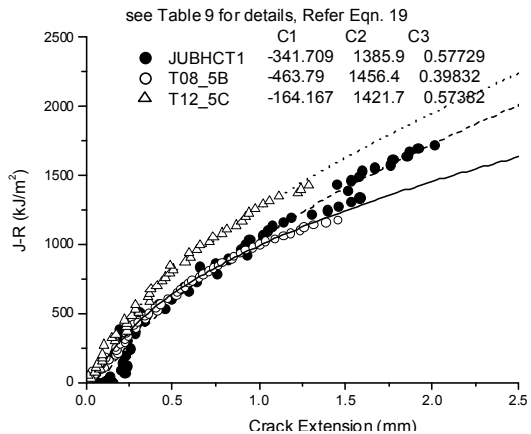


Figure 10 Schematic diagram of numerical methodology to predict load-deformation behaviour of cracked components

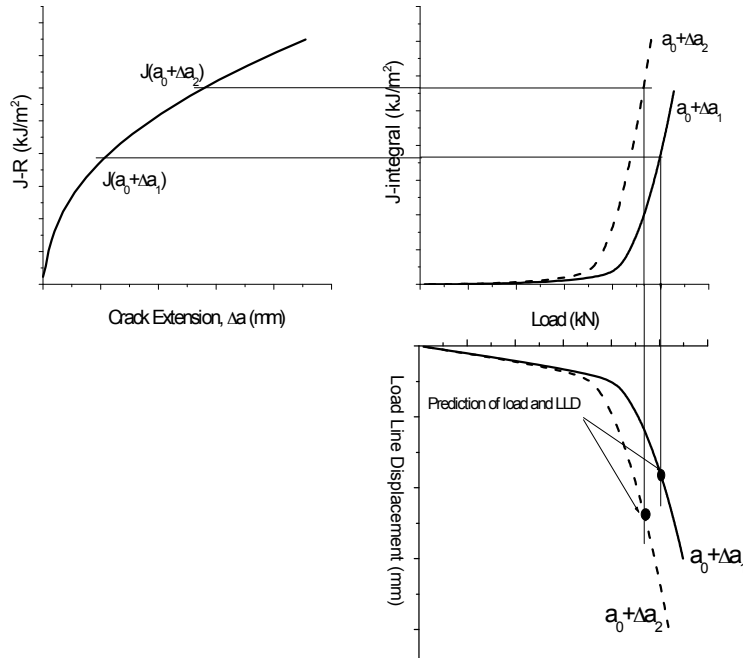


Figure 11 Comparison of load-CMOD for a typical tested elbow

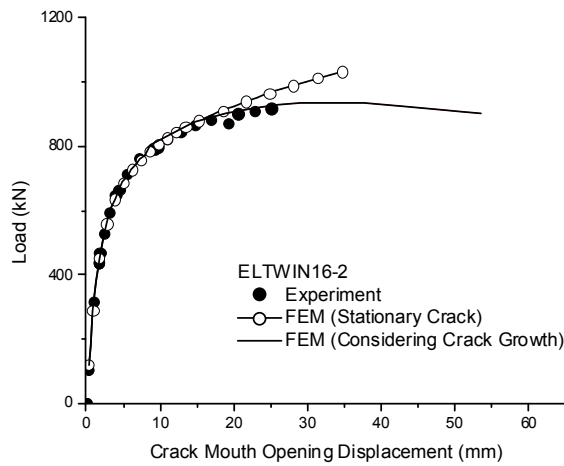


Figure 12 Load-CMOD response of the 1T CT specimen (nonlocal model)



Figure 13 Load-CMOD response of the 1T CT specimen (local model)

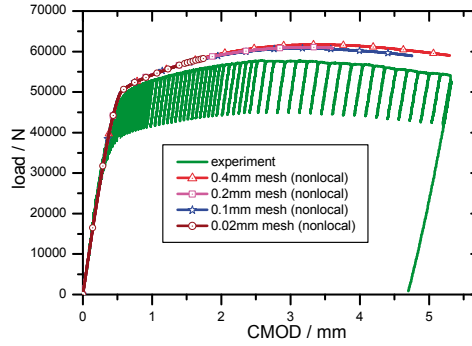


Figure 14 J-resistance behaviour of the 1T CT specimen (local model)

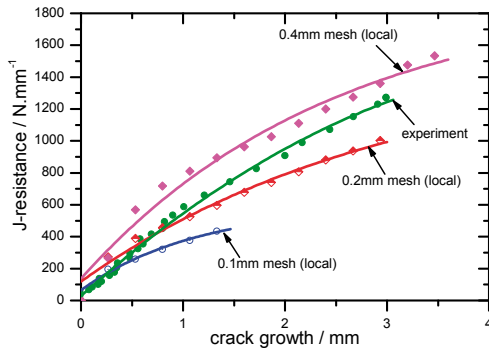


Figure 15 J-resistance behaviour of the 1T CT specimen (nonlocal model)

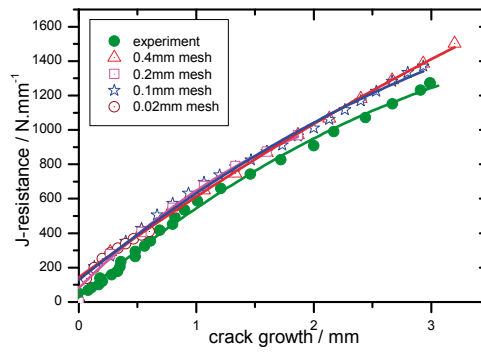


Figure 16 Comparison of simulated scatter of fracture toughness of the CT specimen with experiment in the DBT region.

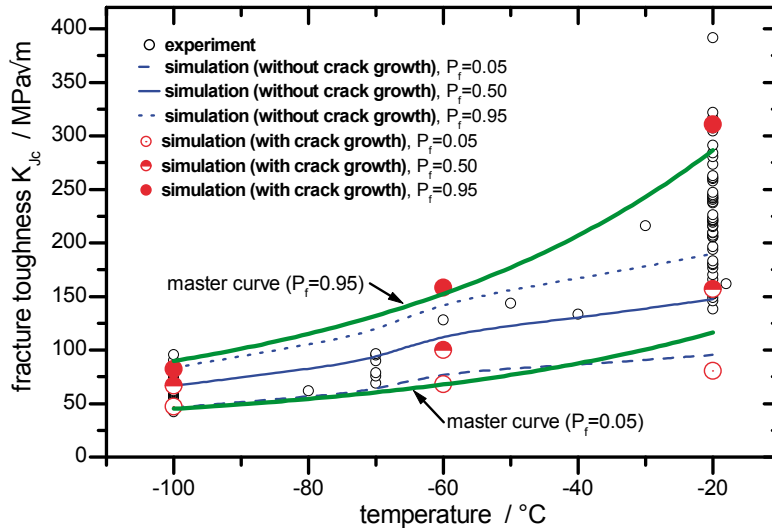


Figure 17 Schematic of actual piping system and its conventional model for fracture analysis.

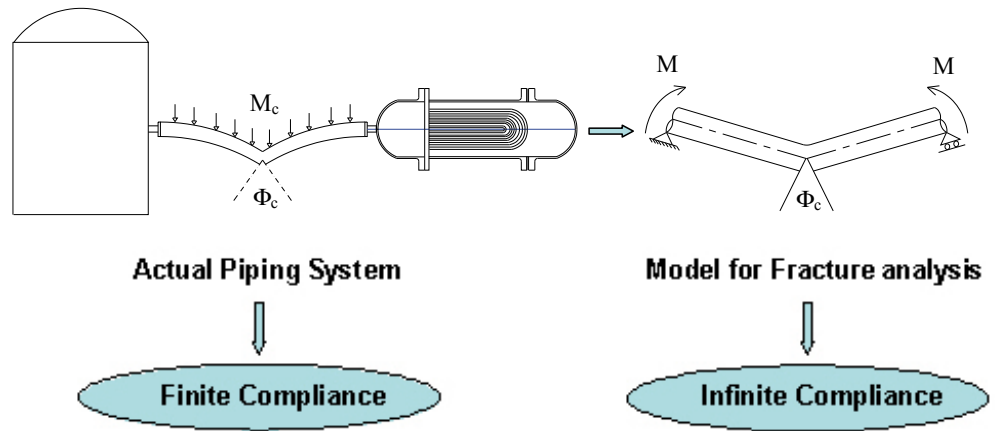


Figure 18 Schematic of piping system Test Setup.

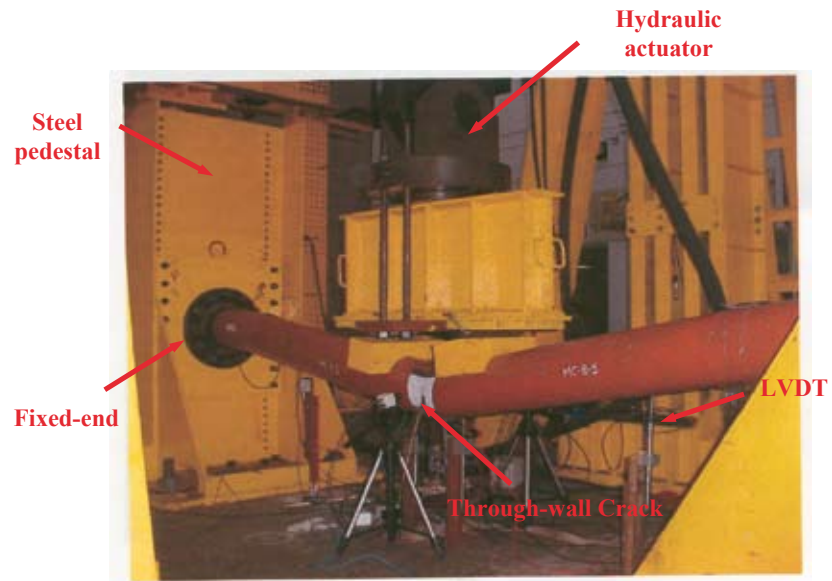


Figure 19 Reduction in load carrying capacity of piping system due to crack.

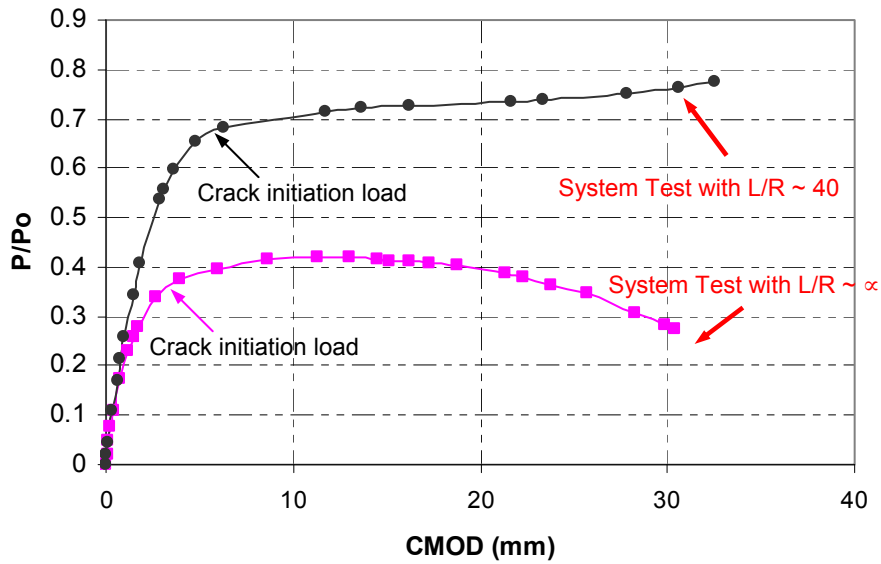


Figure 20 Comparison of System test data with non-linear FEA.

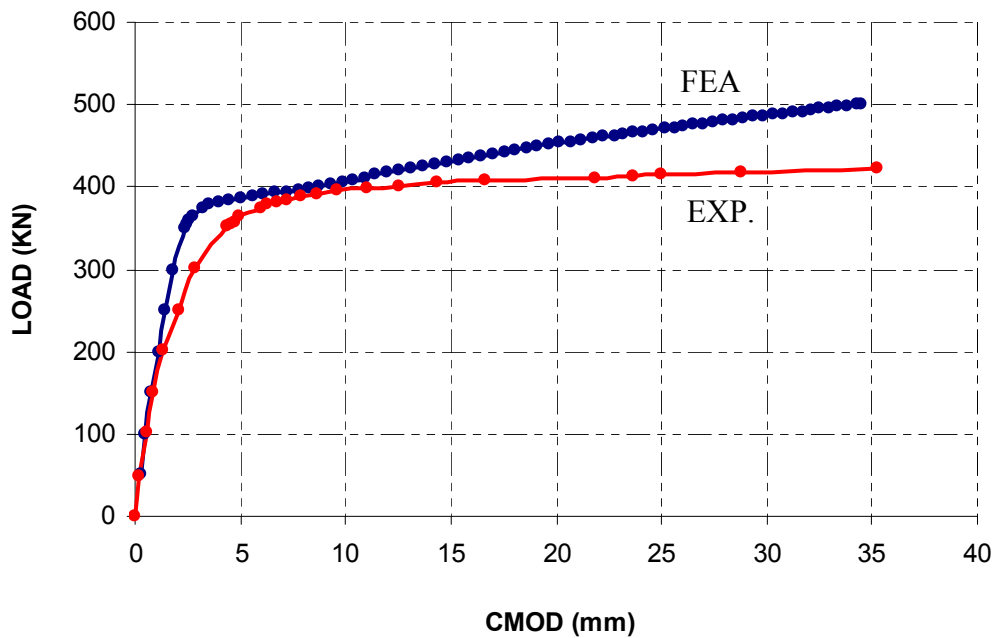


Figure 21 Comparison of analytical solutions of  $\eta_p$  with FE results for C(T) specimen.

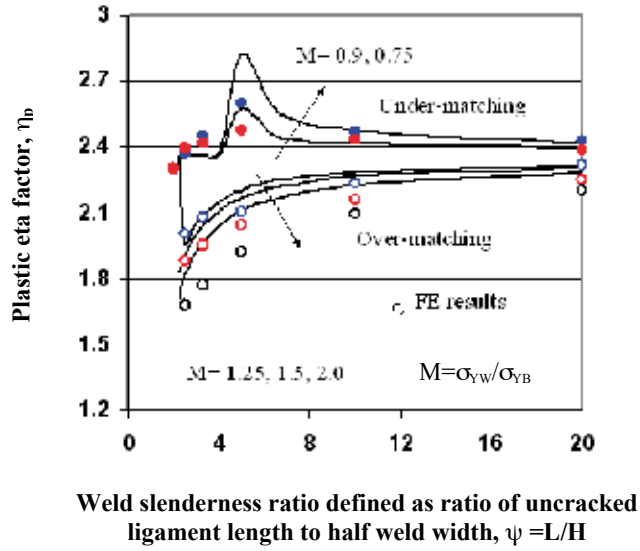


Figure 22 Comparison of proposed analytical solutions of limit load of mismatched welded C(T) specimen with FE results.

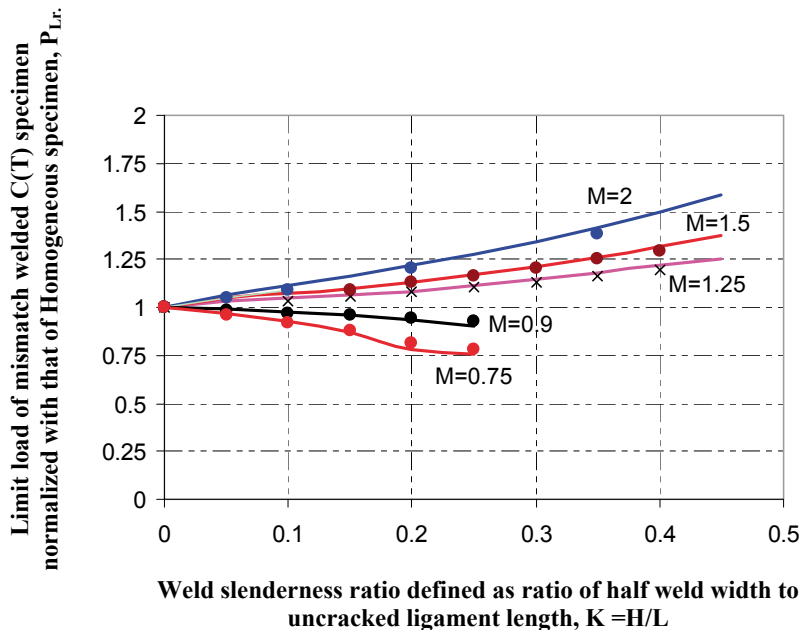




Figure 23 Comparison of crack-tip constraint parameter  $h$  of Overmatched middle tension, M(T) specimen obtained from proposed Modified Upper Bound (MUB) approach with FEA.

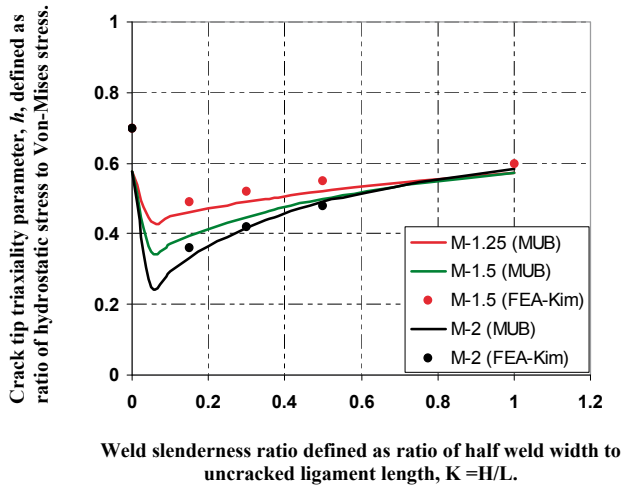


Figure 24 Cyclic Tearing Test Setup Picture

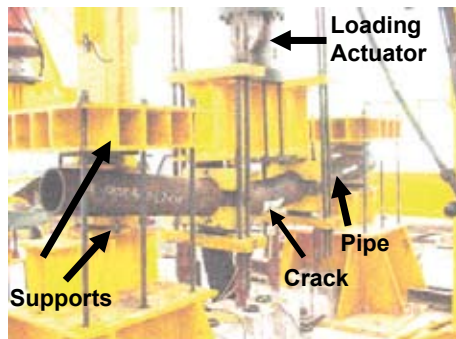


Figure 25 Crack Growth versus load cycles

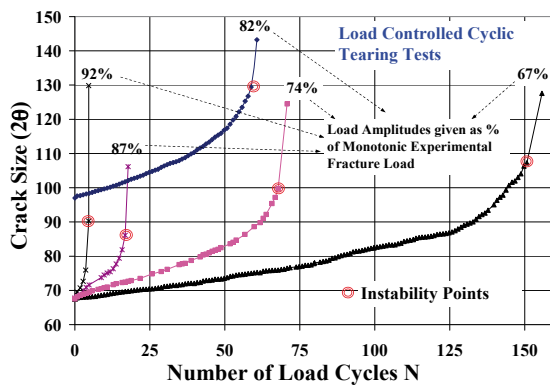


Figure 26 (a) moment versus rotation (b) J-resistance curve, for displacement controlled tests

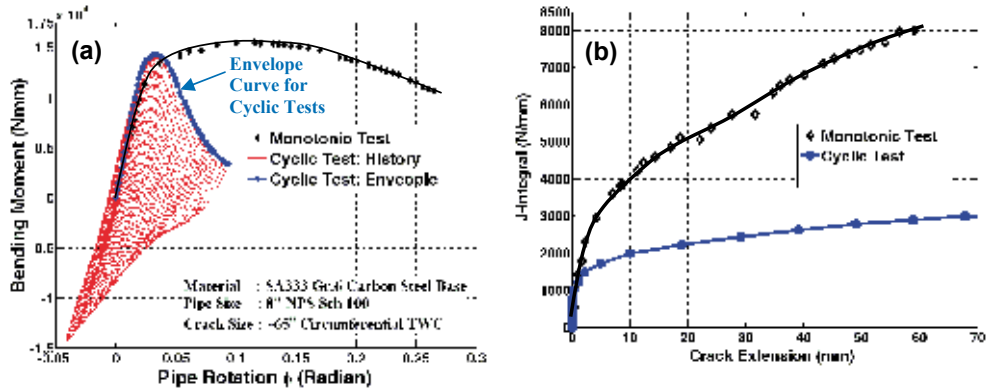


Figure 27 Cyclic Tearing Failure Assessment Diagram (CTFAD) developed from load controlled cyclic tearing and corresponding monotonic fracture tests

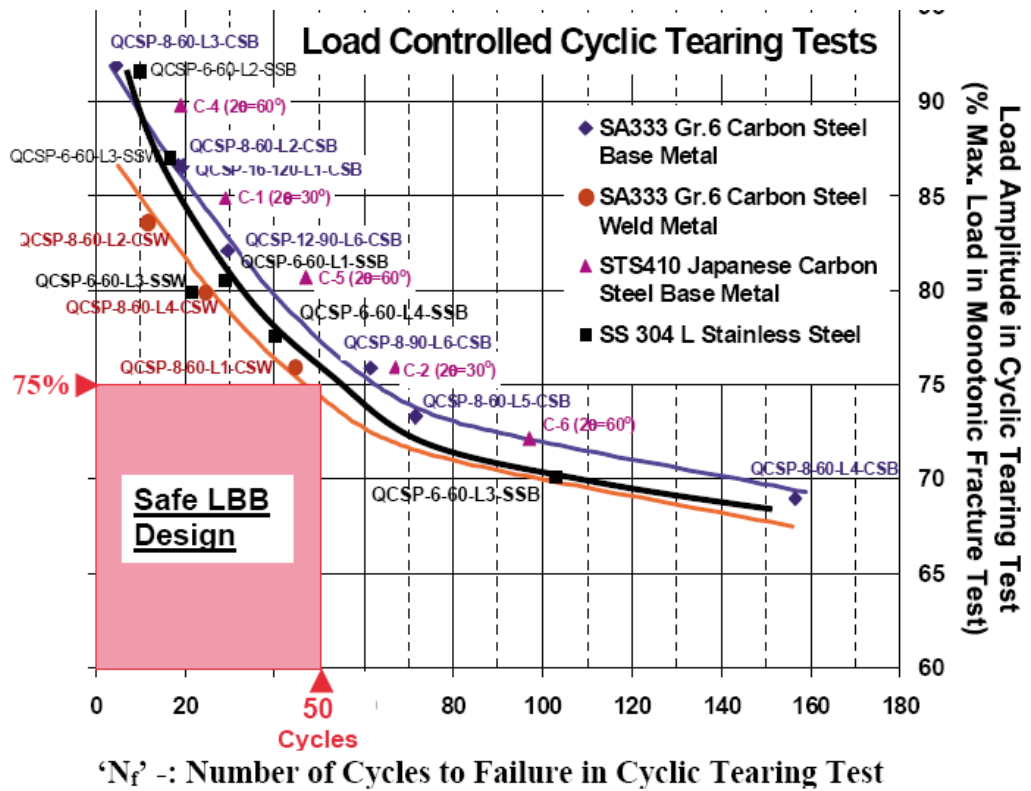


Figure 28 Safety Factor demonstration for displacement controlled Cyclic Tearing Test

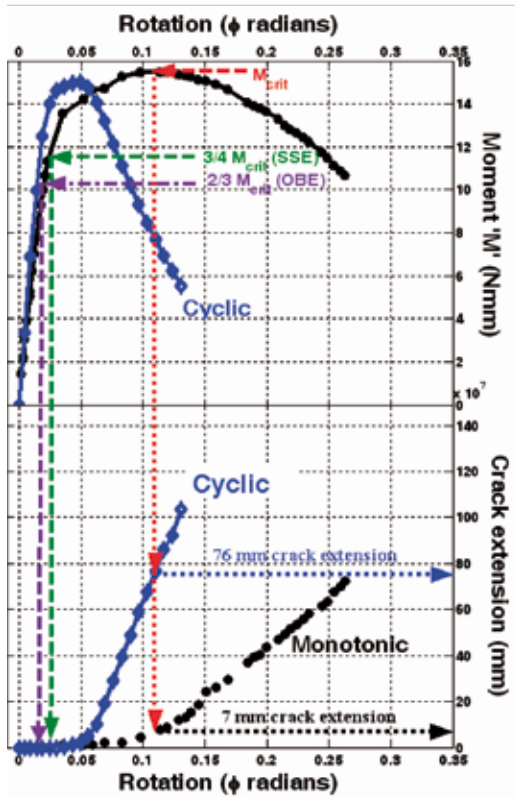


Figure 29 Predicted versus test measured crack growth for load controlled Cyclic Tearing Test

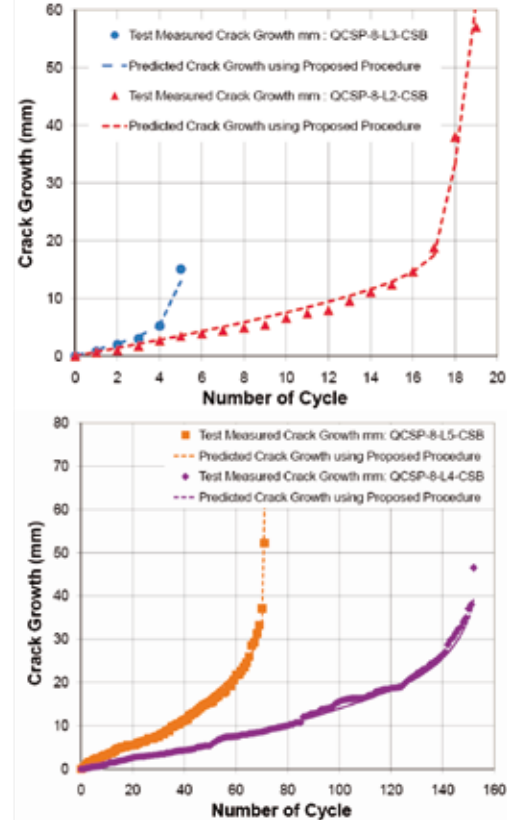


Figure 30 Moment Versus Crack Extension plots from Load Control Cyclic Tearing Tests and Monotonic Fracture Tests

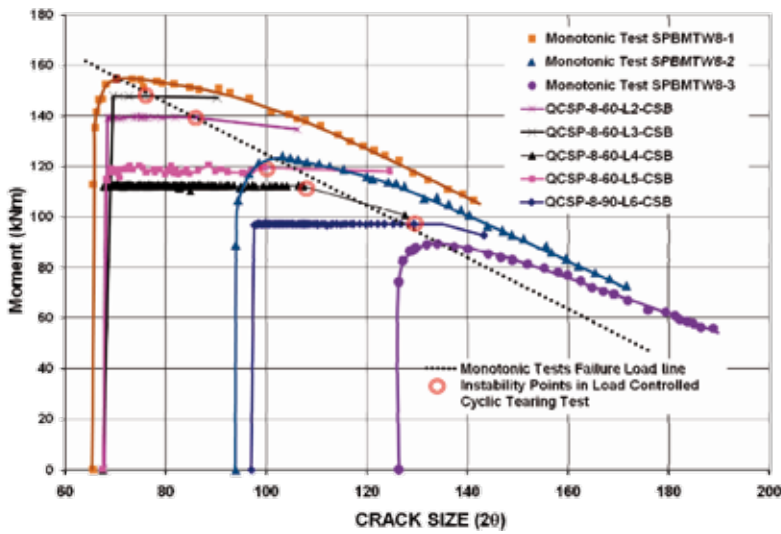


Figure 31 Fatigue-Ratcheting Test setup of Pipe-Elbow assembly with various instrumentation used in test

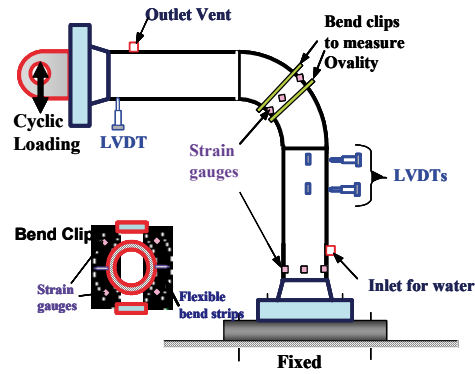


Figure 32 Axial through wall crack with water spray in ERT2 pipe-elbow assembly

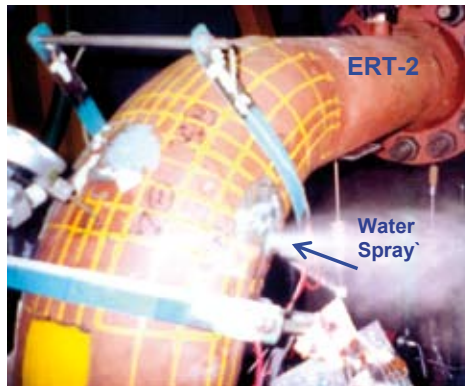


Figure 33 Change in diameter (%) versus Cycles for ERT-2 test

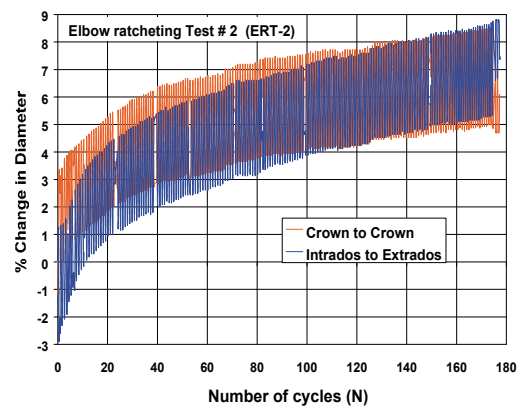


Figure 34 Hoop strain(%) versus number of cycles at various locations of ERT-5

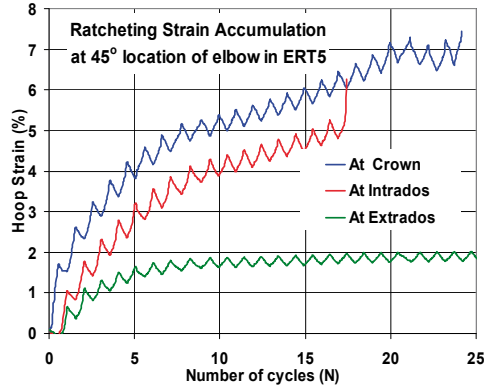


Figure 35 Influence of accumulated ratcheting strain on the LCF life

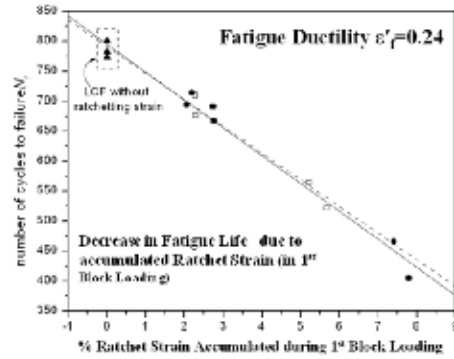


Figure 36 Comparisons of experimental Load versus Load line Displacement for 1st cycle and 10th loading cycle results with Finite Element analyses, for ERT-4 Tests

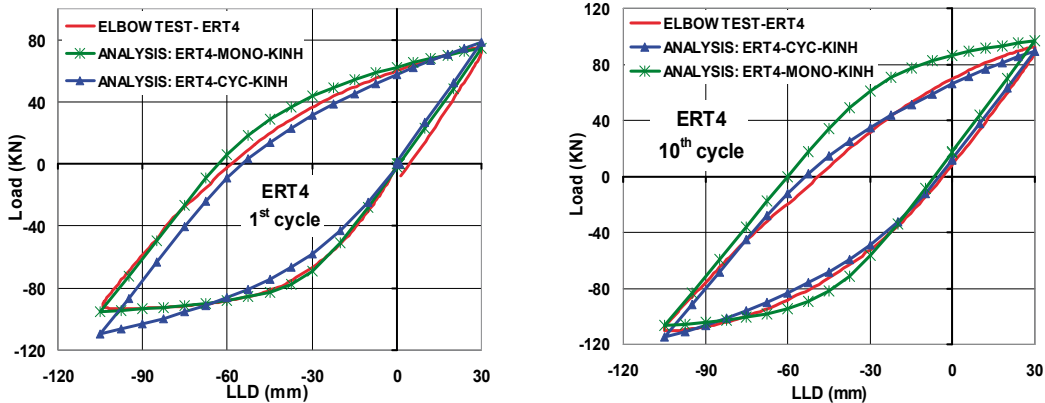


Figure 37 Comparison of crack initiation prediction using different strain-life equation with tests

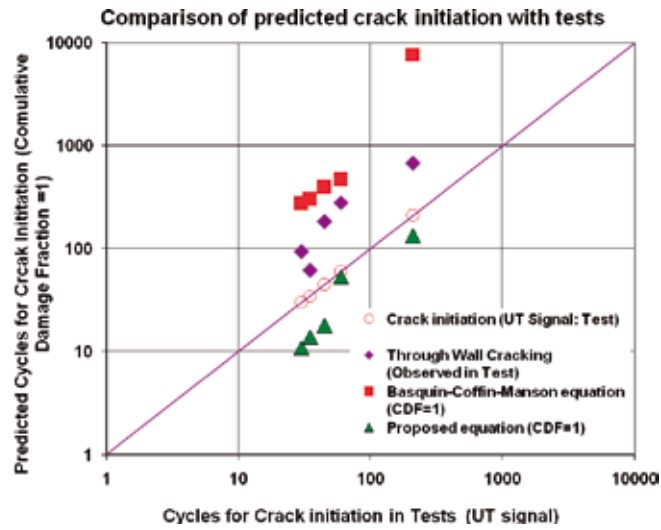


Figure 38 90° Long Radius Through Wall Cracked Elbows

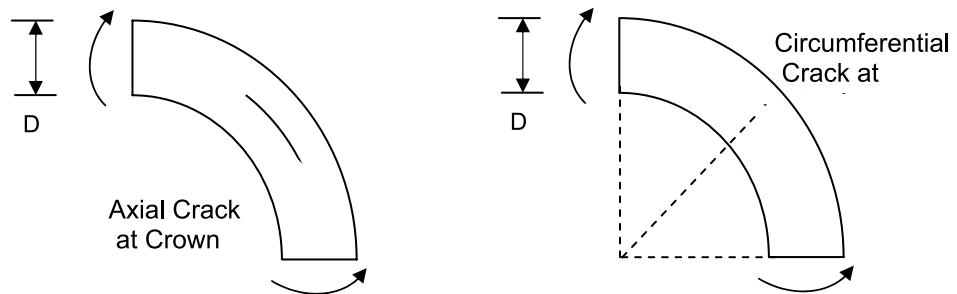


Figure 39 Schematic Diagram for Z-factors Determination

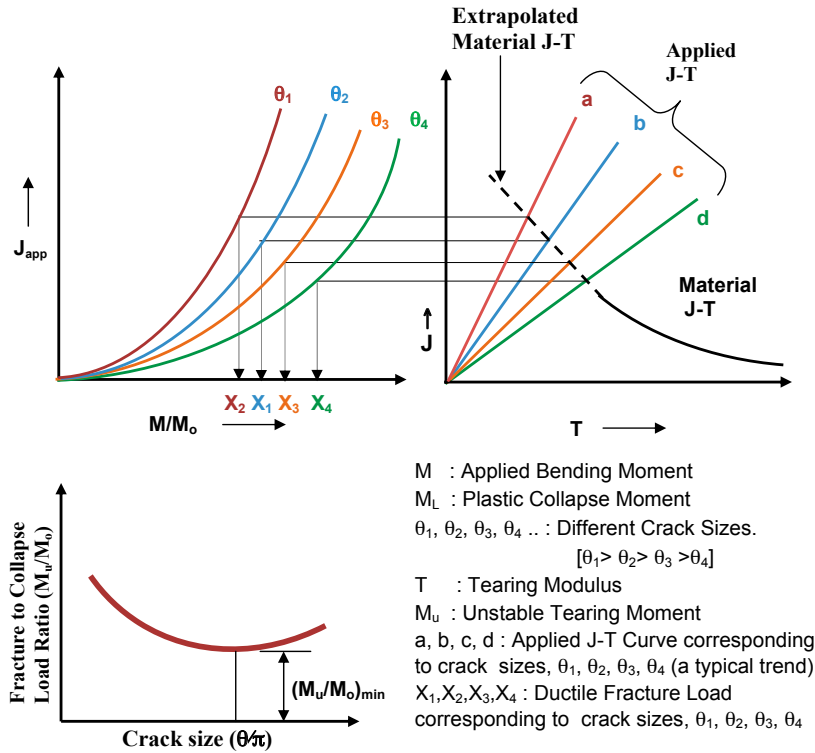
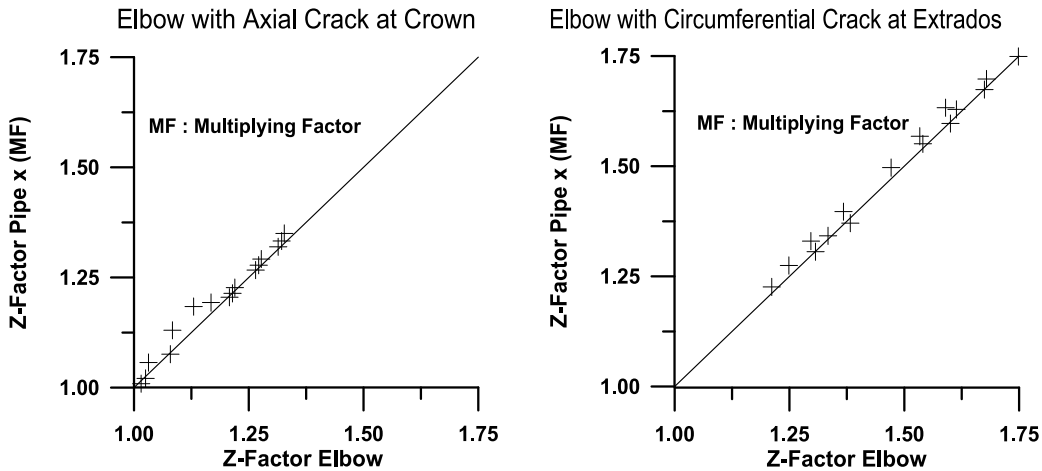


Figure 40 Comparison of Z-factor of elbow evaluated using proposed Multiplying Factor (MF) and obtained through detailed J-tearing Analyses.







Fußgängerbrücke

O. Univ. Prof. Dr. techn. Konrad Bergmeister  
*Leiter des Departments für Bautechnik und Naturgefahren  
an der Universität für Bodenkultur Wien, Österreich*



## Monitoring und Lebensdauer von Brücken

### 1. Einführung

Die Lebensdauer beschreibt den Zeitabschnitt von der Bauausführung bis zum Ende der Funktionsfähigkeit eines Bauwerkes. Eine Ingenieurkonstruktion ist so lange funktionstüchtig, als die Grenzzustände der Tragsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit mit einer gewissen Sicherheit gegeben sind. Die dabei auftretende Problemstellung der Beurteilung der Sicherheit wird in den Eurocodes durch die Einführung von Werten für den Sicherheitsindex  $\beta$  formuliert. Die Problematik besteht jedoch in der Überführung der realen Verhältnisse in ein Modell zur Erfassung der Lebensdauer und damit zur Berechnung eines Sicherheitsindex  $\beta$ . Es ist unschwer vorstellbar, dass die Entwicklung des Sicherheitsindex als auch die theoretische Nutzungsdauer entscheidend von der regelmäßigen und sachgemäßen Unterhaltung bzw. den Inspektionen abhängt. Die visuelle Inspektion ist eine erste, vornehmlich qualitative, und in Abhängigkeit von der Erfahrung des Prüfingenieurs subjektive Zustandsbewertung.

Die Ausgangsbasis jeder Entschei-

dung muß daher eine profunde Zustandsaufnahme und Bewertung einer Brücke sein [1]. Dabei stellt immer noch die visuelle Inspektion und die möglichst genaue Erfassung des Trag- und Verhaltenszustandes die wichtigste Voraussetzung dar. Neben der wirtschaftlichen Begründung der Notwendigkeit einer Bauwerksüberwachung ergeben sich noch eine Reihe weiterer Vorteile. Zum einen ist dies die Objektivierung der visuellen Inspektion, aber auch die Verifizierung und Validierung innovativer Bauweisen und Materialien. Der wesentlichste Nebeneffekt ist aber sicherlich die kontinuierliche Aktualisierung und Feinabstimmung der numerischen und mechanischen System- und Werkstoffannahmen bei adaptiven Modellen zur Schadensvorhersage [6]. Sehr viel genauere und objektivere Schlüsse können aus quantitativ erfassten Größen gezogen werden. Die laufenden Entwicklungen in der Komponentenentwicklung von Sensor-, rechnergestützten Mess- und Datenverarbeitungs- sowie Kommunikationstechnologien haben zur Entwicklung einer Vielzahl an Konzepten und Systemen zur zerstörungsfreien

Werkstoffprüfung und Bauwerksüberwachung geführt [2, 3, 4]. Dennoch sind solche, teilweise automatisierten Systeme zur Bauwerksüberwachung vielmehr als Ergänzung und nicht als Ersatz für die visuelle Inspektion aufzufassen.

Für den Brückenprüfingenieur stellt das menschliche Auge das wesentlichste Erkennungsmittel dar. Wie ein guter Arzt aufgrund seiner Erfahrung eine Diagnose erstellt, stellt er eine erste Bewertung des Zustandes aufgrund äußerer Erscheinungsbilder zusammen. Er kann damit beispielsweise unmittelbar Risse und deren Lage erkennen, aber auch Feuchtstellen, Verfärbungen, Korrosionserscheinungen, Abplatzungen, Verformungen und vieles mehr. Eine weitere Verfeinerung desselben Wahrnehmungsprinzips ermöglichen Geräte wie Risslupen, Mikroskope, Endoskope oder Kameras. Für Untersuchungen von Eigenschaften, die nicht vom äußeren Zustand abgeleitet werden können, bedarf es allerdings einer Reihe von Messwerken und Prüfverfahren, wie beispielsweise Rückprallhammer, Korrosionsanalysegeräte, Bewehrungssuchgeräte oder Schichtdickenmesser.

Eine Brückenprüfung besteht grundsätzlich aus verschiedenen Einzelprüfungen, deren Anwendung im Ermessen des Prüfingenieurs liegt. Im Folgenden werden beispielhaft verschiedene Bereiche einer Brücke aus Konstruktionsbeton aufgelistet, die einer Prüfung unterzogen werden sollten. Dabei ist darauf zu achten, dass neben allen Bauwerksteilen

auch die Fundamente sowie sämtliche mit dem Erdreich in Berührung stehende Konstruktionen erfasst werden.

Brücken wurden bisher mit einer Lebensdauer von 50 bis 100 Jahren gestaltet. Mit neuen Hochleistungswerkstoffen ist es möglich, Brückenbauwerke für eine Lebensdauer von 200 Jahren zu bemessen und zu konstruieren. Ziel muss es sein, mit einem ökonomisch vertretbarem Monitoring die Lebensdauer zu optimieren und das Brückentragwerk funktionsstüchtig zu erhalten. Die wichtigsten Schwachstellen und Merkmale für eine Bewertung der Lebensdauer sind:

#### **Beton:**

Verschmutzungen, Rückstände, Verwitterung, Zerstörungen, Kiesnester, Durchfeuchtungen, Wasserspuren, Ausblühungen, Rostflecken, freiliegende Bewehrung, Risse, mechanische Beschädigung, Brandschäden, Betondeckung, Hohlstellen, Karbonatisierung, Chloridschäden, Abweichung der Betonfestigkeit

#### **Betonstahl:**

Lage und Durchmesser, Risse durch und/oder Zwangseinwirkung, Risse entlang der Stabachse, Oberflächenrisse, Korrosionsschäden, Dehnungsänderungen

#### **Spannglieder:**

Risse entlang der Spanngliedachse, unvollständig gefüllte Hüllrohrabschnitte, Korrosionsschäden, Brüche von Spanngliedern, Dehnungsänderungen

**Profilstahl:**

Korrosion, Schweißnahtbrüche, Korrosionsschutzabplatzungen, Plastizierungen

**Anker und Koppelstellen:**

Zustand und Dehnungsänderung

**Brückenlager:**

Zustand und Funktion, fehlerhafte Lagerstellung, Lagerschäden

**Risse:**

Rissart: Korrosionsriss, Trocknungsschwinden, Setzung, Trennriss, Rissverlauf, Rissbreite und -tiefe, Rissbreitenänderung im Vergleich zur letzten Messung,

**Fahrbahnübergänge:**

Zustand, Funktion und Dichtheit, Risse

**Abdichtung:**

Zustand und Dichtheit

**Entwässerung:**

Funktion

**Weitere Ausstattung:**

Fugendichtung, Belagsschäden, Geländer, Masten, Beleuchtung

**Geländeoberfläche:**

Setzungen, Anrisse, Rutschungen

Ein wesentlicher Bestandteil in der Methodik der Bauwerksüberwachung ist die Erfassung der Geometrie des Bauwerkes sowie ihrer Änderungen. Gegenstand der Messung sind globale und lokale Bauwerksverformungen wie Verschiebungen, Verdrehungen, Verbiegungen, Verbeulungen, zum anderen aber natürlich auch Erfordernisse der Bauwerksdokumentation. Abgesehen

von Spezialverfahren stehen fünf geodätische Methoden zur Verfügung, die sich für die Bauwerksanalyse eignen: Handaufmass, Photogrammetrie, Tachymetrie, unterschiedliche Scan-Verfahren und GPS. Vorteilhaft ist die berührungslose Funktionsweise, allerdings sind optische Verfahren auch empfindlich für atmosphärische Einflüsse.

In vielen Fällen kann nur mit Mitteln einer geeigneten Bauwerksüberwachung bzw. eines Monitorings die verbleibende Nutzungsdauer hinreichend zuverlässig bewertet werden.

Wesentliche Entscheidungsgrundlage für die Beurteilung, aufbauend auf die Resultate eines Monitorings, sind die Erkenntnisse über Struktur- und Materialzustand, die aus der Auswertung der Inspektions- und Überwachungsdaten gewonnen werden. Im Sinne einer präventiven Bauwerksüberwachung können nun aufgrund der Erkenntnisse aus Laborversuchen und Feldbeobachtungen die Schädigungsprozesse als zeitabhängige Vorgänge identifiziert und modelliert werden. Zusätzlich kann das Tragwerk mit einer nichtlinearen Finite Elemente Analyse analysiert werden, um damit verschiedene Bruchmodelle und deren Auswirkungen bewerten zu können. Mit Bezugnahme auf einen Grenzzustand kann nun, unter Annahme von streuenden Basisvariablen und Zeitabhängigkeiten, auch eine stochastische Modellierung erfolgen. Mit einer gekoppelten Strukturanalyse und einer schrittweisen pro-

probabilistischen Untersuchung kann eine Bewertung der Versagenswahrscheinlichkeit durchgeführt werden [5].

Durch Extrapolation über einen bestimmten Zeitraum können die Abschätzung der Lebenserwartung, die Abnahme der Widerstandswerte oder das Ansteigen der Schädigungspotentiale hochgerechnet werden. Im Endzustand sollten die angestrebten Mindestwerte für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit nicht unterschritten werden.

Die Schadensprognosen lassen sich im Allgemeinen nicht am realen Bauwerk unmittelbar bestätigen [6]. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, im Labor soweit möglich bestimmte Untersuchungen an sogenannten Ersatz- oder Modellbauwerken durchzuführen.

Integriertes Monitoring mit einer darauf aufbauenden Strukturidentifikation schafft die Grundlagen für eine sachgerechte Lebensdauerprognose und Zuverlässigkeit von Ingenieurstrukturen. Die Schäden im Laufe eines Lebens von Brücken sind vielfach, jedoch kann man spezifisch durch ein angepasstes Monitoring einige Strukturelemente gezielt überwachen und dadurch die Zuverlässigkeit der Brücke verbessern. Die Materialwissenschaften und die digitale Datenverarbeitung, die nichtlineare Strukturanalyse und die Systemidentifikation sind dabei Schlüsseltechnologien, da Monitoring immer als interaktiver Prozess angesehen werden muss [8].

## 2. Lebenszyklusmanagement und Monitoring

Für eine effiziente Erhaltungsplanung ist das sogenannte Lebenszyklusmanagement (Life Cycle Management, LCM) von wesentlicher Bedeutung [9]. Kernelement eines derartigen LCMs ist die objektive und quantifizierbare Erfassung des gegenwärtigen Zustandes einer Brücke. Erst durch eine quantitative Beschreibung des gegenwärtigen Zustandes und unter Einsatz von sogenannten Prognosemodellen auch des zukünftigen wird es möglich, mittels probabilistischer Verfahren der Systemanalyse das Sicherheitsniveau eines Bauwerks zu ermitteln und mit normativen Vorgaben zu vergleichen. Obwohl die Zustandserfassung innerhalb eines LCMs auch in klassischer Form durch rein visuelle Inspektion und gegebenenfalls einzelne vertiefte lokale Untersuchungen stattfinden kann, stellt die Einbeziehung erweiterter Überwachungs- und auch Systemidentifikationskonzepte ein Schritt in Richtung einer objektiven und optimierten Bauwerkserhaltung dar [10]. Wie in Bild 2-1 dargestellt, erlauben geeignete Monitorsysteme zum einen eine direkte Erfassung des Bauwerkszustands durch Beurteilung der messtechnisch erfassten Bauwerksreaktion und stellen andererseits auch die notwendigen Eingangsdaten für unterschiedliche Verfahren der Strukturidentifikation und weiters der Systemanalyse bereit, deren Ergebnisse ebenfalls zur Zustandserfassung heran-

gezogen werden können.

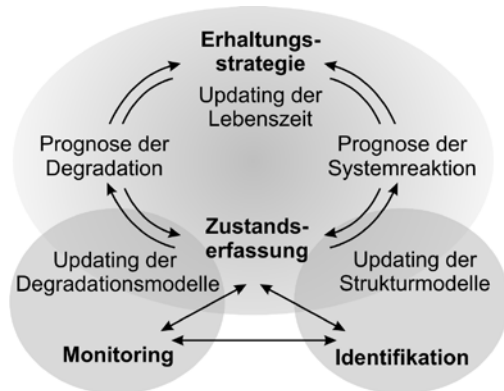


Bild 2-1. Elemente des Lebenszyklusmanagements

Da die korrekte Zustandsbewertung die Basis für die Festlegung der Erhaltungsstrategien nicht nur einzelner Tragwerke sondern gesamter Bestandsnetze darstellt, wird die Notwendigkeit für eine objektive und quantifizierbare Datenbasis deutlich. Wie bereits erläutert, können die notwendigen Eingangsdaten durch Monitoring- und Identifikationssysteme bereitgestellt werden und erlauben in Folge neben der direkten Funktion in der Anpassung eine Erfassung des Bauwerkszustands, der Lebenszeiteinschätzung und der daraus abgeleiteten Erhaltungsplanung. Neben einem möglichen Lebenszeitgewinn durch eine treffendere Beurteilung des aktuellen Zustands in Kombination mit einer Extrapolation durch Updating der Struktur- und Prognosemodelle ist auch die Aufdeckung eventuell vorhandener Überschätzungen des Bauwerkszustandes von hoher Signifikanz, da so die Erhaltungsplanung rechtzeitig angepasst und ein Sicherheitsgewinn

erreicht werden kann. Bild 2-2. zeigt schematisch die zu erwartende Verbesserung bei Verwendung von erweiterten Monitoring-, Strukturanalyse- und Identifikationssystemen, vor allem durch die Vermeidung unnötig hoher Investitionen [9]. Weiters findet sich eine Tendenzlinie, welche den maximal möglichen Erhaltungszustand bei optimaler Nutzung der durch MIS zur Verfügung gestellten Informationen darstellt.

In der Literatur wird grundsätzlich zwischen „Bottom-Up“ und „Top-Down“ Ansatz bei der Auslegung von Monitoring-Systemen unterschieden, wie bereits im Betonkalender 2009 ausführlich dargelegt wurde [4]. Aufgrund der Natur der Problemstellung – a priori keine Kenntnis über Zustand oder Art und Lage eventuell vorhandener Defekte – bietet sich der „Top-Down“ Ansatz an, welcher es erlaubt, ausgehend vom globalen Strukturverhalten Informationen über potentielle Schäden zu erhalten. Die Auslegung des Monitoringsystems (Lage und Art der Sensoren) ist in diesem Fall maßgebend durch die Sensitivität der Beobachtungsgröße gegenüber möglichen Schäden geprägt. Top-Down-Systeme werden in der Regel permanent oder periodisch im Sinne der Vorsorge betrieben. Liegen allerdings bereits bekannte Schadensbereiche vor oder gilt es bestimmte Degradationsmechanismen zu untersuchen, ist der Bottom-Up-Ansatz als Analysewerkzeug vorzuziehen. Dies-



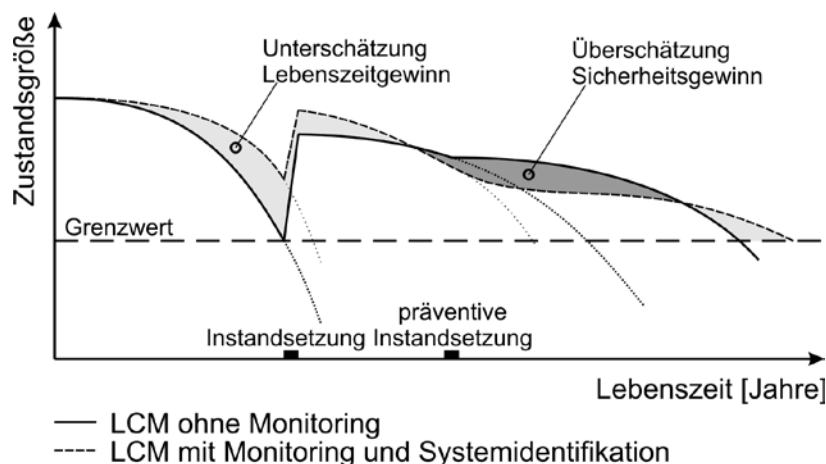


Bild 2-2. Sicherheits- und Lebenszeitgewinn durch Monitoring und Systemidentifikation in LCM-Systeme, modifiziert nach [6]

bezügliche Systeme zeichnen sich durch eine starke Lokalisierung der Sensoren, einen zeitlich befristeten Messvorgang und meist einmaliger Datenauswertung aus. Alarmierungssysteme, welche bei Überschreitung eines festzusetzenden Triggers informieren und bei Gefahr in Verzug unmittelbar eine Brückenspernung bewirken, fallen ebenfalls in diese Kategorie.

Monitoring-Systeme werden bereits seit Jahrzehnten vor allem im Rahmen wissenschaftlicher Studien betrieben und ständig weiterentwickelt. Allerdings wird erst heute durch technische Fortschritte in Sensortechnik, Energieversorgung und Rechenleistung und die damit einhergehende Kostenreduktion der erforderlichen Ausrüstung eine verbreitete Anwendung und somit der Einsatz als Element des LCM möglich. Obwohl sich gegenwärtig die praktische Anwendung solcher

SHM-Systeme noch auf eine geringe Anzahl wirtschaftlich bedeutender Brücken oder Bauwerke, welche sich bereits in einem kritischen Erhaltungszustand befinden, be-

schränkt, nimmt deren Verbreitungsgrad in jüngster Zeit signifikant zu. Den maßgebenden Kostenfaktor stellen zunehmend die Personalkosten für die Auswertung und Interpretation der aufgezeichneten Daten dar. Diese Schwierigkeit wird teilweise durch die Entwicklung neuer, robuster und hochgradig automatisierter Identifikations- und Bewertungssysteme überwunden, welche zukünftig auch den Einsatz in der Überwachung der hohen Anzahl an „kleinen“ Strukturen (ergänzend zur vorgeschriebenen visuellen Inspektion) ermöglichen sollen [4].

## 2.1. Altersstruktur und Bauwerksprüfung

Bekanntlich stellt das zunehmende Bauwerksalter in den Bestandsnetzen der Straßen- und Eisenbahnbetreiber ein an Bedeutung gewinnendes Problem für die Bauwerkserhaltung dar [4]. Der in Bild 2-3 ersichtliche Vergleich der Altersstruktur des Deutschen, Österreichischen Bundesfernstraßen- und Schweizer Nationalstraßennetzes zeigt deutlich, dass



es sich hierbei um kein lokales sondern grenzüberschreitendes Problem handelt, welches analog ebenso für die entsprechenden Autobahn- und Eisenbahnnetze gilt. Mit einem durchschnittlichen Bauwerksalter von fünfzig Jahren nähert sich ein signifikanter Anteil der Infrastrukturbauwerke ihrer ursprünglichen Lebensdauer. Ständig steigende Beanspruchungen durch Verkehrslasten und Umweltbedingungen verschärfen die Situation weiter, sodass einer effizienten Bauwerksinspektion und vor allem realitätsnahen Erfassung des Zustands zunehmend höhere Bedeutung zukommt.

Erweitert man die Betrachtung beispielsweise auf die Vereinigten Staaten zeigt sich laut „national bridge inventory“ (Stand Dezember 2007) auch dort eine ähnliche Situation. Im US-Bundestaat New-York wurden beispielsweise über 50 % der Brückenfläche, wie in Bild 2-4 ersichtlich, zwischen 1952 und 1968 errichtet und sind somit über 40 Jahre alt. Das dominante Baumaterial war in diesem Fall mit 85 % Stahl gefolgt von Stahl- und Spannbeton im Gegensatz zu der mit 95 % im deutschen Sprachraum dominanten Massivbauweise [12].

Voraussetzung für alle Maßnahmen der Bauwerkserhaltung (DIN 31051 [13]) ist die Bauwerksprüfung, welche in Europa abhängig vom Bauwerkstyp zu bestimmten Zeitpunkten und in definiertem Umfang zu erfolgen hat. Bestehende Unterschiede ergeben sich unter anderem aus den unterschiedlichen Einwirkungsarten, Einwirkungsfrequenzen und

der Einwirkungsdauer sowie dem bauwerkstypabhängigen Sicherheitsbedarf [4].

Die Überwachung von Brückenbauwerken ist in Deutschland durch die DIN 1076 [14], in Österreich durch die RVS 13.71 [15] und in der Schweiz durch die Richtlinie „Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen“ [16] geregelt.

Die DIN 1076 [14] (Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung) regelt die Überwachung und Prüfung von Straßenbrücken in Deutschland, wobei Bauwerke mit einer lichten Weite von mehr als 2,0 m nach DIN als Brücke aufzufassen sind. Zur Erhebung des Erhaltungszustandes werden in der DIN 1076 die „Laufende Beobachtung“, die „Besichtigung“ und die „Bauwerksprüfung“ unterschieden und können wie folgt zusammengefasst werden [4]:

Die laufende Beobachtung wird vierteljährlich im Rahmen der Streckenkontrolle durchgeführt. Zusätzlich werden zweimal im Jahr ohne besondere Hilfsmittel alle Bauteile von Geländeneiveau oder Verkehrsebene aus auf offensichtliche Schäden hin untersucht und nur solche dokumentiert, die eine mögliche Gefahr für die Standsicherheit bedeuten.

Die Besichtigung erfolgt einmal jährlich außer in Jahren, in denen eine Prüfung geplant ist, und zusätzlich im Fall außergewöhnlicher Ereignisse wie

Hochwässer oder schwerer Unfälle, die eine Gefährdung für die Standsicherheit darstellen könnten. Eine Besichtigung kommt ohne besonderes Inspektionsgerät aus, nutzt aber alle am Bauwerk vorhandenen Besichtigungseinrichtungen, wie begehbare Hohlräume.

Die Prüfung umfasst nach DIN 1076 „einfache Prüfungen“, „Hauptprüfungen“, „Prüfungen aus besonderem Anlass“ und „Prüfungen nach besonderen Vorschriften“. Generell sind alle Prüfungen von einem sachkundigen Ingenieur durchzuführen und deren Ergebnisse über einen Prüfbericht zu protokollieren. Hauptprüfungen sind vor Abnahme der Bauleistung, vor Ende der Gewährleistung und danach alle sechs Jahre durchzuführen und umfassen eine „handnahe“ Prüfung aller Bauteile unter Zuhilfenahme von Rüstungen. Einfache Prüfungen halbieren das Untersuchungsintervall, kommen ohne spezielles Gerät aus und überwachen vor allem bekannte Mängel. Prüfungen aus besonderem Anlass (Sonderprüfungen) werden ausschließlich durchgeführt, wenn die laufende Beobachtung oder die Besichtigung auf größere Mängel schließen lässt, beziehungsweise die Auswir-

kung größerer Ereignisse auf die Tragwerkssicherheit unklar ist. Ihr Umfang hängt vom Anlassfall ab, hat jedoch keinen Einfluss auf die regulären Intervalle.

Detailliertere Informationen zur Definition dieser festgelegten Untersuchungsintervalle, dem Ablauf einer Detailprüfung sowie Anforderungen an Prüfengeure sind im Betonkalender 2009 [4] verfügbar. Zur Erhöhung der Objektivität der Ergebnisse und Wahrung der Qualität der Bauwerksüberwachung und -prüfung teilt sich deren Durchführung nach DIN 1076 [16] auf mehrere Organisationseinheiten, dem Straßenbau/Bauamt und der Meisterei auf.

Die Zustandsbewertung erfolgt in Deutschland entsprechend der RI-EBW-PRÜF (Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076) durch Bewertung von Schäden mittels Attributen für Standsicherheit, Verkehrssicher-

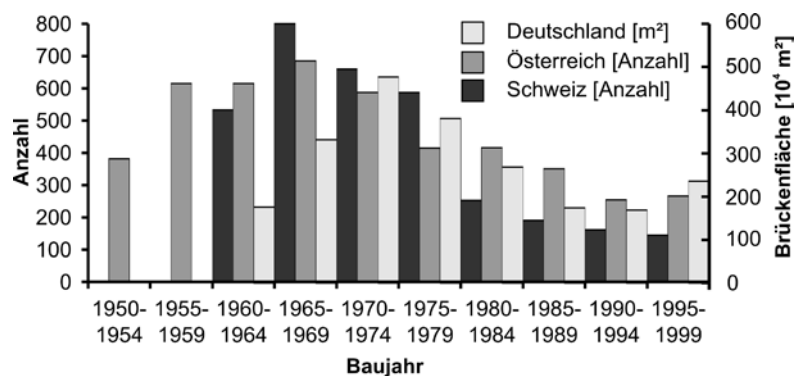


Bild 2-3. Gegenüberstellung der Altersstruktur des Deutschen, Österreichischen Bundesfernstraßen- und Schweizer Nationalstraßennetzes; Daten nach [10,11]

heit und Dauerhaftigkeit und resultiert in einer Zustandsbewertung mit möglichen Noten zwischen 1 und 4, wobei 1 einem „sehr guten Bauwerkszustand“ und 4 einem „ungenügenden Bauwerkszustand“ entspricht.

### 3. Messmethoden und Instrumentierung

Neben den „traditionellen Messmethoden“ (siehe auch Betonkalender 2005) wie Widerstandsgeber auf DMS-Basis, Potentiometrische Geber, Wirbelstromsensoren, Schwingsaiten, Ultraschall- und Lasersensoren, Geometrische Messmethoden, Dehnungssensoren, Mechanische Messsensoren, Geschwindigkeit und Beschleunigungs-, Temperaturmess- und Feuchtemesssensoren gibt es auch anwendungsreife faseroptische Sensoren für viele physikalische Messgrößen [17].

Die Auswahl geeigneter Messinstrumente orientiert sich natürlich an den

zu erwartenden Größenordnungen des instrumentierten physikalischen Phänomens. Zum anderen kann diese Auswahl aber auch von einer weiteren Überlegung geleitet sein. Viele Sensoren eignen sich dazu, das Materialverhalten unter verschiedenen Einwirkungen zu messen und daraus Schlüsse auf das Verhalten des gesamten Objektes zu ziehen.

#### 3.1. Faseroptische Sensoren

Ein typisches System zur Bauwerksüberwachung setzt sich aus einem Netzwerk von Sensoren zusammen, das die relevanten Parameter des Zustandes des Objektes und dessen Umgebung misst. Die häufigsten Parameter, die es dabei zu erfassen gilt, sind in der Regel physische Einflüsse wie Lage, Verformung, Kräfte oder Schwingungen. Daneben sind häufig aber auch thermodynamische und chemische Einflüsse wie Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Werte, Chlorid- oder Sulfatgehalt zu messen [17].

Ein weiterer Vorteil dieser Kategorie von Sensoren liegt vor allem aber auch in der Möglichkeit, die Sensorfasern in Trägermaterialien wie Beton oder Faserverbundwerkstoffe einsetzen zu können.

Die Haupteinsatzgebiete faseroptischer

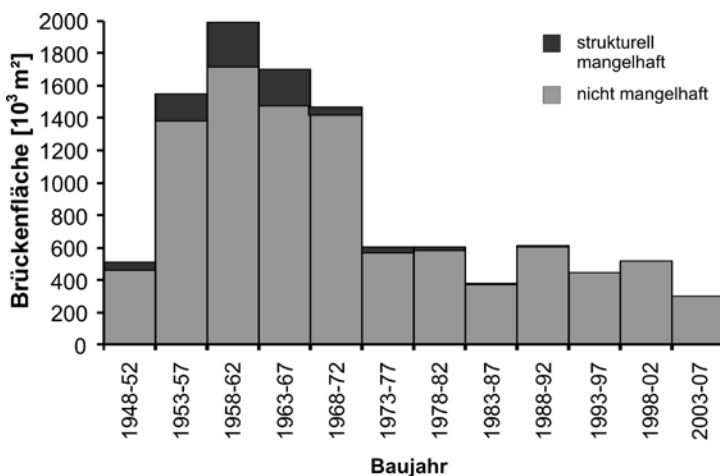


Bild 2-4. Brückenfläche nach Baujahr und Zustand; nach NBI (2007)

Sensoren waren bisher vor allem Dehnungs- und Temperaturmessungen. Allerdings gibt es für die im Folgenden diskutierten Verfahren beispielsweise auch Varianten zur Kraft und Druckmessung. Applikationen zur Neigungs- und Beschleunigungsmessung sind in Entwicklung. Darüber hinaus werden eine Reihe von Anwendungen zur Messung anderer Größen wie Feuchte und pH-Wert erprobt. Faseroptische Sensoren kommen also, ähnlich wie der DMS, zunehmend auch als Elementarsensor für andere Aufnehmer zum Einsatz.

### 3.1.1 Bragg Gratings

Eine weit verbreitete und gut entwickelte Sensortechnologie ist das Bragg-Grating-Verfahren. Hierbei wird im Kern einer photosensitiven optischen

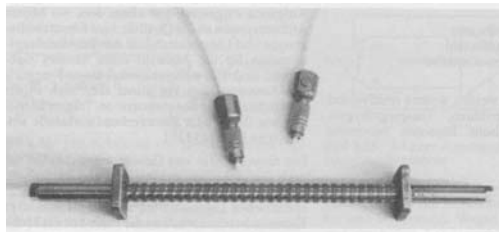


Bild 3-1. Bragg-Gitter-Dehnungssensor zur Einbettung in Beton

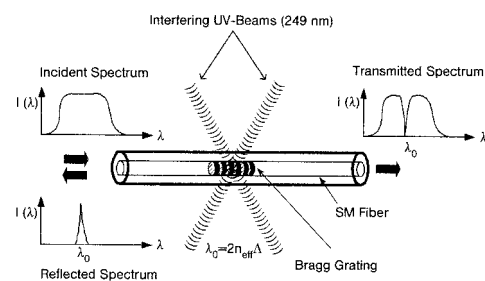


Bild 3-2. FBG – Herstellung und Funktionsprinzip

Faser durch ein Interferenzmuster zweier transversaler UV-Strahlen ein Beugungsgitter erzeugt. Diese wellenlängenselektiven Bragg-Gitter filtern durch Reflexion aus einem breiten Spektralbereich ein beliebiges, schmales Spektralband heraus. Thermomechanisch induzierte Dehnungen der Faser bewirken lineare Veränderungen der Gitterkonstante und damit eine Verschiebung des gefilterten Spektralbands. Der Rest des Spektrums durchläuft das Gitter und kann für weitere Messgitter herangezogen werden. Bis zu 100 Bragg-Gitter können entlang einer Faser verteilt und mit einer zentralen Erfassungseinheit überwacht werden. Mit einem solchen gemultiplexten Interrogationsschema ergibt sich bei Messaufgaben mit vielen Messstellen eine hohe Kosteneffizienz. Eine quasi-verlustfreie Übertragung des Signals kann dabei bis zu 100 km erfolgen. Ein typischer Messbereich für die Dehnung beträgt beispielsweise  $-1.000 \mu\epsilon$  bis  $+10.000 \mu\epsilon$  bei einer Auflösung bis zu  $1 \mu\epsilon$ . Die Querkraftempfindlichkeit kann im Gegensatz zu DMS vernachlässigt werden. Temperaturen können mit diesem elektrisch passiven Sensor in einem Bereich von  $-25^\circ\text{C}$  bis  $+600^\circ\text{C}$  und einer Auflösung von  $0,1 \text{ K}$  gemessen werden. Die Dynamik der zur Datenerfassung eingesetzten Demodulatoren reicht von einigen hundert Hertz bis in den Megahertzbereich hinein. Wenn Dehnungs- und Temperaturänderungen gleichzeitig zu erwarten sind, so kann die Tempera-

tureinwirkung durch ein mechanisch unbelastetes Referenzgitter kompensiert werden.

### 3.1.2 Fabry-Perot-Sensoren

Extrinsische Fabry-Perot Interferometer (EFPI) bestehen im Prinzip aus einem Siliziumrohr mit 2 optischen Lichtwellenleitern, die in axialer Richtung durch einen kleinen Luftspalt (z. B. 50  $\mu\text{m}$ ) voneinander getrennt sind. Wenn Licht durch eine solche Anordnung gesendet wird, erhält man durch Reflexion an den beiden Grenzflächen (Glas/Luft und Luft/Glas) ein Interferenz-Signal. Diese Interferenz kann zur Nachbildung der Änderungen der Faserlänge mittels kohärenter oder niederkohärenter Techniken demoduliert werden. Da die zwei Fasern am Rohr nahe den Ausgängen fixiert und mit einem Abstand von wenigen Millimetern (2 – 10 mm) befestigt sind, korrespondieren die Änderungen des Luftzwischenraumes mit dem Mittelwert der Dehnungsänderungen über die Messbasis. Für die Anwendung als Dehnungssensor haben EPFI typischerweise Messbereiche von  $\pm 5.000 \mu\epsilon$  bei einer Genauigkeit von 1%. EPFI werden aber auch als Sensorelemente zur Messung von Temperatur, Beschleunigung und Kraft eingesetzt.

### 3.1.3 Microbending-Sensoren

Die Lichtführung in einer Lichtwellenleiter-Faser erfolgt durch Totalreflexion an einer Grenzfläche zwischen dem Kern-

und dem Mantelmaterial. Während in der Telekommunikation möglichst stabile, von äußeren Einflüssen weitgehend entkoppelte Transmissionseigenschaften des Lichtwellenleiters notwendig sind, werden für intensitätsmodulierte Fasersensoren Beeinflussungen des Lichtweges bzw. einzelner Parameter der Strahlung messtechnisch genutzt. Bei Krümmung einer optischen Saite geht das Licht an den Krümmungsstellen durch Abstrahlung teilweise verloren. Diese Verluste sind mit Hilfe einer Licht-Dämpfungsmessung erfassbar. Der Sensoreffekt beruht auf der Korrelation der Dämpfungsänderung bzw. Lichtintensität mit der Längenänderung der optischen Saite. Kommerzielle Systeme zur Messung von Längenänderungen, die auf diesem Prinzip beruhen, bestehen beispielsweise aus ineinander verschlungenen Lichtwellenleitern, die von 0,1 bis zu 10 m lang sein können. Der aktive Messbereich liegt dabei zwischen 5 und 50 mm, Messauflösung und Messgenauigkeit betragen einige  $\mu\text{m}$ . Wenn sich diese umschlungenen Lichtwellenleiter-Paare ausdehnen, so induziert die gegenseitige Umschlingung die Flucht eines Teils des Lichtes aus den Fasern. Bei Drucksensoren liegt die Messfaser zwischen zwei gerippten Druckplatten. In diesem Fall bewirkt die Verschiebung der Druckplatten die Biegung der Messfaser und die dabei messbaren Intensitätsverluste. Typische Signalverarbeitungseinheiten arbeiten mit Abtastraten von 100 Hz.

### 3.1.4 Raman-Verfahren

Dieses Messverfahren beruht ebenso wie Rayleigh- und Brillouinsysteme auf dem aus der optischen Nachrichtentechnik bekannten Rückstreuverfahren OTDR (optical time domain reflectometry). Ein Taktgenerator steuert über eine Streueinheit einen Laser so an, dass er einen sehr schmalen Lichtimpuls hoher optischer Leistung erzeugt. Dieser Lichtimpuls wird in einen Lichtwellenleiter eingekoppelt, in dem er bei seiner Ausbreitung entlang des Glasfaserkabels kontinuierlich gedämpft wird. Die Dämpfungsursachen im Lichtwellenleiter liegen zu einem geringen Teil in der Absorption, zum überwiegenden Anteil jedoch in der Streuung. Von diesem gestreuten Licht wird ein kleiner Teil rückwärts abgestrahlt, diese Ramandiffusion ist das Resultat einer nicht-linearen Interaktion zwischen dem sich fortpflanzenden Licht und dem Fasermaterial. Im zurückkommenden Spektrum werden zwei Komponenten aufgezeigt, welche Raman-Stokes und Raman-Anti-Stokes genannt werden und Frequenzverschiebungen aufweisen. Entscheidend für das Temperaturmessverfahren ist, dass die Intensität des Stokes weitgehend temperaturunabhängig, die Intensität der Anti-Stokes dagegen stark temperaturabhängig ist. Bildet man das Verhältnis beider Intensitäten, erhält man eine absolute Größe für die lokale Temperatur. Wenn die Intensität der zurückkommenden Signale als Funktion der Zeit in der Faser aufgenommen wird, ist es möglich, ein

Temperaturprofil über die ganze Länge der Faser zu erhalten. Bei Multimodefasern liegt die Auflösung kommerziell erhältlicher Systeme im Temperaturbereich bei ca. 1°C und räumlich bei ca. 1 m auf 10 km Faserlänge. Singlemodefasern erlauben bei Abstrichen an die Auflösung auch größere Messlängen.

### 3.1.5 Brillouin-Verfahren

Die Sensoren für die Brillouin-Diffusion sind eine interessante Möglichkeit zur Überwachung von verteilten Temperaturen und Spannungen. Brillouin-Sensor-Systeme basieren auf der orts aufgelösten Bestimmung der Differenzfrequenz zwischen einer in eine Lichtleitfaser eingekoppelten Lichtwelle (Primärwelle) und der durch sie infolge Brillouinstreuung in der Faser induzierten und rückgestreuten Welle, welche in ihrer Frequenz um die von Fasertemperatur und -dehnung abhängige Brillouinfrequenz gegenüber der Primärwelle verringert ist. Die Brillouin-Diffusion ist das Resultat der Interaktion zwischen optischen Wellen und Schallwellen in der Faser. Thermisch erregte Schallwellen (Phononen – Schallquanten) erzeugen eine periodische Modulation vom Refraktionsindex. Die Brillouin-Diffusion erfolgt, wenn das sich fortpflanzende Licht von diesem bewegten Gitter zurückdiffraktiert wird, was in Analogie zum Dopplereffekt zu einer Erhöhung der verschobenen Frequenzkomponente führt. Dieser Effekt wird „Spontane Brillouin-Diffusion“ genannt

und unterscheidet sich von der „erregten Brillouin-Verstärkung“. Wird nun ein Probesignal als Funktion der Frequenzverschiebung, Intensität und benötigter Umlaufzeit analysiert, so erhält man ein Profil der Brillouinverschiebung über die gesamte Länge der Faser.

Kommerzielle Systeme erlauben Messungen von Spannungs- oder Temperaturänderungen in bis zu 50 km langen Fasern mit einer räumlichen Auflösung von 1 m. Die Genauigkeit solcher Systeme liegt bei ca. 1°K im Temperatur- und 20  $\mu\epsilon$  im Dehnungsbereich. Für Dehnungsmessungen muss über die gesamte Länge eine mechanische Verbindung zwischen Faser und Struktur gewährleistet werden, parallel dazu wird zur Temperaturkompensation eine weitere Referenzfaser geführt. Ähnlich wie für die Temperatursensoren ist es möglich, die absoluten Spannungswerte in jedem Punkt der Faser zu berechnen, wenn die Frequenzverschiebung für eine bestimmte Spannung bekannt ist.

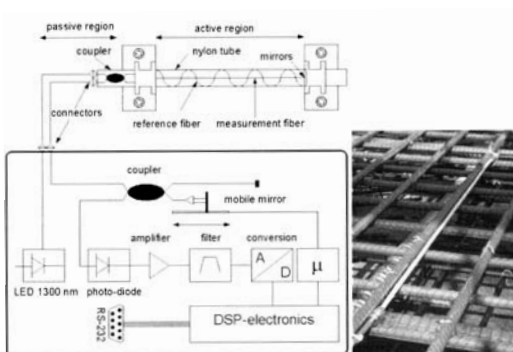


Bild 3-3. Aufbau und Funktionsprinzip des SOFO-Verfahrens

### 3.1.6 Interferometrische Sensoren - SOFO

Die Methode SOFO („surveillance d'ouvrages par fibres optiques“ – SMART-TEC, CH) beruht auf dem Prinzip der Interferometrie in niedriger Kohärenz und misst die Längendifferenz zwischen zwei Fasern. Die infrarote Emission einer leuchtendierenden Diode wird in eine Single-Mode-Faser (SM) gesendet und durch einen Koppler in zwei Fasern übertragen, welche in einem Schutzrohr auf der zu überwachenden Struktur installiert sind. Die vorgespannte Messfaser ist am instrumentierten Bauteil befestigt und folgt auf diese Art und Weise dessen Verformungen. Die Referenzfaser zur Temperaturkompensation verläuft parallel dazu, ist aber spannungsfrei über die gesamte Messlänge. Am Ende jeder Faser wird das Licht in den Koppler zurückreflektiert, der die beiden Strahlen zusammenführt und in einen Analysator weiterleitet. Dieser besteht wiederum aus zwei Fasern, deren Längenunterschied von einem beweglichen Spiegel präzise gemessen wird. Durch das Verschieben des Spiegels erhält man nur dann eine Modulation des von der Photodiode detektierten Signals, wenn der Längenunterschied zwischen den Fasern im Analysator den Unterschied der beiden Fasern im Sensor kompensiert. Die Auflösung dieses Systems beträgt 2  $\mu\text{m}$ , die Sensoren sind mit Messlängen von 20 cm bis 10 m erhältlich. Durch einen Multiplexer können auch bei diesem Ver-



fahren mehrere Sensoren an ein Lesegerät angeschlossen werden. Zur Auswertung stehen Signalverarbeitungsgeräte sowohl für den statischen als auch den dynamischen Bereich zur Verfügung. Dieser Sensortyp wird in verschiedenen Ausführungen angeboten. Zum einen für die Oberflächenmontage auf Stahl, Beton, Holz oder anderen Werkstoffen, zum anderen auch für die Einbettung in Beton.

## 4. Brückenmonitoring

### 4.1 Periodisch begrenzte und permanente Monitoringsysteme

Grundsätzlich ist zwischen permanenten und periodisch arbeitenden Monitoringsystemen zu unterscheiden. Letztere umfassen sowohl fix installierte Systeme, welche nur in bestimmten Zeitintervallen aktiviert werden als auch mobile Systeme, welche auf eine Vielzahl an Bauwerken (Brücken) im Bestandsnetz angewendet werden können. Der Art und Anzahl der hierbei zum Einsatz kommenden Sensoren sind theoretisch keine Einschränkungen gesetzt, obwohl selbstverständlich bestimmte Zustandsgrößen wie beispielsweise Spannung in der Bewehrung oder Lagerreaktionen mobilen Systemen nur eingeschränkt zugänglich sind und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen solche Systeme in der Regel auf ein Minimum beschränken.

Steht nun für eine konkrete Struktur ein Monitoringsystem, welcher Form

auch immer, zur Verfügung können die so erhaltenen Daten für ein laufendes oder periodisches Updating der Struktur-, Degradations- oder Lastmodelle herangezogen werden, wodurch die Qualität und Genauigkeit der abgeleiteten Zustandsbewertung sowie deren Extrapolation in die Zukunft signifikant erhöht werden kann. Im Rahmen des Lebenszyklusmanagements kann folglich für eine einzelne Struktur, aber auch ein größeres Bestandsnetz eine in Kosten und Sicherheitsniveau optimierte Erhaltungsplanung umgesetzt werden.

### 4.2 Dynamische Monitoringsysteme

Die Idee, dynamische Systemkennwerte zur Beurteilung von Bauwerken und Bauteilen heranzuziehen, ist relativ alt und die theoretischen Grundlagen sind bereits gut erforscht. Durch eine Simulation können die maßgebenden Parameter wie Eigenfrequenzen und Eigenformen durch eine dynamische Analyse abgeleitet werden. Die Messungen am Bauwerk werden umgekehrt für die Kalibrierung des Rechenmodells herangezogen, um dieses näher an die Realität heranzuführen [18]. Von besonderer Bedeutung sind hierbei Randbedingungen, Verbindungselemente, Bodenfedern, Brückenlager sowie realistische Massen- und Steifigkeitsverteilungen. Ein Modell hinreichender Güte kann zur Durchführung von Parameterstudien herangezogen werden, um so das Ant-

wortverhalten und die Auswirkungen struktureller Veränderungen prognostizieren zu können.

Die Grundidee dynamischer Messmethoden zur Schadensfeststellung liegt darin, dass eine strukturelle Änderung oder ein lokaler Schaden im Tragwerk die globale Schwingungsantwort des Bauwerks beeinflusst. Brücken, aber auch andere Bauwerke, besitzen ein ausgeprägtes Schwingungsverhalten, das durch die Eigenfrequenzen, die zugehörigen Eigenformen und Dämpfungswerte gut beschrieben werden kann. Ausgehend von gemessenen Signalen im Zeitbereich kann durch eine Fourier-Transformation eine Strukturantwort im Frequenzbereich errechnet werden. Die Ermittlung der Eigenfrequenzen des Systems erfolgt durch Ablesen der Energiespitzen im gemittelten und geglätteten Antwortspektrum aller Messstellen. Daneben stellen die zugehörigen Eigenformen die zweite wesentliche Größe zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens dar. Sie kennzeichnen bestimmte Schwingungsformen, die von anderen Schwingungsformen der Struktur entkoppelt sind und unabhängig von einander existieren können.

Als Schwingung bezeichnet man eine zeitliche Veränderung einer Schwingungskenngröße, welche die Bewegung oder Position eines mechanischen Systems relativ zu einer definierten Ruhelage kennzeichnet. Die Bewegung mechanischer Systeme wird mit Ver-

schiebungsvektoren, Geschwindigkeitsvektoren und Beschleunigungsvektoren beschrieben. Um ein System aus seinem Gleichgewicht auszulenken, bedarf es einer äußeren Anregung. Bei der erzwungenen Erregung (*Forced Vibration Testing*) erfolgt die Bestimmung der modalen Parameter über eine künstlich erzwungene Eintragung der Schwingung durch verschiedene Anregungsmechanismen wie Fallgewichten oder Rüttleinrichtungen.

Die ambiente Erregung (*Ambient Vibration Testing*) macht sich bei der Bestimmung der modalen Strukturparameter umweltbedingt vorhandene Anregungen wie Verkehr, Wind oder Wellenschlag zu nutzen. In der Praxis werden aufgrund ihrer Einfachheit ambiente Methoden bevorzugt. Diese sogenannten ambienten Anregungen besitzen im Mittel die Eigenschaften eines Weißen Rauschens - alle relevanten Frequenzen sind im Antwortspektrum nahezu mit gleichem Energiegehalt vertreten. Die sehr kleinen Vibrationen, die ein Tragwerk aufgrund dieser ambienten Anregungen zeigt, können durch moderne hochempfindliche Beschleunigungsaufnehmer registriert werden.

Eine deterministische Schwingung stellt also die zeitlich-periodische Änderung einer physikalischen Größe dar. Zu einem Zeitpunkt  $t$  gibt die *Elongation* die momentane, die *Amplitude* die maximal mögliche Auslenkung dieser Größe an. Der reziproke Wert der Schwingungs-

dauer heißt *Frequenz*. Wir unterscheiden folgende Schwingungen:

- Gedämpfte Schwingung: die Amplitude nimmt mit fortschreitender Zeit ab.
- ungedämpfte Schwingung: die Amplitude bleibt fortwährend konstant.
- erzwungene Schwingung: einem Schwinger wird eine Frequenz aufgezwungen.
- angeregte Schwingung: von außen wird dem Schwinger Energie zugeführt.

Als Maß der Dämpfung lässt sich aus dem Ausklingverhalten der Schwingung das logarithmische Dekrement  $\delta$  bestimmen.

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{a_i}{a_{i+n}} \quad \begin{array}{l} a_i \text{ Amplitude in Periode } i \\ a_{i+n} \text{ Amplitude in Periode } i+n \\ \delta \text{ logarithmisches Dekrement} \end{array} \quad (4.1)$$

$$D = \frac{\delta}{2\pi} \quad \begin{array}{l} D \text{ Lehr'sches Dämpfungsmaß} \\ n \text{ Periodenanzahl} \end{array} \quad (4.2)$$

Bei einer einmaligen Schwingungsanregung bewirkt die Dämpfung eines Tragwerkes ein kontinuierliches Ausklingen dieser Schwingungen, bis die statische Ruhelage erreicht wird. Die Dämpfungseigenschaften sind frequenzabhängig und stellen eine für die Systemidentifikation maßgebende Größe dar.

Viele technische Systeme sind Schwinger mit nur einem Freiheitsgrad (SDOF) oder können auf solche zurückgeführt werden, die Masse kann sich dabei nur in eine Richtung bewegen. Die meisten baupraktischen Anwen-

dungen stellen in der Realität Mehrmassenschwinger (MDOF) dar, die durch konsistente Diskretisierung auf einzelne Punktmassen zurückgeführt werden können. Damit erhält man aus dem System mit  $n$  Freiheitsgraden  $n$  Systeme mit nur einem Freiheitsgrad. Messtechnisch beschreibt ein Freiheitsgrad einen Messpunkt und eine Messrichtung. Das dynamische Verhalten des linearen Einmassenschwingers im Zeitbereich kann wie folgt beschrieben werden [18]:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = p(t) \quad \begin{array}{l} m \text{ Punktmasse} \\ c \text{ Dämpfer} \end{array} \quad (4.3)$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \begin{array}{l} k \text{ Federsteifigkeit} \\ p(t) \text{ zeitlich variierende} \\ \text{Anregungslast} \\ \omega_0 \text{ Eigenkreisfrequenz} \end{array} \quad (4.4)$$

Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen und der Eigenformen geht man i.A. von der Differentialgleichung der ungedämpften freien Schwingung aus. Diese Annahme ist bei gering gedämpften Systemen zulässig, die Eigenfrequenzen des gedämpften Systems sind nur geringfügig gegenüber dem ungedämpften verschoben. Bei freien Schwingungen ohne äußere Krafteinwirkung kann unter Vernachlässigung der Dämpfung für ein solches System gemäß Gleichung (4.4) die Eigenkreisfrequenz  $\omega_0$  formuliert werden.

Unter Modenform oder Eigenform ist das mit einer Modenfrequenz oder Polstelle verbundene Verformungsmuster zu verstehen. Es repräsentiert die relativen Ausschläge aller Teile der Struk-

tur für diesen modalen Zustand. Die tatsächliche physikalische Verformung einer zu Schwingungen angeregten Struktur ist immer eine Kombination aller Modenformen. Mit harmonischer Erregung nahe einer Modalfrequenz ist es möglich, dass die Verformung zu 95% aus einer der Frequenz zugeordneten Modenform besteht. Bei stochastischer Erregung, die eine Vielzahl von Erregungsfrequenzen enthält, zeigt sich ein „Vermischen“ aller Modenformen.

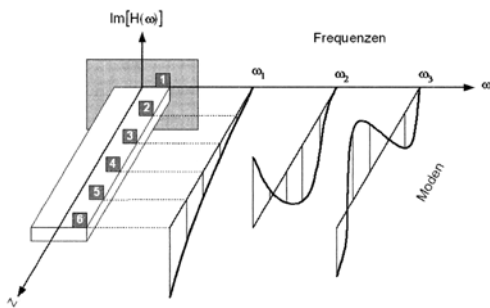


Bild 4-1. Modale Parameter eines Kragbalkens

Die zur Untersuchung von Schwingungen gemessenen Größen (z.B. Beschleunigung, Kraft, Dehnung, usw.) werden von einem Messaufnehmer als elektrische Spannung an das Messgerät gesendet. Um das Eingangssignal numerisch auswerten zu können, kommt zur Signalanalyse die diskrete Fourier-Reihenentwicklung zur Anwendung. Voraussetzung dafür ist, dass die von der Messgröße gebildete Zeitfunktion einen periodischen Verlauf aufweist. Die Zeitfunktion wird innerhalb der Periode  $T$  in  $n$  gleich lange Zeitintervalle  $\Delta T$  zerlegt und abgetastet. Durch Einführung einer

fiktiven Entwicklungsperiode  $T$ , mit der sich das Signal angeblich wiederholt, ist auch die Analyse eines aperiodischen Signals möglich. Durch den numerischen Grenzübergang  $T \rightarrow \infty$  entsteht die diskrete Fourier-Transformation. Je kleiner das Abtastintervall gewählt wird, desto genauer ist das Ergebnis. Der Rechenaufwand steigt jedoch überproportional an. Abhilfe schafft der Algorithmus der Fast-Fourier-Transformation (FFT), der die Periodizität von trigonometrischen Funktionen ausnutzt. Ein Nachteil der FFT besteht jedoch darin, dass die Anzahl der auswertbaren Datenpunkte eine Potenz von 2 sein muss  $N=2^n$ . An den Intervallgrenzen der fiktiven Periode  $T$  weist die Zeitfunktion einen Sprung auf, was zu einer Scheinfrequenz  $1/T$  führt. Durch Multiplikation mit einer sogenannten Fensterfunktion (Rechteck, Dreieck, Cosinus, Blackmann, Hamming, Hanning, Kaiser-Bessel, usw.) wird versucht, diese Unstetigkeit auszugleichen. Dabei ist aber darauf zu achten, den tatsächlichen Signalverlauf möglichst wenig zu verfälschen. Diese Forderungen werden je nach Fensterart mehr oder weniger erfüllt. Während z.B. ein Rechteckfenster die Funktion am genauesten wiedergibt und an den Intervallgrenzen keine Veränderungen vornimmt, erzeugt ein Dreiecksfenster einen stetigen Übergang, verfälscht die Funktion aber recht stark.

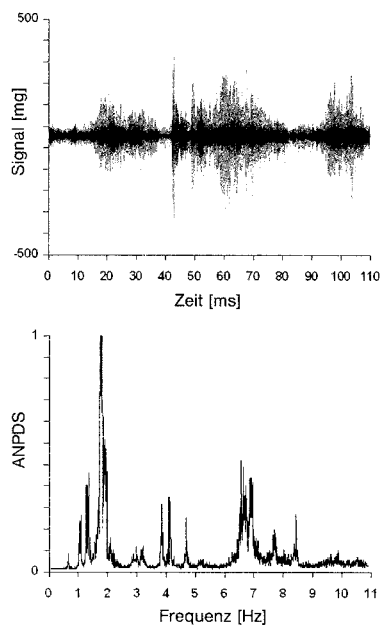


Bild 4-2. Dynamisches Signal im Zeit- und Frequenzbereich

Die Beurteilung der Auswirkungen auf die dynamische Charakteristik von Brücken erfolgte auf Basis aller dynamischen Parameter wie Eigenfrequenzen, Eigenformen, Dämpfungswerte sowie Trendkarten. Bei auftretenden lokalen Schäden an einem Brückentragwerk sind tiefe Eigenfrequenzen sehr unempfindlich. Eine Beurteilung des aktuellen Systemzustandes darf daher nicht alleine auf Basis der Grundfrequenz erfolgen. Höhere Eigenfrequenzen mit ihren zugehörigen kurzwelligen Schwingungsformen sind in Hinblick auf die Beurteilung von lokalen Schäden viel sensibler. Sinnvoll erscheint es, das gesamte Frequenzspektrum messtechnisch zu erfassen. Die Abhängigkeit der Frequenzänderungen sowie der Empfindlichkeit einzelner Frequenzen vom Umfang der Schädigung ist natürlich

stark vom statischen System des Tragwerkes abhängig. Neben den modalen Parameter Eigenfrequenzen und Eigenformen ist die Beurteilung des Dämpfungsverhaltens des Brückentragwerkes von großer Bedeutung. Im Allgemeinen zeigen Problemzonen erhöhte Dämpfungswerte. Diese Dämpfung entsteht durch die Energieumsetzung im Tragwerk wie z.B. Reibung. Stellen mit erhöhter Dämpfung soll daher größte Aufmerksamkeit geschenkt werden.

### 4.3 Monitoring von externen Spannkabeln

Die Korrosion kann die Tragfähigkeit von Spannkabeln wesentlich beeinflussen. Für eine Früherkennung von Korrosionsschäden an Spanngliedern kann ein Korrosionsmonitoring angebracht werden, wie dies im Sonderforschungsbereich 477 „Bauwerksüberwachung“ an der Technischen Universität Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz erarbeitet wurde [19].

Die Spannstähle sind anfällig gegenüber Lochfraß und interkristalliner Korrosion zwischen Korngrenzen, transkristalline Korrosion zwischen Metallgefügen, Spannungsrißkorrosion und Wasserstoffversprödung.

Prinzipielle Verfahren des Monitorings zur Korrosions- und Bruchdiagnose sowie der Kabelkraft von Spanngliedern sind [20]:

- Spannpress (Kabelkraft kann nur am Spannkopf bestimmt werden);

- Drahtsensorik, die aus dünnen, tiefen-gestaffelten Eisendrähten besteht und zur Überwachung des Vordringens der Depassivierungsfront in der Spannstahlumgebung eingesetzt wird;
- die Magnetometrische Impulstechnik, bei der das Abklingverhalten von elektrischen Impulsen im Spannstahl extern mittels Fluxgate-Magnetometer untersucht wird;
- Magnetoelastische Verfahren, wo sich bei einer Belastung (erzwungene geometrische Veränderung) die magnetischen Eigenschaften ändern;
- Skinverfahren, d. h. die magnetische Erfassung des Stromfadenversatzes zwischen Gleich- und höherfrequentem Wechselstrom im Spannstahl zur Beurteilung des Korrosionsgrades;
- Elektromagnetische Hochfrequenzreflektometrie auf der Grundlage der Elektromagnetischen Resonanzmessung, wobei die spektrale Reflexionsantwort eines am Ende des Spannstahls eingekoppelten, breitbandigen elektromagnetischen Signals ausgewertet wird.
- Dynamische Methoden, angeregt durch die Umgebung (ambient), Hammerschlag, Hand (Wellenanregung).  
Mit strukturdynamischen Messungen an Seilen oder Spannkabeln kann man mittels einer Schwingungsanalyse mit bestimmten Einschränkungen Problemzonen lokalisieren.

Bei einem lokalen Schaden reduziert sich die Steifigkeit, das dann zu einer Ab-

nahme der Eigenfrequenz führt. Zusätzlich weisen schadhafte Spannsysteme (Schwingsysteme) höhere Dämpfungskoeffizienten vergleichsweise zu fehlerfreien Spannkabeln auf.

Der Verlust von Vorspannkraft verändert die Eigenfrequenz und die modalen Parameter.

Die Eigenschwungsform kann durch eine

- lineare Interpolation,
- Polynom (liefert bereits in der 2. Ordnung ausreichend genaue Werte),
- Spline – Kurve (zusammengesetztes Polynom)

angenähert werden. Aufgrund der Untersuchungen von Vorwagner [21] eignet sich für Spannkabelmessungen die Induktion der Schwingung mittels Hammer, wobei die Frequenzen mit der Stochastic Subspace Identification – SSI-Methode ermittelt werden können.

Bei Kenntnis der Geschwindigkeit  $v$ , kann über die bestimmte Wellenschwingdauer auf die freie Schwinglänge  $L$  geschlossen werden, wobei  $a$  [m] den Abstand zwischen dem Impulseintrag und dem Messsensor bildet,  $t_c$  [sec] den Zeitunterschied im Signal zwischen Impuls und Antwort und  $t_L$  [sec] die Wellenschwingdauer.

$$L = \frac{a}{2} \times \frac{t_L}{t_c} \quad (4.5)$$

Der Einfluß des Spannkabelgewichtes auf die Eigenfrequenz geht linear, sowie die Frequenz und die freie Schwinglänge quadratisch in die Kraftbestimmung ein.

Die Kabelkraft  $N$  kann durch die idealisierte Eigenfrequenz bestimmt werden.

$$f_p = \frac{1}{2 \times L} \sqrt{\frac{N}{g}} \quad (4.6)$$

$$N = f_{p,m}^2 \times g \times 4 \times L^2 \quad (4.7)$$

Zur Messung der Eigenfrequenzen werden Beschleunigungsaufnehmer verwendet, deren Frequenzbereich von 0,05 Hz bis 500 Hz eine hohe Empfindlichkeit aufweisen sollten. Zur Messung von Relativbewegungen werden piezoelektrische Messsensoren oder glasfaseroptische Sensoren (fiber bragg gratings) an den Spannkabeln befestigt.

Das gespannte Kabel muß angeregt werden, entweder durch die Umgebung (ambient), Hammerschlag oder mit der Hand (Wellenanregung). Bei einer ambienten Anregung müssen ein Referenzpunkt und ein variabler Messpunkt mit je einem Beschleunigungsaufnehmer vorhanden sein. Gut eignet sich die Impulsanregung durch einen Impulshammer. Die Messdauer ist gegenüber den ambienten Messungen verkürzt und die Datenverwaltung sowie die Auswertung sind vereinfacht. Um die Übertragungsfunktion ermitteln zu können, müssen mehrere Impulse durch den Hammer angeregt werden, wobei die Kabelschwingung zwischen den Anregungen abgeklungen sein

muss. Anschließend wird der Mittelwert gebildet und aus der Übertragungsfunktion die mittlere Eigenfrequenz ( $f_{p,m}$ ) und die Amplituden der Eigenschwingungen ermittelt.

Festgehalten werden sollte, dass die höheren Frequenzen besser mit der Übertragungsfunktion zusammenstimmen als die ersten drei Eigenschwingungsformen. Der Grund könnte in der besseren Anregung der höheren Frequenzen durch den Schlag und der harten Hammerschlagfläche liegen. Beim Hammerschlag ist weder eine Kraft- noch eine Zeitinformation des Eintrages notwendig.

Bei der Ermittlung der Schwingungsparameter zeigten Untersuchungen, dass die „stochastic subspace identification method – SSI“ also die sogenannte Methode der Zustandsraumdarstellung die besten Ergebnisse lieferte.

Die Spannkabelkräfte können durch strukturdynamische Methoden unter Berücksichtigung der Biegesteifigkeit bis zu einer Genauigkeit  $< 2\%$  ermittelt werden.

Die numerische Modellierung des Spannkabels führt bei Annahme einer eingespannten Lagerung und der Berücksichtigung der Biegesteifigkeit zu einer guten Übereinstimmung mit Messergebnissen, wie dies Messungen an

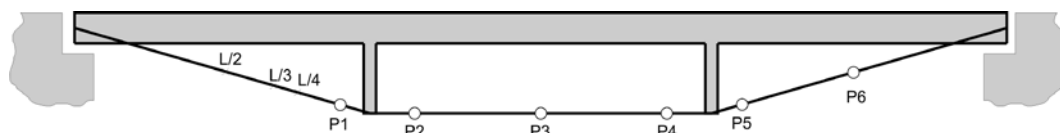


Bild 4-3. Mögliche Messanordnung zur Bestimmung der Eigenfrequenzen an externen Spannkabeln



der Ennsbrücke zeigten. Die Annahme der eingespannten Lagerung ist auch für externe Spannglieder, welche über Umlenksättel geführt werden, gültig.

## 5. Strukturidentifikation als Basis der Lebensdauerbewertung

### 5.1 Monitoringdaten zur Strukturidentifikation

Ziel ist es, Veränderungen unbekannter Natur in einem Brückentragwerk frühzeitig und rechtzeitig für eine kosteneffiziente Erhaltungsplanung zu erkennen und deren Auswirkungen zu quantifizieren [8]. Obwohl gegenwärtig die Erhaltungsplanung überwiegend auf visuell ermittelten Zustandsklassen beruht, geht der Trend in Richtung Optimierung der Lebenszeit und Minimierung der mit einem Tragwerk verbundenen Lebenszykluskosten für Planung, Bau, Erhaltung und Betrieb. Hierzu ist sowohl eine quantifizierbare Bewertung des aktuellen Erhaltungszustandes sowie der ablaufenden Degradationsprozesse erforderlich, um so auch den zukünftigen Zustand ausreichend genau vorhersagen zu können. Eine gut geeignete Möglichkeit der objektiven Bauwerksbewertung stellt der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ , wie im Eurocode II festgelegt, dar. Dieser beschreibt bekanntlich das vorhandene Sicherheitsniveau und ermöglicht somit einen objektiven Vergleich eines Tragwerkes mit anderen Bauwerken im Bestand sowie mit normativen Vorgaben.

Durch die steigende Leistungsfähigkeit der EDV-Systeme konnten in den letzten Jahren deutliche Fortschritte im Bereich der Zuverlässigkeitsanalyse von Stahlbetonstrukturen verzeichnet werden, wodurch nun die realitätsnahe Bewertung bestehender Strukturen möglich ist [22, 23]. Die Qualität der getroffenen Aussage bleibt trotz massiver Weiterentwicklungen im Bereich der Systemanalyse von der Qualität der Eingangsdaten, sowohl auf der Widerstands- als auch der Einwirkungsseite und der Interpretation eines Fachexperten abhängig.

Globale Monitoring-Systeme stellen die notwendige Datenbasis für die Identifikation, Lokalisation und wenn möglich auch Quantifikation von Schäden als Grundlage für Entscheidungen des Erhaltungsmanagements zur Verfügung. Die Auswertung der ermittelten Messdaten wird allerdings durch die äußerst komplexen Zusammenhänge zwischen mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Struktur und beobachteter Strukturantwort erschwert. Dies gilt besonders für das Material Konstruktionsbeton, dessen Eigenschaften als Hybridbaustoff der Materialien Beton und Stahl besonders schwer zu erfassen sind. Die Problemfelder umfassen die häufig unbekanntes und meist schwer erfassbaren Lagerungsbedingungen – dies stellt vor allem für die Auswertung modaler Messdaten ein Hindernis dar – sowie direkter struktureller/geometrischer Nichtlinearitäten. Weiters sind Nichtlinearitäten im

Verhalten der verwendeten Materialien sowie deren Änderungen im Zeitverlauf wie z.B. Kriechen oder Schwinden des Betons oder auch Relaxation von Spannstählen zu berücksichtigen.

Temperaturschwankungen im Tagesverlauf und Jahreszyklus sind abhängig vom Bauwerkstyp ebenfalls von großer Bedeutung, da sie signifikanten Einfluss auf das Bauwerksverhalten haben können, und die durch ein Monitoringsystem erfassten Messgrößen beeinflussen [24; 25].

Aus der Vielfalt der genannten Einflussgrößen auf die Auswertung von globalen Monitoringdaten und die Systemidentifikation kann klar geschlossen werden, dass die praktische Anwendbarkeit für den Bauwerkseigner stark eingeschränkt ist, sofern all diese Zusammenhänge durch den Anwender berücksichtigt werden müssen [8]. Der Anspruch anwendungsorientierter Systemidentifikation führt somit zur Forderung wesentlicher Vereinfachungen in der Handhabung und Auswertung. Die Messung selbst muss mit einfachen Mitteln möglich sein, möglichst wenige und kostengünstige Sensoren vorsehen und für die Installation und Durchführung der Messung einen möglichst geringen Eingriff in den Betrieb und die Struktur selbst zur Folge haben.

Die Auswahl von für eine gewählte Aufgabenstellung geeigneten Monitoringgrößen hängt nicht nur von ableitbaren kausalen oder statistischen Zusammen-

hängen zwischen Beobachtungs- und Identifikationsgröße, sondern auch von der Verfügbarkeit an Sensoren ab.

Für existierende Strukturen bieten sich vor allem mobile Sensoren wie beispielsweise Beschleunigungsaufnehmer an, für neue Bauwerke hingegen können auch integrale Sensorsysteme, wie zur Messung von Einflusslinien für Auflagerreaktion erforderlich [26], eingesetzt werden. Die Anzahl der notwendigen Sensoren lässt sich über statistische Verfahren für ein vorgegebenes Konfidenzniveau ableiten [27]. Für bestmögliche Ergebnisse der eingesetzten Sensoren empfiehlt sich eine Positionierung entsprechend der Sensitivitäten zwischen Beobachtungsgröße an Position  $x_1$  und möglicher/erwarteter Schaden an Stelle  $x_2$ .

Die eigentliche Systemidentifikation als aufbauendes System sollte zu einem hohen Grad automatisiert ablaufen und ein Minimum an Modellierungsaufwand benötigen, um neben der Praxistauglichkeit auch die notwendige Objektivität der Ergebnisse sicherzustellen [26, 27].

## 5.2 Beispiel eines anwendungsorientierten Identifikations-systems - MOBEL

Im Rahmen der Dissertation von Hr. Dr. Roman Wendner wurde ein modal basiertes Schadensidentifikationsverfahren entwickelt [8]. Bild 5-1 gibt einen Überblick über die wesentlichen Elemente und den Aufbau des nachfolgend dargestellten Verfahrens.

### 5.2.1 Grundkonzept

Das Grundkonzept des Identifikationsverfahrens MOBEL basiert auf einer pseudo-statischen Betrachtung gemessener Schwingungsformen. Durch diesen Ansatz wird es möglich, modale Informationen für die Systemidentifikation heranzuziehen, ohne das Eigenwertproblem lösen zu müssen, welches äußerst sensitiv auf die schwer erfassbaren geometrischen Randbedingungen reagiert.

Durch Umformung der homogenen Bewegungsgleichung (5.1) erhält man das generalisierte Eigenwertproblem (5.2) nach Clough und Penzien [28].

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\vec{x}} + \mathbf{K} \cdot \vec{x} = 0 \quad (5.1)$$

$$\mathbf{K} \cdot \vec{\phi} = \omega^2 \cdot \mathbf{M} \cdot \vec{\phi} \quad (5.2)$$

mit:

$\omega$  = betrachtete Kreisfrequenz,

$\vec{\phi}$  = zugehörige Schwingungsform

Neben ihrer dynamischen Bedeutung kann (5.2) auch auf eine statische Situation übertragen werden. Die rechte Seite beschreibt in diesem Fall die Trägheitskräfte, die auf ein System einwirken und mit den für die Verformung  $\vec{\phi}$  bei Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{K}$  notwendigen Kräften im Gleichgewicht stehen. Die gemessene Schwingungsform kann somit als berechnete Biegelinie abgebildet werden.

Betrachtet man eine allgemeine schwingende Stab-Struktur im Raum, ergeben sich pro Knoten sechs Freiheitsgrade – drei Verschiebungen und drei Rotationen. Die Berechnung der mit einer

bestimmten Schwingungsform verbundenen Trägheitskräfte und Momente macht die Berücksichtigung der Massenträgheit für die translatorischen Komponenten sowie der Rotationsträgheit für die rotatorischen Komponenten erforderlich.

Ist die Geometrie einer Struktur bekannt bzw. kann sie genau genug über die theoretischen Querschnittswerte beschrieben werden, so lassen sich die Trägheitskräfte aus der Verschiebung der Knoten durch Gleichung (5.3) berechnen.

$$\vec{F}(x) = \omega^2 \cdot m(x) \cdot \vec{\phi}^t(x) \quad (5.3)$$

mit

$\vec{\phi}^t(x)$  = modale Knotenverschiebungen in die drei Achsen an Stelle  $x$  und

$m(x) = \int \rho(x) dA dx$  = Masse an Position  $x$

Die Ermittlung der Anteile aus der Rotationsträgheit erfolgt in analoger Form entsprechend Gleichung (5.4):

$$\vec{F}^r(x) = \omega^2 \cdot \mathbf{J}(x) \cdot \vec{\phi}^r(x) \quad (5.4)$$

$\vec{\phi}^r$  = Knotenverdrehungen in die drei

Koordinatenachsen an Stelle  $x$  und

$\mathbf{J}(x)$  = (Massen-)Trägheitstensor an Position  $x$

Die quasi-statische Betrachtung von Eigenformen bzw. allgemeinen Schwingungsformen entsprechend Gleichung (5.1-2) erlaubt die Verwendung beliebiger gemessener Schwingungszustände für die Strukturidentifikation – nicht nur Eigenformen mit den zugehörigen Eigenfrequenzen, da der Zusammenhang zwischen Trägheitskräften bei maximaler dynamischer Auslenkung, Steifigkeit und

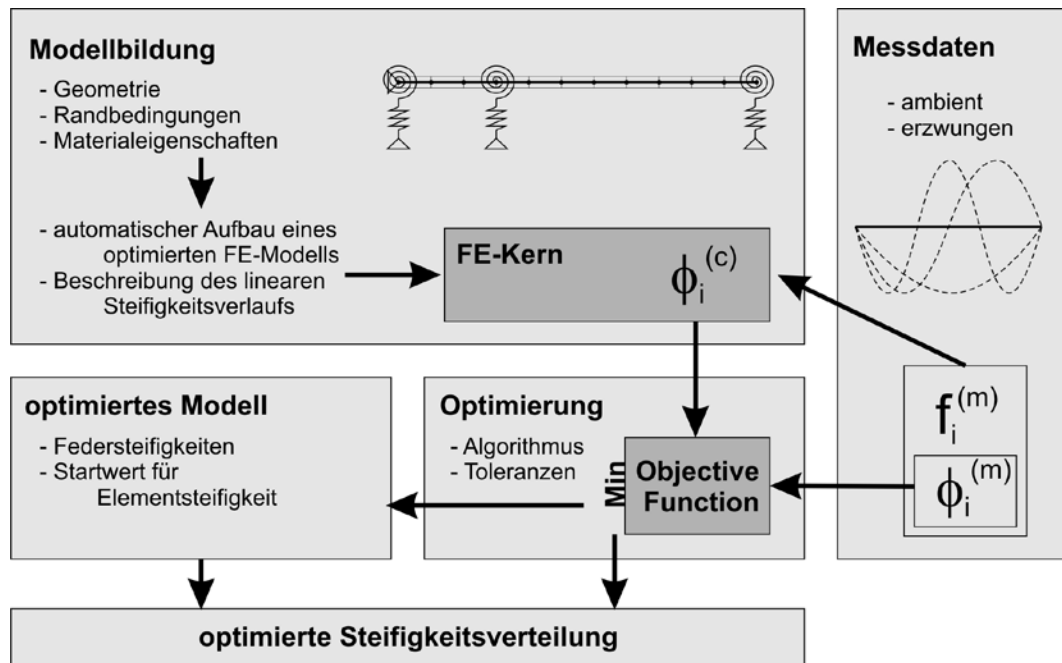


Bild 5-1. Aufbau von MOBEL, aus [8]

statischer Auslenkung bei äquivalenter statischer Belastung allgemein gültig ist [8]. Es ist somit möglich, sowohl ambient gemessene Modeshapes für die Identifikation heranzuziehen, als auch Messungen unter erzwungener Erregung („forced vibration“) zu verwenden. Durch die gezielte Erregung in einer Eigenfrequenz der Struktur zeigt die Schwingungsantwort eine dominante Schwingungsform und ein stabiles und „sauberes“ Signal. Zusätzlich können durch Ausnutzung der dynamischen Vergrößerung bei Erregung in Resonanz mit vertretbarem Energieaufwand beachtliche Amplituden für Strukturen mit geringer Dämpfung erzielt werden, wodurch der Messbereich der Sensoren besser ausgenutzt wird und folglich die Qualität der gemessenen Schwingungsform steigt.

Der Vorteil von modalem Model-Up-

dating, mit nur einigen wenigen Messgrößen wie Eigenfrequenzen eine Systemidentifikation durchzuführen, geht somit zugunsten höherer Robustheit verloren. Da jedoch für eine Identifikation weder Randbedingungen wie Lagersteifigkeiten noch Materialeigenschaften a priori bekannt sein müssen, können auch Temperatureffekte, die deutliche Verschiebungen der Eigenfrequenzen bewirken und somit das Updating über Eigenfrequenzen signifikant erschweren, bei dem gewählten Ansatz im ersten Schritt vernachlässigt werden. Da für die Durchführung der Identifikation mit MOBEL keine Vergleichsmessungen („baseline“) oder Kalibrierungen des Modells im ungeschädigten Zustand erforderlich sind, kann die Berücksichtigung der Temperatureffekte auf die Interpretation der identifizierten Steifigkeitsverläufe und

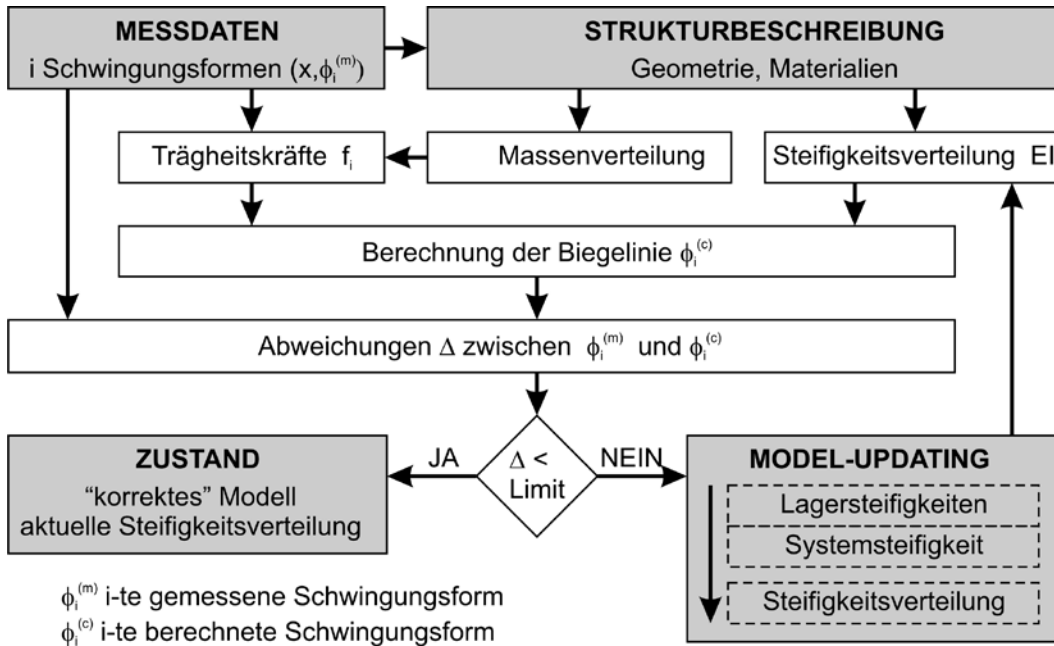


Bild 5-2. Aufbau des Identifikationsalgorithmus MOBEL, aus [8]

Randbedingungen, welche den Gesamtzustand zum Zeitpunkt der Messung widerspiegeln, verschoben werden.

Die Forderung nach hoher Robustheit bedeutet für Optimierungsprozesse einen hohen Grad der Überbestimmtheit. Um diesen zu gewährleisten, ist es günstig, möglichst viele gemessene Schwingungsformen  $\Phi_i^{(m)}$  und diese mit möglichst hoher Messdichte für die Identifikation zur Verfügung zu haben. Durch entsprechende Formulierung der Zielfunktion nach dem Prinzip eines „least-square-curvefits“, in welchen eine beliebige Anzahl an Messpunkten eingehen kann, ist diese Forderung erfüllt.

### Steifigkeitsmatrix

Entsprechend der getroffenen Einschränkung auf gerade Durchlaufträger reduziert sich der Umfang an Eingangs-

parameter neben der Bereitstellung der gemessenen Schwingungsformen bestehend aus Positionierung entlang der Achse, Amplitudenwerten und zugehörigen Frequenzen im Wesentlichen auf die Eingabe der Feldweiten, sowie der Querschnittsgeometrie. Diese dient zur Abschätzung der schwingenden Masse und erlaubt weiters eine günstige Wahl der Startwerte für die Steifigkeitsverteilung.

Da während des automatischen Aufbaus des Modells bereits die Sensorpositionen bekannt sind, können die Knoten des FE-Rasters den Messpunkten und Auflagerpunkten angepasst werden, womit Ungenauigkeiten durch Interpolation bei der Bildung der Zielfunktion der Optimierung („Objective Function“) vermieden werden können. Eine weitere Verfeinerung des FE-Netzes ist im

Allgemeinen nicht sinnvoll, da zwischen den verfügbaren Messpunkten keine Information über das Strukturverhalten vorliegt und dieses über den linearen Steifigkeitsverlauf und einen linearen Verlauf der Trägheitskräfte zwischen den Elementknoten ausreichend genau beschrieben werden kann.

Für eine gute Abbildung des Steifigkeitsverlaufs und vor allem korrekte Lokalisation und Quantifikation von Schäden sollten in etwa zehn Stützpunkte je Brückenfeld vorgesehen werden [8].

### Abbildung der Randbedingungen

Die Beschreibung der Randbedingungen eines Systems hat naturgemäß hohen Einfluss auf die Ergebnisse der Berechnungen. Dies gilt umso mehr für dynamische Problemstellungen (vor allem für die Lösung des Eigenwertproblems), aber auch für die hier vorgeschlagene quasi-statische Betrachtung. Aus diesem Grund werden durch MOBEL automatisch für jeden Auflagerpunkt Translationsfedern und Rotationsfedern vorgesehen, deren Parameter im Rahmen der Steifigkeitsidentifikation von deutlich zu hoch gewählten Startwerten ausgehend mitoptimiert werden, wodurch keine Notwendigkeit zur manuellen Abschätzung der Randbedingungen besteht.

### Massenmatrix

Neben der Beschreibung der Systemsteifigkeit einer Struktur ist für dynamische Berechnungen die korrekte Be-

schreibung der Massenverteilung ebenso von großer Bedeutung. Im Rahmen der Finiten-Elemente-Modellierung bedeutet dies den Aufbau einer geeigneten und realitätsnahen Massenmatrix  $\mathbf{M}$  bestehend aus auf Knoten konzentrierte Massen und Massenträgheitsmomente, welche direkt in das Eigenwertproblem eingehen. Theoretisch ist die Herleitung des kompletten Trägheitstensors erforderlich, um die einer Schwingungsform zugeordneten Trägheitskräfte vollständig berechnen zu können. Betrachtet man allerdings ausschließlich niedrige Eigenformen, so können nach [29] die Rotationsanteile vernachlässigt werden, und es ergibt sich nachfolgende vereinfachte Formulierung für die Trägheitskräfte:

$$\vec{f}_i^{(m)} = \mathbf{M} \omega^2 \vec{\Phi}_i^{(m)} \quad (5.5)$$

mit

$\mathbf{M}$  = Diagonalmatrix der auf die Knoten konzentrierten Massen

$\vec{f}_i^{(m)}$  = Vektor bekannter Stützpunkte der verteilten Trägheitslast

Die Aufteilung der entlang der Struktur verteilten Massen erfolgt bei konstantem Querschnitt über die Einflusslänge jedes Knotens. Für eine reale geometrische Voutung kann die Aufteilung entsprechend dem für die Belastung eines Elementes mit einer Trapezlast ermittelten Verhältnis für die linke und rechte Randschnittkraft erfolgen. Wird im Rahmen der Schwingungsmessung erzwungene Erregung eingesetzt, so muss in der Regel auch das Eigengewicht des

Schwingungsgenerators als Zusatzmasse berücksichtigt werden.

### 5.2.2 Berechnung der Strukturantwort

Nach erfolgter Generierung des FE-Modells (Knoten, Stäbe, Lager), welche automatisch auf Basis der Anwenderangaben und des für die Erfassung der Schwingungsformen gewählten Messrasters erfolgt, wird die Strukturantwort für jede gemessene Schwingungsform getrennt berechnet.

Die Rechenschritte hierzu gliedern sich in:

- Berechnung der verteilten Trägheitsbelastung
- Übertragung auf Randschnittkräfte der Elemente nach Gleichung
- Lösen der Steifigkeitsgleichungen
- Extraktion der den gemessenen Amplitudenwerten entsprechenden statischen Knotenverschiebungen.

Folglich erhält man für jede gemessene ( $m$ ) Schwingungsform  $\vec{\Phi}_i^{(m)}$  eine korrespondierende berechnete ( $c$ )  $\vec{\Phi}_i^{(c)}$ , die, falls die modellierte Struktur der realen entspricht, identisch sein müssen.

Selbstverständlich erlaubt das an die Anforderungen des quasi-statischen Ansatzes angepasste FE-Modell nicht nur die Berechnung der den Schwingungsformen entsprechenden Biegelinien bei Belastung mit den gemessenen Trägheitskräften, sondern kann auch für jeden weiteren statischen oder quasi-statischen Lastfall herangezogen wer-

den. Im Rahmen der Identifikation kann folglich auf alle im Modell abgebildeten Systemgrößen zurückgegriffen werden, womit zusätzlich zu den dynamischen Informationen beispielsweise eine statische Probelastung bei Kenntnis der Verschiebung an einem bestimmten Punkt in der Optimierung berücksichtigt werden kann.

### 5.2.3 Objective Function des nicht-linearen Optimierungsproblems

Der eigentliche Kern von MOBEL ist die Optimierung der unbekannt Systemparameter (Basisvariablen der Optimierung, hier: Stützpunkte der Steifigkeitsverteilung). Wie bereits beschrieben, liegen beim Verfahren MOBEL  $i$  gemessene Schwingungsformen  $\vec{\Phi}_i^{(m)}$  mit korrespondierenden berechneten Biegelinien  $\vec{\Phi}_i^{(c)}$  vor. Eine optimale Wahl der Basisvariablen bedeutet demnach eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den  $i$  Paaren an Vektoren.

Die Zielfunktion ergibt sich, wie für die Anpassung von Kurven üblich, über die Summe der Abweichungsquadrate. Obwohl durch die zusätzliche Berücksichtigung der ersten beiden Ableitungen der Kurven keine zusätzliche Information gewonnen werden kann, erfolgt dennoch eine Betonung der Form innerhalb der Objective Function, welche sich günstig auf die Systemidentifikation auswirkt. Die Zielfunktion  $f_i(\vec{x})$  der Optimierung kann für jede verfügbare Schwingungsform  $i$  in



Form von (5.1-6) angeschrieben werden. Die Gewichtungsfaktoren  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$ , und  $\alpha_2$  ermöglichen es, den Einfluss der Anteile aus Verschiebung, Steigung und Krümmung innerhalb der Zielfunktion und somit die Betonung der Form zu variieren. Für die Bildung der Objective Function werden die tatsächlich gemessenen beziehungsweise berechneten Auslenkungen und nicht auf „1“ normierte Werte herangezogen.

$$f_i(\vec{x}) = \alpha_0 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}_i + \alpha_1 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}'_i + \alpha_2 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}''_i \quad (5.6)$$

$$\text{mit } \vec{\Phi}'_i = \frac{d\vec{\Phi}_i}{dx}; \quad \vec{\Phi}''_i = \frac{d^2\vec{\Phi}_i}{dx^2}$$

$\Delta \vec{\Phi}_i, \Delta \vec{\Phi}'_i, \Delta \vec{\Phi}''_i$ , = Vektor der Abweichungen in der  $i$ -ten Schwingungsform bzw. deren Ableitungen nach dem Ort

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ ,  $K$  = Gewichtungsfaktoren zur Betonung der Form

Kombiniert man nun alle  $i$  vorhandenen Schwingungsformen, so lässt sich das gesamte Optimierungsproblem als Minimierung der Multiobjective Function nach Gleichung (5.7) beschreiben. Der zusätzliche Faktor  $\beta_i$  erlaubt es, die  $i$  Messungen entsprechend ihrer jeweiligen Qualität zu gewichten.

$$\min_{\vec{x}} \sum_i \beta_i f_i(\vec{x}) = \min_{\vec{x}} \sum_i \beta_i (\alpha_0 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}_i + \alpha_1 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}'_i + \alpha_2 \Delta \vec{\Phi}_i^T \Delta \vec{\Phi}''_i) \quad (5.7)$$

mit  $\beta_i$  = Gewichtungsfaktoren für den Beitrag der  $i$  Schwingungsformen.

Da durch die Gewichtungsfaktoren stark steuernd in die Optimierung eingegriffen werden kann, sollten sie nur

mit äußerster Vorsicht verändert werden, und sind daher standardmäßig auf 1 gesetzt. Sollen im Rahmen der Optimierung neben Schwingungsformen zusätzliche Messgrößen berücksichtigt werden, kann die Multiobjective Function nach Gleichung (5.7) sinngemäß für alle weiteren Beiträge erweitert werden. In diesem Fall sollte durch geeignete Wahl des  $\beta$ -Faktors ein den Beiträgen aus den Schwingungsformen äquivalenter Anteil an der Zielfunktion sichergestellt werden, um einen ausgewogenen und stabilen Optimierungsprozess sicherzustellen [8].

## 5.2.4 Optimierungsstrategie

Die Identifikation einer Steifigkeitsverteilung in einer Struktur ist eine komplexe Aufgabenstellung, die durch zahlreiche gegenseitige Abhängigkeiten unter den unbekannt Systemgrößen charakterisiert ist. Dies gilt vor allem für den Fall, dass mit der Steifigkeitsverteilung auch die Randbedingungen in Form der Federsteifigkeiten bestimmt werden sollen.

Die gleichzeitige Optimierung aller Größen ohne ausreichend gute Wahl für die Startwerte der Optimierung ist allerdings kaum möglich. Aus diesem Grund wurde eine iterative zweistufige Optimierungsstrategie, wie in Bild 5-2 ersichtlich, gewählt.

Im ersten Optimierungsschritt wird ein Grundwert der Steifigkeit des Überbaus gemeinsam mit den Federsteifigkeiten der Lager als zu optimierende Größen (Basisvariablen) aufgefasst, da diese

Größen einen dominanten Einfluss auf die Zielfunktion nach (5.6) haben. Ausgehend von deutlich zu hoch gewählten Startwerten für alle Optimierungsgrößen, welche eine objektive und einfache Wahl darstellen, werden je Lager die Steifigkeiten der Weg- und Drehfedern optimiert. Gleichzeitig erfolgt die Anpassung der Steifigkeit des Überbaus, welche über eine einzige Unbekannte beschrieben wird. Um auch geometrische Steifigkeitsänderungen entlang der Struktur, wie Voutungen berücksichtigen zu können, werden die für die Ermittlung der Massenverteilung ohnehin vorzugebenden Querschnittsgeometrien für die Schätzung der relativen Steifigkeitsverteilung entlang der Struktur herangezogen.

Aus den Ergebnissen dieser ersten Optimierung erhält man eine gute Schätzung der Startwerte für den eigentlichen Optimierungsprozess, indem nur mehr die relativen Steifigkeitsänderungen sowohl der Elemente als auch der Lager optimiert werden müssen. Die ursprüngliche Annahme einer konstanten nur von der Querschnittsgeometrie abhängigen Steifigkeit entlang der Struktur führt allerdings für geschädigte Bauwerke zu einer falschen/schlechten Identifikation der Lagersteifigkeiten, welche wiederum die Ermittlung der Steifigkeitsverteilung beeinflussen. Die im zweiten Optimierungsschritt erhaltene Verteilung stellt jedoch bereits eine gute Annäherung dar, die benutzt werden kann, um eine treffendere Schätzung der Lagersteifigkeiten

zu erhalten, mit welcher sich wiederum eine Verbesserung der Steifigkeitsverteilung erzielen lässt.

Die Umsetzung des Optimierungsproblems innerhalb des Algorithmus MOBEL basiert auf der durch MATLAB zur Verfügung gestellten Prozedur „lsqcurvefit“, die die Fähigkeit besitzt nichtlineare Probleme mit Randbedingungen zu lösen.

Für die vorliegende Problemstellung hat sich allerdings gezeigt, dass die Objective Function nach Gleichung (5.7) zumindest von einer Seite annähernd monoton fallend ist, sodass bei geeigneter Wahl der Startwerte eine stabile Optimierung mit Ergebnis in der Nähe des globalen Minimums zu erreichen ist.

### **5.3 Monitoring und Strukturidentifikation an einer Stahlbeton-Dreifeldbrücke**

Bei der in Bild 5-3 dargestellten Brücke handelt es sich um eine einfache Dreifeldbrücke bestehend aus einer Platte mit konstantem Querschnitt von  $9,55 \times 0,60 \text{ m}^2$  und Feldweiten von 10,0 m, 13,0 m und 10,0 m. Die Lager spreizung quer zur Bauwerksachse beträgt 6,0 m. Die 7,5 m breite Fahrbahn ist asymmetrisch zur Brückenachse angeordnet, um auf einer Seite Platz für einen Gehweg zu schaffen. Die Randbalken sind entsprechend Bild 5-3 am nördlichen Rand 1,70 m und am südlichen Rand 0,75 m breit. Dies bewirkt eine geringfügig ausmittige Belastung der Platte

durch Eigengewicht und Verkehr und hat ebenfalls Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten. Die Lagerachsen verlaufen rechtwinklig zur Bauteillängsachse, welche im Grundriss keine Krümmung aufweist. In der Vertikalen ist eine Kuppenausrundung mit  $R = 300$  m ausgeführt. Das für die Entwässerung notwendige Quergefälle ist über die gesamte Länge des Tragwerks konstant und beträgt 2% von Nord nach Süd.

Die Lagerung erfolgt in den beiden äußeren Lagerachsen über Elastomerlager und in den Pfeilerachsen über Stahl-Linienkipplager. Die Pfeiler der Lagerachsen B und C sind 6,5 m hoch. Von ihrem Fußpunkt geht eine befestigte Böschung bis zur Widerlagerbank aus, auf welcher die Elastomerlager auf 30 cm hohen Beton-Lagersockeln ruhen. Die Lager der Pfeiler wurden ohne Lagersockel ausgeführt und halten weniger als 30 cm Abstand vom Rand der Pfeiler. Über die gesamte Länge der Brücke ist zu beiden Seiten der Fahrbahn eine Leitplanke und auf beiden Randbalken im Abstand von 0,20 m zur Außenkante ein Geländer montiert (siehe Bild 5-3).

Im Jahr 1997, 17 Jahre nach der Fertigstellung, wurden erstmals signifikante Risse am Tragwerk festgestellt und in der Hauptprüfung des Jahres 2001 durch denselben Prüfer bestätigt. Die Risse verlaufen laut Prüfbericht in Mitte des Hauptfeldes parallel zum Gleiskörper. Seither scheint der Bauwerkszustand konstant zu sein, da keine weiteren Ver-

änderungen im Rissbild oder sonstigen Bauwerkszustand dokumentiert wurden.

Die vollständige Aufnahme des Rissbildes auf der visuell zugänglichen Plattenunterseite stellt die entscheidende Inspektionsgrundlage dar, aufgrund derer der Zustand von Bauwerken dieses Typs ermittelt wird. Derartige Untersuchungen bieten allerdings nur eine eingeschränkte Aussage über das gesamte Tragverhalten, da wesentliche Bereiche wie die der Stütz-momente nicht erfasst werden können.

Aufgrund der nach wie vor hohen Bedeutung der visuellen Inspektion – auch zur Verifikation und Interpretation der Identifikationsergebnisse – wurde das aktuelle Rissbild möglichst detailliert erfasst.

Das erhaltene Rissbild zeigt überwiegend Biegezugrisse an der Plattenunterseite normal zur Tragwerkslängsachse beziehungsweise parallel zum Gleiskörper. Die Rissbreite liegt für den Großteil der Risse um oder unter 0,1 mm, wobei einzelne Risse mit bis zu 0,3 mm festgestellt wurden. Insgesamt weist das Rissbild relativ gerade verlaufende Risse parallel zum Gleiskörper in einem regelmäßigen Abstand von ca. 1 m auf. In Mitte des Hauptfeldes ist zusätzlich eine Häufung an feinen Rissen zu beobachten, welche eher in der östlichen Feldhälfte konzentriert ist. Neben dem Hauptfeld können die größeren regelmäßigen Risse auch in den beiden Außenfeldern beobachtet werden. Eine signifikante Verdichtung mit feinen Rissen ist nur in der östlichen Hälfte des östlichen Feldes ersichtlich. Nur wenige



Bild 5-3. Ansicht der Überführung über die Bahnstrecke Wien - Laa, aus [8]

Risse weichen von der Hauptrissrichtung normal zur Tragwerkslängsachse ab. Von diesen sind vor allem Risse parallel zum Tragwerk im Bereich der Lagerspreizung der Achse B hervorzuheben, welche ebenfalls als Biegezugrisse einzustufen sind und der erwarteten Plattentragwirkung entsprechen.

Insgesamt legt das beobachtete Rissbild eine deutliche Rissbildung auch an der nicht zugänglichen Plattenoberseite nahe, insbesondere da für einen Durchlaufträger dieses Typs und dieser Abmessungen das Stützmoment betragsmäßig das Feldmoment übertrifft. Berücksichtigt man Informationen aus den verfügbaren Bewehrungsplänen, so ergibt sich für eine äquivalente Bewehrungsführung für die Plattenunterseite in Feldmitte und Plattenoberseite im Stützbereich und folglich ein äquivalenter Ausnutzungsgrad der vorhandenen Biegezugbewehrung. Es ist somit mit einem dem der Plattenunterseite ähnlichen Rissbild an der Plattenoberseite zu rechnen.

Im Fall der vorliegenden Dreifeldbrücke wurden zur Minimierung des Aufwands ausschließlich die Elastomerlager auf den Widerlagerbänken gegen Messlager getauscht und die Auflagerreaktionen der beiden mittleren Lagerachsen ausschließlich während des Lagerwechsels gemessen.

Zur Ermittlung der modalen Eigenschaften – Eigenformen und Eigenfrequenzen – der Dreifeldbrücke kam ein mobiles System unter Einsatz von Beschleunigungsaufnehmern zum Einsatz. Die Ermittlung der natürlichen Eigenfrequenzen erfolgte bei ambierter Erregung. Für eine möglichst saubere Erfassung der Eigenformen wurde Zwangserregung in Resonanz eingesetzt.

Die mittels Beschleunigungssensoren aufgezeichneten Daten bei ambierter Erregung wurden über die Fast-Fourier-Transformation (FFT) in den Frequenzbereich transformiert, wo die ersten beiden vertikalen Eigenfrequenzen mit 8,53 Hz und 14,6 Hz abgelesen werden konnten.

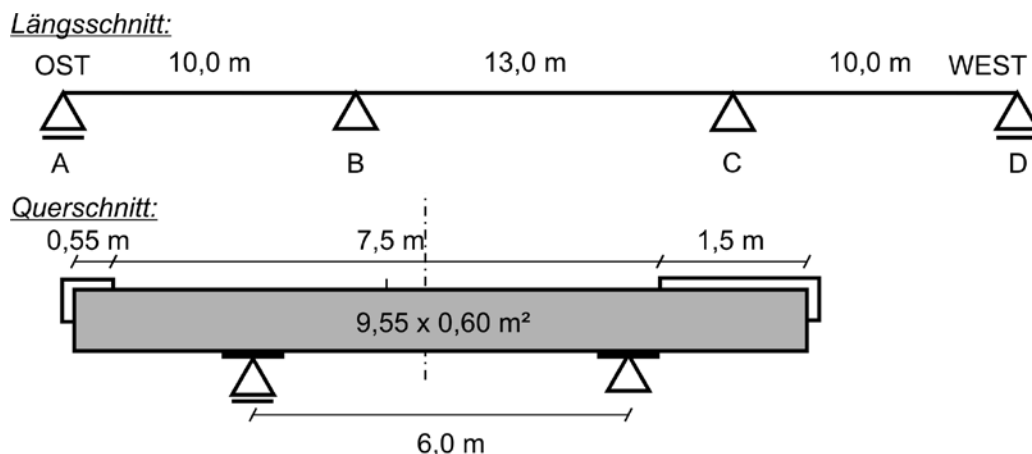


Bild 5-4. Statisches System und Schnitt der Testbrücke, aus [8]

Aufgrund des hohen Automatisierungsgrades von MOBEL mussten für die Auswertung mittels MOBEL, abgesehen von den nicht nachbearbeiteten modalen Eingangsdaten ausschließlich nachfolgende Vorgaben zur Geometrie und grobe Schätzungen für die Startwerte der Basisvariablen bereitgestellt werden:

- Lagerungspunkte (mit Weg- und Drehfedern) befinden sich an Positionen 0 m, 10 m, 23 m und 33 m.
- Startwert der Wegfedern mit 10.000 MN/m und der Drehfedern mit 1000 MNm/rad
- Querschnittsgeometrie mit 9,55 m x 0,60 m
- Startwert für das E-Modul der Durchlaufplatte mit 40 GPa
- die Gewichtungsfaktoren innerhalb der Zielfunktion nach Gleichung (5.7) wurden entsprechend der vorhandenen Datenqualität mit  $\alpha_0 = 1$ ,  $\alpha_1 = 10$  und  $\alpha_2 = 1$  festgelegt. Die Gewichtungsfaktoren  $\beta_i$  der einzelnen Schwingungsformen entsprechen mit

$\beta_i = \beta = 1$  einer Gleichgewichtung.

Durch die insgesamt sechs verfügbaren Schwingungsformen, bestehend aus je 34 Amplitudenwerten, konnte trotz mehrerer offensichtlicher, nicht händisch korrigierter Messfehler, ein Steifigkeitsverlauf identifiziert werden, welcher in Übereinstimmung mit dem Rissbild aus Bild 5-5 ist.

Bild 5-6 zeigt schematisch die durch die unterschiedlichen Verfahren der Systemidentifikation ermittelten Steifigkeitsverteilungen entlang der Brückenachse. Der identifizierte Verlauf beschreibt einen Steifigkeitsverlust von ca. 30 % in Mitte des Hauptfeldes. Dies deckt sich mit dem Rissbild, welches in diesem Bereich eine deutliche Rissbildung aufweist. Obwohl die Steifigkeitsverläufe in den Außenfeldern generell durch die Randbedingungen – Lagersteifigkeiten – beeinflusst sind, zeigen sich jedoch einheitlich ein geringer Steifigkeitsverlust um Position 7 m und ein relativ ausgeprägter Verlust an Biegesteifigkeit an Position

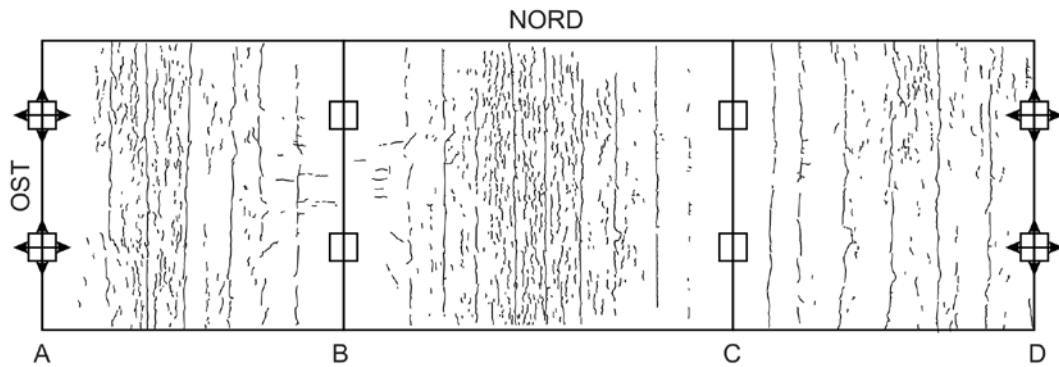


Bild 5-5. Digitalisiertes Rissbild der untersuchten Dreifeldbrücke, aus [8]

28 m. Das Ausbleiben deutlicherer Verluste, vor allem im östlichen Feld, ist vor allem auf die großteils nur unter 0,1 mm geöffneten Rissen zurückzuführen

Die durch alle angewandten Verfahren der Systemidentifikation bestimmten Verluste an Biegesteifigkeit von rund 40 % über dem östlichen Pfeiler und 30 % über dem westlichen Pfeiler kön-

nen durch das Rissbild nicht bestätigt werden, da dieses keine Aussage über die Rissbildung auf der Plattenoberseite zulässt. Eine Bestätigung der Identifikationsergebnisse beziehungsweise äquivalente Informationen können nur durch vertiefte lokale Untersuchungen, wie in Kapitel 4 beschrieben, erzielt werden.

Trotz zu beachtender Unsicherheiten

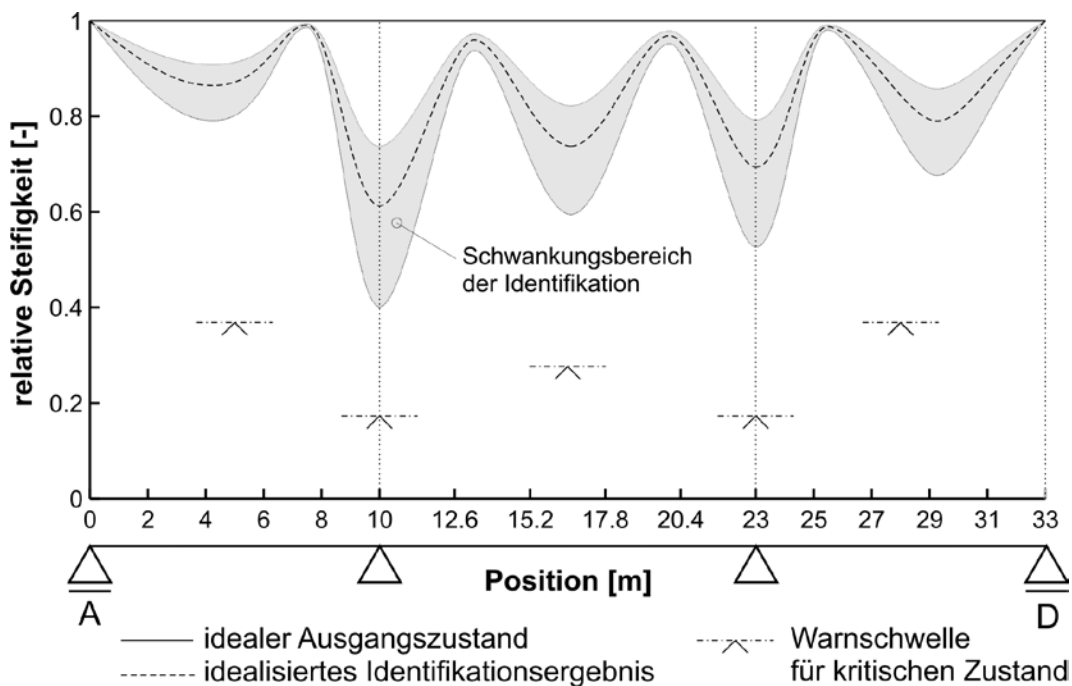


Bild 5-6. Schematische Darstellung der ermittelten Steifigkeitsverläufe inklusive Schwankungsbereich und Warnschwelle

in der Systemidentifikation steht durch den Einsatz von Monitoring-Systemen in Kombination mit Verfahren der Systemidentifikation ein wirksames Werkzeug zur laufenden quantitativen Kontrolle des Bauwerkszustandes zur Verfügung. Aus der bekannten Querschnittsgeometrie und Bewehrungsführung kann ein für die Tragwerkssicherheit kritisches Niveau je Querschnitt abgeleitet und abgeschätzt werden.

## **6. Erhaltungsmanagement aufbauend auf Monitoring und Strukturidentifikation**

### **6.1 Erhaltungsmanagement**

Zum Monitoring von Brücken gibt es zahlreiche Verfahren und Methoden, die eine kontinuierliche und auch langfristige Überwachung erlauben. Dabei finden neben den nicht oder nur teilweise zerstörenden Prüfverfahren auch baodynamische Verfahren zunehmend Anwendung. Werden die Ergebnisse des Monitorings in eine Strukturidentifikation einbezogen, wobei nicht nur das System sondern vielmehr auch die Degradationsprozesse der Baustoffe und damit der Struktur einbezogen werden, dann kann die Nutzungs- bzw. Lebensdauer verlässlicher bestimmt und die Erhaltungs- bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen besser geplant und umgesetzt werden. Notwendig ist auch die Erfassung und das Monitoring der Einwirkungen. Dabei können neben den Beton- und Stahldehnungen auch

die Verformungen und Verdrehungen der Lager aufgenommen werden [30]. Mit speziellen „weight in motion systems“ können die Achslasten ermittelt und damit eine gute Indikation für die Lasteinwirkungen abgeleitet werden [31]. In allen Fällen ist es wichtig die Bauteiltemperaturen zu messen, denn die Baustoffe und Betonstrukturen weisen ein temperaturabhängiges Verformungsverhalten auf.

Monitoringsysteme und Verfahren der Systemidentifikation zeigen zwar großes Potential für eine Optimierung der Bauwerkserhaltung, finden jedoch bisher in der Praxis nur in Ausnahmefällen Anwendung.

Trotz der Notwendigkeit für die Anwendung erweiterter Monitoringverfahren darf die Bedeutung der visuellen Inspektion nicht vernachlässigt werden, da diese die beachtliche Erfahrung vieler Prüffingenieure mit in die Beurteilung einbezieht und viele für die Erhaltung und vor allem die Dauerhaftigkeit wesentliche Problembereiche in einem frühen Stadium keinerlei Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften eines Tragwerks aufweisen. Schäden welche durch beschädigte Entwässerungselemente, schadhafte Fahrbahnübergänge, undichte Abdichtungen mitverursacht wurden, können visuell oder durch Abklopfen entdeckt werden. Erweiterte Verfahren können und sollen daher als Ergänzung zur visuellen Inspektion dienen, um

a) das Intervall zwischen den notwendigen Inspektionen zu verlängern und



- so Kosten zu sparen,
- b) Informationen über schwer oder nicht zugängliche Stellen des Tragwerkes zu erhalten und
- c) die Inspektion auf mögliche Problemzonen konzentrieren zu können.

Gerade der Informationsgewinn für nicht leicht zugängliche Stellen ist aufgrund der zunehmend Verwendung findenden Verkleidung und Isolierung von tragenden Bauteilen von großer Bedeutung.

Eine gute Übersicht über die Überwachungs-, Monitoring- und Strukturidentifikationssysteme findet man in den Betonkalender 2005, 2009 und 2010.

## 6.2 Abschätzung der Lebensdauer

Soll die Versagenswahrscheinlichkeit mathematisch beschrieben werden, so sind  $R$  (Widerstand) und  $S$  (Beanspruchung) die zentralen Größen. Die Grenze zwischen Versagen und Nicht-Versagen wird durch die Grenzzustandsgleichung  $G$  formuliert:

$$G = R - S \quad \begin{array}{l} G \text{ Grenzzustand} \\ R \text{ Widerstand} \\ S \text{ Einwirkung} \end{array} \quad (6.1)$$

Damit Gleichgewicht herrscht, muss der Widerstand größer als oder zumindest gleich groß wie die Einwirkung sein. Der Widerstand ist baustoffabhängig. Die Einwirkung beschreibt die Belastung auf den Baustoff bzw. die Konstruktion.

Die Lebensdauer beschreibt den Zeitabschnitt von der Bauausführung bis zum

Ende der Funktionsfähigkeit eines Bauwerkes. Eine Ingenieurkonstruktion ist so lange funktionstüchtig, als die Grenzzustände der Tragsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit und der Dauerhaftigkeit mit einer gewissen Sicherheit gegeben sind. Die dabei auftretende Problemstellung der Beurteilung der Sicherheit wird in den Eurocodes durch die Einführung von reduzierten Werten für den Sicherheitsindex  $\beta$  formuliert. Aufgrund der Erfahrungen mit gealterter Bausubstanz sollten am Ende der theoretischen Nutzungsdauer eines Bauwerks noch folgende Mindestwerte vorhanden sein:

	Bemessungszeitraum 1 Jahr		Gesamte Lebensdauer	
	$\beta$	$P_f$	$\beta$	$P_f$
Gebrauchstauglichkeit	3,0	$1,5 \cdot 10^{-3}$	1,5	$6,7 \cdot 10^{-2}$
Tragsicherheit	4,7	$1,3 \cdot 10^{-6}$	3,8	$7,2 \cdot 10^{-5}$

Tabelle 6.1 Zuverlässigkeit für Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit

In allen Fällen muss zur Beurteilung der Sicherheit eine Grenzzustandsfunktion definiert werden:

$$p_f = \int_{D_f} f(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1, dX_2, \dots, dX_n \quad (6.2)$$

Der Versagensraum  $D_f$  wird durch die Dichtefunktion der Versagenswahrscheinlichkeit  $f(X)$  mit den Basisvariablen  $X = (X_1, \dots, X_n)$  darstellt, wo  $g(X) < 0$  ist. Bei  $G = R - S = 0$  wird der n-dimensionale Raum  $X$  also in einen sicheren und

unsicheren Bereich unterteilt. Zur quantitativen Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit stehen probabilistische Verfahren und Computerprogramme *VaP* (ETH Zürich), *COSSAN* - 1996, *CALREL* - 1988, *FREET* bzw. *SARA* (Univ. Brünn bzw. BOKU Wien) [Novák, Rusina, Vořechovský (2003)] zur Verfügung.

Um zeitliche Veränderungen der Eigenschaften explizit zu beschreiben, wird die Grenzzustandsfunktion im Bereich der Widerstände durch zeitabhängige Basisvariablen  $XD(t)$  angeschrieben. Bei Konstruktionsbeton können dies zum Beispiel

- die Kriecheffekte,
- die Abnahme des Stahl- und Spannstahlquerschnittes durch korrosive Vorgänge,
- die Reduzierung des Haftverbundes,
- die vermehrte Rissbildung und damit die Auswirkungen auf die Verformung sein.

Nun kann auch die Lebenserwartung aufbauend auf die analytischen Ergebnisse oder die Messdaten durch eine Extrapolation über die Zeit erfolgen. Die Abnahme der Widerstandswerte oder das Ansteigen eines Schädigungspotentials kann dann unter Einbindung eines Brückenmonitorings mit einer Strukturidentifikation auf eine bestimmte Zeit (Lebensende) hochgerechnet werden. Die erforderliche Zuverlässigkeit im Endzustand sollte dann für die Tragsicherheit nach Hasofer und Lind noch mindestens einen Sicherheitsindex von  $\beta_{\min} = 3,8$

und für die Gebrauchstauglichkeit noch  $\beta_{\min} = 1,5$  aufweisen. Durch solche Abschätzungen der erforderlichen Zuverlässigkeit für eine bestimmte Lebensdauer kann der Zeitpunkt von Erhaltungsmaßnahmen wesentlich besser identifiziert werden.

Gratuliere der MPA Stuttgart zum 125-jährigen Jubiläum und wünsche dieser weltweit bekannten Prüfanstalt eine erfolgreiche Zukunft!

## 7. Literatur

1. Bergmeister, K.; Santa, U. (2004). Brückeninspektion und -überwachung. In: Betonkalender 2004. Teil 1, S. 409 - 440; Hrsg. K. Bergmeister, J.D. Wörner. Ernst & Sohn Verlag, Berlin.
2. Wenzel, H. (2009). Health Monitoring of Bridges, John Wiley & Sons.
3. Zilch, K., Weiher, H. and Gläser, C. (2009). Monitoring im Betonbau. Betonkalender 2009. K. Bergmeister, F. Fingerloos and J. D. Wörner. Berlin, Ernst und Sohn.
4. Strauss, A., Bergmeister, K., Wendner, R. and Hoffmann, S. (2009). System- und Schadensidentifikation von Betonstrukturen. Betonkalender 2009. K. Bergmeister, F. Fingerloos and J. D. Wörner. Berlin, Ernst und Sohn. Teil 2: 55-125.
5. Bergmeister, K., Strauss, A., D., N. and Pukl, R. (2007). Structural analysis and reliability assessment: SARA part I. Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure, SHMII-3, Vancouver, Canada.
6. Neves, L. A. C. and Frangopol, D. M. (2004). "Condition, safety, and cost profiles for deteriorating structures with emphasis on bridges." Reliability Engineering and System Safety 89: 185-198.
7. Frangopol, D. M., Strauss, A. and Kim, S. (2008). "Bridge Reliability Assessment Based on Monitoring." Journal of Bridge Engineering 13(3): 258-270.

8. Wendner, R. (2009). Modale Steifigkeitsidentifikation zur Zustandsbewertung von Strukturen aus Konstruktionsbeton. Institut für Konstruktiven Ingenieurbau. Wien, Universität für Bodenkultur. Dissertation.
9. Catbas, N. F., Zaurin, R., Frangopol, D. M. and Susoy, M. (2007). System reliability-based structural health monitoring with FEM simulation. Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure, SHMII-3, Vancouver, B.C., Canada.
10. Vockrodt, H. J., Feistel, D. and Stubbe, J. (2003). Handbuch Instandsetzung von Massivbrücken: Untersuchungsmethoden und Instandsetzungsverfahren. Basel, Birkhäuser.
11. Gragger, K. (2008). Auszug aus BAUT, Brückenflächen nach Baujahr 1950-2007.
12. Joris, J. P. (2002). Bern, Bundesamt für Straßen der Schweizerischen Eidgenossenschaft - Bereich Kunstbauten.
13. DIN (2003). Grundlagen der Instandhaltung. DIN 31051.
14. DIN (1999). Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen. Überwachung und Prüfung, Normenausschuß Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. DIN 1076.
15. RVS (1995). Überwachung, Kontrolle und Prüfung von Kunstbauten - Straßenbrücken. Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau, BmfwA. RVS 13.71.
16. Überwachung und Unterhalt der Kunstbauten der Nationalstrassen (2005). ASTRA-Richtlinie. Bern.
17. fib (2003). Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures. Task Group 5.1. Lausanne, fib - fédération internationale du béton.
18. Clough, R. and Penzien, J. (1993). Dynamics of structures. New York, McGraw-Hill.
19. SFB 477 (2000): Sicherstellung der Nutzungsfähigkeit von Bauwerken mit Hilfe innovativer Bauwerksüberwachung. TU Braunschweig.
20. Holst, A. (2008). Korrosionsmonitoring und Bruchortung vorgespannter Zugglieder in Bauwerken. 18. Dresdner Brückenbausymposium. Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 11. März 2008. J. Stritzke.
21. Vorwagner, A. (2005): Strukturdynamisches Verhalten externer Spannglieder. Diplomarbeit TU Graz.
22. Frangopol, D. M. and Liu, M. (2007). "Maintenance and management of civil infrastructure based on condition, safety, optimization, and life-cycle cost." Structure and Infrastructure Engineering 3(1): 29-41.
23. Bergmeister, K., Eichinger, E. M., Bonora, P., Cervenka, V., Kollegger, J., Novák, D., Pukl, R., Strauss, A. and Tepl, B. (2003). SARA structural analysis and reliability assessment, state-of-knowledge, technical background. Wien.
24. Peeters, B. (2000). System Identification and Damage Detection in Civil Engineering. Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven. Dissertation.
25. Wenzel, H. and Pichler, D. (2005). Ambient vibration monitoring. England, John Wiley & Sons Ltd.
26. Hoffmann, S. (2008). System identification by directly measured influence lines - A user orientated approach for global damage identification at reinforced concrete bridges. Wien, Universität für Bodenkultur. Dissertation: 149 Seiten.
27. Strauss, A., Frangopol, D. M. and Kim, S. (2008). "Statistical, Probabilistic and Decision Analysis Aspects Related to the Efficient Use of Structural Monitoring Systems." Beton- und Stahlbetonbau 103: 23-28.
28. Clough, R.; Penzien, J. (1993): Dynamics of structures. New York.
29. Maeck, J. (2003). Damage assessment of civil engineering structures by vibration monitoring. Faculteit Toegepaste Wetenschappen, Katholieke Universiteit Leuven.
30. Liebig, J.P.; Grünberg, J.; Hansen, M. (2009): Monitoring von Spannbetonbrücken - Auswirkung zunehmenden Schwerverkehrs. In: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 6, Berlin, S. 368 - 371.
31. Bogath, J.; Bergmeister, K. (1999): Ein neues Lastmodell für Straßenbrücken. In: Bauingenieur, Heft 6.



Ermittlung der Druckfestigkeit einer geschosshohen Mauerwand

Prof. Dr.-Ing. Bernd Hillemeier

*Universitätsprofessor für Baustoffe und Baustoffprüfung und  
Direktor des Instituts für Erhaltung und Modernisierung von  
Bauwerken, Technische Universität Berlin*

## **Baustoff + Messtechnik: 1 + 1 = 3**

Eins plus eins ist gleich drei: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile. Diese Metapher wird Aristoteles (384 - 322 v. Chr.) zugeschrieben, dem Schüler Platons, dem Begründer der abendländischen Wissenschaft, dem ersten großen Systematiker unter den Philosophen.

„Wissenschaft wird aus Tatsachen aufgebaut, genauso wie ein Haus aus Steinen aufgebaut werden kann. Aber eine Anhäufung von Tatsachen ist genauso wenig Wissenschaft wie ein Haufen von Steinen ein Haus ist“.[1]

Die Formel  $1 + 1 = 3$  bildet die meisten Dinge des Lebens ab. Die Geheimnisse des Erfolgs liegen im Zusammenspiel seiner singulären Potenziale.

Bei den Werkstoffen wird das durch die Bindungsarten augenscheinlich. Was hier die Welt zusammenhält, zeigt sich in den vier Bindungsarten, die die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe bestimmen: die Ionenbindung, die Metallbindung, die kovalente Bindung und die van-der-Waals Bindung.

Atome und Moleküle versuchen sich innerhalb des Werkstoffs nach dem Mi-

nimum ihrer Energie anzuordnen und streben nach Ordnung. Dabei gelten drei Grundregeln:

Erstens: Die Bindungsart zwischen Atomen wird hauptsächlich durch den Füllgrad der äußeren Elektronenschale bestimmt. Zweitens: Die Atome gehen ohne äußeren Zwang nur solche Bindungen ein, die zu einer Verringerung ihrer potentiellen Energie führen und drittens: Die Atome streben durch Verbindungen den Zustand einer Edelgaskonfiguration, also eine vollständig gefüllte äußere Elektronenschale an.

Die Ionenbindung ist elektrostatischer Natur, fest, aber nicht orientiert. Die entstehenden Stoffe sind zumeist wasserlösliche Salze. Salzstöcke etwa haben eine hohe Festigkeit, verformen sich dennoch in längeren Zeiträumen plastisch-viskos.

Die Metallbindung ist energetisch weniger fest als die Ionenbindung und ebenfalls nicht orientiert. Metalle leiten elektrischen Strom und Wärme, weil die Elektronen sich leicht zwischen den Atomen bewegen können.

Die kovalente Bindung ist die klassische Elektronenpaarbindung. Sie ist



energetisch begünstigt und streng orientiert. Beispiele sind neben Diamant und Silizium die keramischen Werkstoffe.

Äußerst schwache Bindungen verschiedener Natur fasst man unter dem Begriff **van-der-Waals Bindung** zusammen. Die Adhäsion eines Wassertropfens an einer Glasscheibe beruht auf der van-der-Waals Bindung. Beim Beton (Abb. 1) hydratisieren Calcium-Silikat-Hydrat-Nadeln (CSH) auf Zementkörnern.

Die Zementkörner verfilzen miteinander und erzeugen auf ähnliche Weise Festigkeit wie die nicht durchgängigen Mikrofasern bei Wolle. Die CSH-Fasern sind in sich gerollt, ähnlich wie die Schulstüten der Erstklässler. Dadurch entstehen innere Oberflächen von über 200 m<sup>2</sup> pro Gramm Zementgel. Schwache Adhäsion und riesige Oberflächen ergeben die Festigkeit. Die Zementkörner im Bild sind etwa 10 µm groß.

### **Beton – Nano- und Makrowerkstoff zugleich**

Zement, Gesteinskörnung und Wasser sind die Ausgangskomponenten von Beton. Nach den Regeln der Betontechnologie erzeugen sie den Mehrwert des hochfesten, selbstverdichtenden oder Säure resistenten Betons.

Die Eigenschaften der Ausgangsstoffe werden als bekannt vorausgesetzt. Das Zusammenwirken in der Zementsteinmatrix wird mit der Powers-Theorie modelliert und damit in seinen Eigenschaften theoretisch vorausbestimmt. Ob

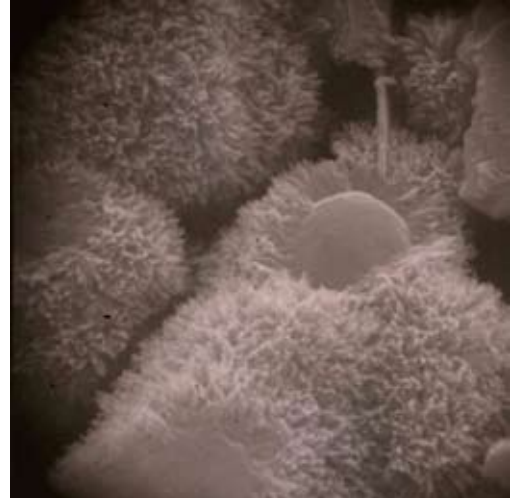


Abb. 1 Calcium-Silikat-Hydrat-Nadeln (CSH) auf Zementkörnern.

das gewünschte Ziel sicher erreicht wird, ist ungewiss. Für die Sicherheit der Bauwerke muss aber Gewissheit vorliegen. Deshalb tritt als wesentliche dritte Komponente zur Planung und Umsetzung das Messen.

### **Modellbildung**

Am Anfang aller technischen Realisation steht das Modell. Modelle versuchen, die Wirklichkeit zu vergegenwärtigen. Unser Denken steht zur Wirklichkeit in demselben Verhältnis wie unsere Modellvorstellungen zu den Objekten, die sie repräsentieren. So kann sich das Denken von der Wirrnis der Phänomene lösen, um sie durch ihre Reduktion zunächst einordnen und verstehen, ihren Horizont sodann überschreiten zu können, allerdings um den Preis unserer Fesselung an die Modelle.

Leibnitz hat sowohl die Stärken als auch die Schwächen der Modellbildung

in extreme Positionen hinein verfolgt. Er hat bei der Betonung materiell - sinnlicher Modelle für jedwede Form der Erkenntnis auch die Defizite der Modellbildung gesehen, die in der Reduktion der Phänomene, der Bindung der Imagination und der Ausblendung des nicht zu Bewältigenden liegen können. Systematisch ergeben sich aus dem Anwendungsbereich der Modelle drei Möglichkeiten [1]:

1. Anleitung und Ermutigung des zu Erziehenden,
2. Konkurrenz gegenüber dem zu Realisierenden,
3. Fesselung der Denk - und Konstruktionspotenziale.

Modelle in den Technikwissenschaften sind, auch wenn es sich häufig wie in der Architektur und im Bauwesen um gegenständliche Modelle handelt, immer operationelle Modelle, das heißt, an ihnen wird experimentiert, simuliert, gemessen. Als Richter darüber, inwieweit sich ein Modell weiter entwickelt und dabei dem Ziel der Erkenntnis angenähert hat, also die Wirklichkeit nachgebildet hat, entscheidet in den Technikwissenschaften einzig und allein das Experiment, das heißt die messtechnische Nachprüfung am Original [5].

## Messen

Daniel Kehlmann zitiert in seinem Roman „Die Vermessung der Welt“, wie Humboldt sich auf seine Weltreise messtechnisch vorbereitete: „Humboldt reiste nach Salzburg weiter, wo er sich das teuerste

Arsenal von Messgeräten zulegte, das je ein Mensch besessen hatte. Zwei Barometer für den Luftdruck, ein Hypsometer zur Messung des Wassersiedepunktes, ein Theodolit für die Landvermessung, ein Spiegelsextant mit künstlichem Horizont, ein faltbarer Taschensexant, ein Inklinatorium, um die Stärke des Erdmagnetismus zu bestimmen, ein Haarhygrometer für die Luftfeuchtigkeit, ein Eudiometer zur Messung des Sauerstoffgehaltes der Luft, eine Leydener Flasche zur Speicherung elektrischer Ladungen und ein Cyanometer zur Messung der Himmelsbläue. Dazu zwei jener unbezahlbar teuren Uhren, welche man seit kurzem in Paris anfertigte. Sie brauchten kein Pendel mehr, sondern schlugen die Sekunden unsichtbar, mit regelmäßig schwingenden Federn, in ihrem Inneren“ [3].

Galileo Galilei (1564 - 1642), der toskanische Naturwissenschaftler, Mathematiker und Philosoph, der als Begründer der modernen Astronomie und der klassischen Physik gilt, befand, Kern aller Wissenschaft sei es, das zu messen, was messbar sei und das, was noch nicht messbar sei, messbar zu machen.

Das heißt, der Ingenieur geht im Bemessungsprozess ein gewisses Risiko ein; er muss Entscheidungen unter den Bedingungen der Ungewissheit treffen. Um dieses Risiko zu mindern, schafft er sich Hilfsmittel, die ihm eine ungefähre Auskunft über das zukünftige Tragverhalten geben sollen. Das wichtigste Hilfsmittel ist dabei die statische Berech-



nung. In ihr macht er Annahmen über die zu erwartenden Lasten und verfolgt den Verlauf zwischen Beanspruchung und Beanspruchbarkeit für die inneren Kräfte mit den theoretischen Modellen der technischen Mechanik, Festigkeitslehre, Elastizitätstheorie und Plastizitätstheorie. Er vergleicht die inneren Kräfte mit den Eigenschaften der vorgesehenen Baustoffe und trifft auf dieser Grundlage Entscheidungen. Die statische Berechnung hat somit Prognosecharakter. Sie sagt etwas über das Verhalten eines Tragwerks aus, das noch gar nicht existiert. Zwischen der theoretischen Modellvorstellung einer statischen Berechnung und der künftigen Realität während der Nutzungsdauer kann natürlich keine exakte Übereinstimmung bestehen. Die Abweichungen zwischen der theoretischen Vorhersage des Projektanten und der zukünftigen Realität des Bauwerkverhaltens lassen sich in zwei Gruppen einteilen:

1. systematische Abweichungen und
2. zufällige Abweichungen.

Systematische Abweichungen oder Modellungenauigkeiten entstehen durch Unzulänglichkeiten der Berechnungsverfahren. Jedes theoretische Modell muss eine Reihe von vereinfachten Annahmen enthalten. In den praktischen Berechnungen wird stets mit deterministischen Theorien und festen Größen oder Variablen gerechnet. Demgegenüber hat aber die Realität einen stochastischen Charakter. Die Eigenschaften der Baumaterialien eines Tragwerks streuen mehr

oder weniger um ihren Mittelwert. Auch die Geometrie des Tragwerks und die Eigenschaften der Verbindungen sind vom Zufall beeinflusst.

Die auf das Tragwerk einwirkenden äußeren Belastungen sind Zufallsfunktionen der Zeit. Derartige zufällige oder stochastische Abweichungen sind bis zu einem gewissen Grade unvermeidlich und auch vom Menschen nur in engen Grenzen beeinflussbar. Die Berücksichtigung der zufälligen Erscheinungen erfolgt durch stochastische Modelle auf der Grundlage von Stichproben. Zuverlässige statistische Aussagen erfordern aber in der Regel einen sehr großen Stichprobenumfang, der in der Praxis oft nicht vorhanden ist. So entsteht durch den Mangel an statistischen Informationen eine weitere Ungewissheit, mit der sich der Ingenieur auseinanderzusetzen hat.

Kontrolle und Überwachung sind bei den meisten Bauwerken auf die Phasen der Projektierung und Bauausführung beschränkt. Nur bei exponierten Bauwerken, wie z. B. Eisenbahnbrücken, Staudämmen, Kernkraftwerken erfolgen auch Kontrollen während der Phase der Nutzung. Die Mehrzahl der Bauwerke bleibt nach der Fertigstellung heute noch sich selbst überlassen, und oft ist der Nutzer gar nicht über die zulässigen Lasten informiert.

## Zuverlässigkeitstheorie, Probabilistische Methode

Der Sicherheitsnachweis erfolgt mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Methoden für das Gesamtsystem oder für seine Elemente unter Berücksichtigung der Verteilungsfunktionen der Basisvariablen und der Grenzzustandsgleichungen. Das Sicherheitsmaß ist die operative Versagenswahrscheinlichkeit.

## Die Zeitabhängigkeit der Versagenswahrscheinlichkeit

Die Versagenswahrscheinlichkeit ist eine Funktion der Zeit. Das ist offensichtlich, wenn man an die Zeitabhängigkeit der Belastungen und Materialeigenschaften denkt. Je größer der Zeitraum ist, auf den sich die Versagenswahrscheinlichkeit bezieht, desto mehr Möglichkeiten des Versagens gibt es und desto größer wird auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Versagenszustand eintritt.  $P_f$  ist damit eine mit der Zeit monoton steigende Funktion

$$p_f(t_1) \leq p_f(t_2) \text{ für } t_1 < t_2$$

Setzt man voraus, dass sich das Tragwerk zum Zeitpunkt des Nutzungsbeginns,  $t=0$ , im Zustand des Nicht-Versagens befindet, so gelten die beiden Grenzwerte

$$p_f(0) = 0 \quad p_f(t) = 1$$

$\lim_{t \rightarrow \infty}$

Die komplementäre Funktion

$$L(t) = p_s(t) = 1 - p_f(t)$$

wird Zuverlässigkeitsfunktion genannt

und gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass das Tragwerk die Zeit  $t$  überlebt.  $L(t)$  ist monoton fallend. Die Zeit wird entweder in Zeiteinheiten oder durch die Anzahl von Belastungszyklen gemessen. Die zweite Möglichkeit findet man häufig bei Ermüdungsvorgängen. Die Zuverlässigkeitstheorie muss also die Zeitabhängigkeit der Versagenswahrscheinlichkeit stets berücksichtigen. Überall, wo die klassische Statik heute den Zeiteinfluss vernachlässigt, muss dieser bei einer zuverlässigkeitstheoretischen Untersuchung zwangsläufig mit erfasst werden.

Reale Baukonstruktionen haben niemals zeitunabhängige Materialeigenschaften. Alle Baumaterialien sind Prozessen der Alterung, Ermüdung, Nacherhärtung, Korrosion oder des Kriechens unterworfen, die die Tragfähigkeit verändern, meist herabsetzen. Diese Erscheinungen beeinflussen die Versagenswahrscheinlichkeit demnach wesentlich.

Ein Statistik-Beispiel: Um eine einfache Anwendung der statistischen Formeln zu zeigen, soll die Wahrscheinlichkeit für das mindestens einmalige Auftreten des hundertjährigen Hochwassers innerhalb von 100 Jahren berechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens des hundertjährigen Hochwassers eins durch hundert ist gleich einem Prozent:  $p_f = 0,01$ . Jedes einzelne Auftreten eines hundertjährigen Hochwassers ist ein unabhängiges Ereignis. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein hundertjähriges

Hochwasser in einem Jahr nicht auftritt, entspricht  $(1 - 0,01)$ . Dass es im nächsten Jahr auch nicht auftritt, geschieht mit derselben Wahrscheinlichkeit. Werden beide Jahre betrachtet, müssen die Wahrscheinlichkeiten für die beiden Jahre miteinander multipliziert werden. Damit ergibt sich dann die Wahrscheinlichkeit, dass das Hochwasser innerhalb von zwei Jahren nicht eintritt. Wird der Zeitraum von 100 Jahren betrachtet, so muss die Wahrscheinlichkeit hundertmal als Faktor gesetzt werden. Das ergibt dann die Wahrscheinlichkeit, dass in 100 Jahren das hundertjährige Hochwasser nicht ein einziges Mal auftritt. Dieser Wert liegt bei  $(1 - 0,01)^{100}$  gleich 36,6 %. Für die Wahrscheinlichkeit, dass das Hochwasser aber mindestens einmal in 100 Jahren auftritt, muss dieser Wert von 100 % abgezogen werden, also gemäß der Zuverlässigkeitsfunktion das Komplementär gebildet werden. Damit ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das mindestens einmalige Auftreten des hundertjährigen Hochwassers innerhalb von 100 Jahren zu 63,4 %.

Mit theoretischen Betrachtungen dieser Art lassen sich Wahrscheinlichkeiten für unterschiedlichste Fragestellungen berechnen. Die wesentliche Größe dabei ist die Auftretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses. Im Falle des hundertjährigen Hochwassers war es die Wahrscheinlichkeit von  $1/100$ . Die Wahrscheinlichkeit für das Erreichen einer Festigkeit, z. B. einer Betondruck-

festigkeit, ist nach den Normen die 5%-Fraktile, der Wert, der in 95 % der Fälle nicht unterschritten wird. Fälle bedeutet in diesem Fall das Prüfen der Druckfestigkeit eines Probekörpers einer Stichprobe. Viele geprüfte Einzelwerte ergeben die Dichtefunktion des geprüften Merkmals, hier der Festigkeit. Mit einer speziellen Dichtefunktion sind wir besonders vertraut, mit der Gaußschen Normalverteilung. Als ordentlicher Professor der Mathematik und Astronomie an der Universität Göttingen erhielt Carl Friedrich Gauß den Auftrag seines Landesherrn, das Königreich Hannover zu vermessen. Mit dieser Aufgabe hat er sich 25 Jahre lang immer wieder beschäftigt. Dabei machte ihm die Ungenauigkeit seiner Geräte zu schaffen. Um die Folgen dieser Ungenauigkeiten in den Griff zu bekommen, begann er, über die zufälligen Abweichungen seiner Messwerte von ihrem Mittelwert nachzudenken. Er entwickelte dabei die Methode der kleinsten Quadrate und die Normalverteilung, die so genannte Gaußsche Glockenkurve. So reagiert ein Genie auf nicht zu behebbende Unzulänglichkeiten seiner Ausrüstung. Mehr über Gauß, seine Arbeit, über Opfer und Moral der Wissenschaft, liest man wiederum bei Daniel Kehlmann „Die Vermessung der Welt“, eine Satire auf die deutsche Klassik, einen philosophischen Abenteuerroman, ein Abbild des Bürgertums im beginnenden 19. Jahrhundert [3].

Die Gaußsche Normalverteilung ist

durch den Mittelwert der geprüften Einzelwerte und die Standardabweichung als Maß der Streuung dieser Werte vom Mittelwert charakterisiert. Damit lässt sich der gesuchte Wert mit der Wahrscheinlichkeitsaussage, dass er von 95% aller denkbaren Prüfwerte überschritten wird, formelmäßig leicht berechnen. Dieser Wert geht in die statische Berechnung ein. Mittelwert und Standardabweichung sind somit die entscheidenden Größen, die die Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Konstruktion abschätzbar machen. Die Messung der Einzelwerte erfordert eine entsprechend ausgestattete Prüfanstalt mit geschulten Materialprüfern und kontinuierlich gepflegten und zu überprüfenden Prüfmaschinen.

Was hier für die Festigkeit ausführlich besprochen wurde, gilt für alle Werte des Festigkeits- und Verformungsverhaltens der Baustoffe sowie für viele ihrer relevanten physikalischen und chemischen Eigenschaften.

Zerstörende Prüfungen an bestehenden Bauwerken verbieten sich in aller Regel. Aber auch für diese Bauwerke müssen mit zunehmender Lebensdauer Zuverlässigkeits- und Sicherheitsaussagen gemacht werden. Deshalb hat sich das anspruchsvolle Gebiet der zerstörungsfreien Bauwerkprüfung in den vergangenen Jahren dynamisch weiterentwickelt. Prüf- und Messergebnisse sind Informationen. Ganz allgemein gliedert sich damit ZfP in das große Gebiet der Information und Kommunikation ein.

## **125 Jahre MPA Universität Stuttgart**

Seit 2003 arbeiten die MPA und die FMPA, mit dem Beinamen Otto-Graf-Institut, als „Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart“ unter einem gemeinsamen Dach. Im Staatsanzeiger für das Königreich Württemberg hieß es damals: „Die Materialprüfungsanstalt ist bestimmt, den Interessen der Industrie wie auch denen des Unterrichts zu dienen“. Diese Aufgabe hat sie bis heute in vorbildlicher Weise erfüllt und der Wissenschaftsregion in Stuttgart-Vaihingen zu Weltgeltung verholfen.

Die Veröffentlichungen des Otto-Graf-Instituts sind eine Fundgrube, besonders auch für die zerstörungsfreien Prüfverfahren: Messung der Betonerhärtung mit Ultraschall, Holographische Interferometrie, Fluoreszenz-Mikroskopie, Spannungsverteilung in vorgespanntem Glas, SAFT Algorithmus zur Analyse von US-Daten poröser Medien, Streufeldmessungen zur Riss-Detektion in Spannstählen, Hohlstellen-Lokalisierung mit der Ultraschalltomographie, Risstiefen-Bestimmung mit dem Scanning Impact Echo Verfahren oder Schall-Emissions-Analyse sind nur einige der bemerkenswertesten Themen.

Ein Beispiel soll zeigen, wie vorteilhaft es ist, wenn Universität und Materialprüfung Hand in Hand arbeiten können. Es ist von besonderem Wert, wenn die Wissenschaft die Theorie liefert und die Materialprüfung im Hause sie sogleich ve-



Abb. 2 Die Veröffentlichungen des Otto-Graf-Instituts, eine Fundgrube für ZfP

rifizieren kann. Aus der Materialprüfung, als Nachweis der Wirklichkeit des Verhaltens der Baustoffe und Bauteile, ergeben sich oft überraschende Ergebnisse, die wiederum die Wissenschaftsseite zur Forschung anregen. Dieses attraktive Wechselspiel dient der Qualifikation der Besten für Lehre, Forschung, Wirtschaft und Politik.

### Eine DESY – Frage

Das Beispiel gründet auf einer Fragestellung, um deren Lösung sich nur zwei Baufirmen bewarben, wobei nur eine qualifiziert genug war. Die Frage lautete: In welcher Länge kann eine 25 m breite und 1 m dicke Betonplatte ohne Fugen hergestellt werden, die anschließend nicht reißt. Die Wunschlänge lag bei 300 Metern. Modelltechnisch lässt sich abschätzen, ob ein solches Bauvorhaben gelingen kann. Ohne Versuche verbietet sich ein solches Risiko. Der konkrete Fall war dieser:

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron DESY in Hamburg ist eins der

weltweit führenden Zentren für die Forschung an Teilchenbeschleunigern. Der Beschleuniger PETRA wird zur weltweit brillantesten Speicherring-Röntgenstrahlungsquelle ausgebaut.

Für die Umrüstung mussten knapp 300 m des 2,3 km langen PETRA-Rings komplett umgebaut und eine neue Experimentierhalle errichtet werden. Kern der Halle ist eine 1 m dicke Betonplatte, die den Beschleuniger und das Experimentierfeld trägt. Die Platte ist 24 m breit und 280 m lang. In ihrer geschwungenen Form folgt sie dem Kreisbogen des Beschleunigerrings. Die Platte musste in einem Zug ohne Fugen betoniert werden.

### Modellbetrachtungen der Ausbildung der Bodenplatte

Wenn die Platte auf Bitumen als Gleitschicht reibungsfrei auflage, könnte auf eine Bewehrung verzichtet werden. Mit einer Verformungsbehinderung trotz einer Bitumengleitschicht musste jedoch gerechnet werden. Wenn sich die Platte durch abfließende Hydratationswärme verkürzt, wird sie in der Mitte durch jedes der etwa 150 m langen Enden eine maximale Zugkraft erfahren. Wenn diese Zugkraft zu Spannungen unterhalb der Zugfestigkeit des Betons führte, könnte ebenfalls auf eine Bewehrung verzichtet werden. Weil nach drei Tagen ab Beginn des Betonierens die Verkürzung der Platte beginnt, war eine Betonrezeptur zu entwickeln, die im jungen Alter eine Zug-

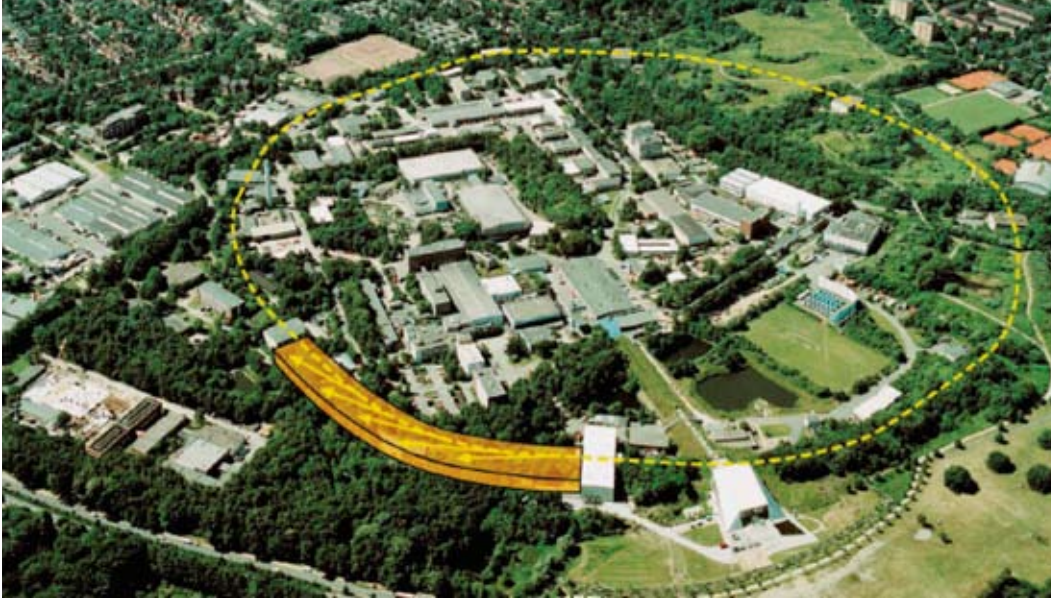


Abb. 3 Luftaufnahme DESY mit Petra-Ring. Im Vordergrund die neue Experimentierhalle. (Foto: DESY)

festigkeit von  $2 \text{ N/mm}^2$  bei möglichst geringer Hydratationswärmeentwicklung erreicht. Die Mischung war in Eignungsprüfungen nachzuweisen.

Um die Streuung der Zugkraft beim Verkürzen im Inneren der Platte zu minimieren, wurde ein Volumenprozent Stahlfasern pro Kubikmeter Beton vorgesehen.

Mikrorisse entstehen während des Hydratationsvorgangs im Beton in sehr jungem Alter. Risse in höherem Alter entstehen durch Schwinden, Zwang und Eigenspannungen. Zur Beherrschung von Frühschwindrissen wurden 40 kg geschabte Fasern mit rauer Oberfläche und für spätere Beanspruchungen 35 kg glatte Fasern mit gekröpften Enden, Länge 50 mm, Durchmesser 0,8 mm, vorgeschlagen.

Aus Kostengründen und technisch

noch vertretbar wurde der Stahlfaserbeton nur in den obersten 50 cm, also der halben Plattendicke eingebaut. Der untere Bereich wurde aus Sicherheitsgründen mit einer einzelnen Bewehrungslage für Rissbreiten von 0,3 mm ausgelegt. Weil keine Risse auftreten durften, erübrigte sich eine Risse verteilende Bewehrung.

Als Ruhepunkt war die Mitte der 280 m langen Betonplatte gewählt. Hier wurde zur Verankerung ein 1 m tiefer Graben monolithisch mit der Platte ausgeführt. Von hier aus wurde gleichzeitig in beide Richtungen betoniert.

### Lösungsansatz

Ein besonderes Rissrisiko ergibt sich durch die Hydratation des Zements. Ein Zement mit niedriger Hydratationswärme erhärtet langsam. Höchsttemperaturen von über  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  wurden in diesem Fall





Abb.4 Versuchsaufbau in der TU Berlin zum Nachweis des Gleitwiderstands der Bitumen-Gleitschicht

erwartet. Beim Abkühlen zieht sich der Beton wieder zusammen und reißt bei behinderter Verformung. Um die Verformung zu fördern, wurde die Platte auf eine etwa 3 mm dicke Gleitschicht aus Bitumen betoniert.

Eine Temperaturdifferenz von der Oberfläche zum Kern der Betonplatte von nur 10 K führt theoretisch schon zu einem Temperaturriss in der Oberfläche. Die frische Platte musste wärmege-dämmt erhärten und wurde dadurch noch wärmer.

### Versuche mit Gleitschicht

Die Versuche ergaben, dass bei einer 3 mm dicken Bitumen-Gleitschicht

aus Bitumen 50/70 nach EN 12591 bei 20°C mit einem Reibungsbeiwert  $\mu_R$  von 0,1 zu rechnen war. Für eine 1 mm dicke Schicht wurde der Reibungsbeiwert  $\mu_R > 0,4$  ermittelt.

Die Bitumen-Gleitschicht war dünn auszubilden, damit kein seitlich austretendes überschüssiges Bitumen zu Setzungen der Bodenplatte führte. Zur Bestimmung des Gleitwiderstands verschieden dicker Bitumenschichten wurden an der TU Berlin die Versuche bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt.

In der Mitte der Platte wurde ein Festpunkt ausgebildet, von dem aus sich die Platte nach beiden Seiten gleichmäßig



verformen konnte. Drei Tage und zwei Nächte lang wurden ohne Unterbrechung die etwa 7000 m<sup>3</sup> Beton eingebaut. In der Mitte der Platte am Startpunkt kühlte der Beton schon ab und verkürzte sich, während an den Enden noch betoniert wurde. Auf der Strecke dazwischen dehnte sich der Beton durch die Hydratationswärmentwicklung erst aus.

Ab dem vierten Tag mussten sich die Enden bewegen. Mit 6 Stunden Unterschied bewegten sich beide Enden erwartungsgemäß. Die maximale Endenverkürzungsgeschwindigkeit wurde von den Desy-Physikern mit 45 Nanometern pro Sekunde gemessen. Für eine Wette schätzten und berechneten alle am Bauwerk Interessierten die sich nach 28 Tagen, am 11. Januar 2008 um 16:00 Uhr einstellende Endenverkürzung. Sie betrug einseitig 39 mm. Unsere Werte bewahrheiteten sich. Ein Wunder war nicht eingetreten, wir hatten für die Planung den komplexen instationären Temperatur- und Verformungsvorgang mathematisch modelliert und nichtlinear berechnet. Der Stein, der uns vom Herzen fiel, war trotzdem riesengroß. Am 16. November 2009 um 14:00 Uhr ist die PETRA III-Einweihungsfeier.

## Literatur

- [1] Martin Quack, Modelle in der Chemie, Debatte Heft 2, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Dezember 2003
- [2] Host Bredekamp, Modelle der Kunst und der Evolution, Quelle wie [1]
- [3] Daniel Kehlmann, Die Vermessung der Welt, Rowohlt Taschenbuch Verlag
- [4] Peter Költzsch, Zum Problem der Modelle aus der Sicht der Technikwissenschaften, Quelle wie [1]
- [5] Gerhard Spaethe, Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, Springer-Verlag, 1992



Versuch zum Versagensverhalten eines Rohres

Dr.-Ing. Hans-Josef Zimmer

*Mitglied des Vorstandes der*

*EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe*



## Beitrag der Werkstoffe zur Komponentensicherheit

### Zusammenfassung / Ausblick

Seit 125 Jahren ist die MPA maßgebende Instanz in Fragen der Werkstoffkunde.

Seit rund 50 Jahren hat die MPA maßgebenden Anteil an der Entwicklung der kerntechnischen Werkstoffkunde.

Die MPA liefert im Rahmen von Forschungsvorhaben und in der Rolle als unabhängiger Gutachter seit jeher einen wesentlichen Beitrag dafür, dass die deutschen Kernkraftwerke in Sachen Komponentensicherheit und Verfügbarkeit zu den besten der Welt gehören.

Die EnBW baut auch in Zukunft auf die Förderung der kerntechnischen Kompetenz zusammen mit der MPA.

Die EnBW möchte sich in die Reihen der Gratulanten zum 125-jährigen Bestehen der MPA einreihen und sich den Glückwünschen anschließen.

Gerade für die EnBW, welche über 50% des selbst erzeugten Stroms aus Kernenergie bereitstellt, hat die MPA eine besondere Bedeutung.

Eine Aufstellung aller Projekte würde den Rahmen sprengen. Um dennoch die Leistungen der MPA im Bereich der

Werkstofftechnik ausreichend zu würdigen, soll ein kurzer historischer Abriss der Geschichte der MPA zeigen, wie wichtig der Beitrag der Werkstoffe zur Komponentensicherheit in den Kernkraftwerken ist.

### 1. Das Unternehmen EnBW

#### 1.1 EnBW auf einen Blick

Die EnBW Energie Baden-Württemberg AG ist mit einem Außenumsatz (2008) von rund 16 Mrd. Euro, einem Stromabsatz von rund 130 TWh im Jahr 2008 und mit rund 20.000 Mitarbeitern das drittgrößte Energieversorgungsunternehmen in Deutschland.

Sie verfügt über einen klimafreundlichen Stromerzeugungsmix mit einem Kernenergie-Anteil von 57 % und einem Anteil der regenerativen Energien von 13 %. Die EnBW Kernkraft GmbH mit ihren rund 1.800 Mitarbeitern, ihren 4 laufenden Kernkraftwerken an den Standorten Philippsburg und Neckarwestheim vermeidet jährlich rund 35 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>.

Der im Atomgesetz festgeschriebene

Ausstieg aus der Kernenergie bedeutet für die EnBW und Baden-Württemberg zwangsläufig einen tiefen Einschnitt in die Versorgungssituation und einen hohen Verlust an Wertschöpfung.

## **2. MPA und Kernenergie – eine Erfolgsgeschichte**

### **2.1 MPA und Kernenergie – die ersten Jahre**

Die MPA bestand bereits seit 54 Jahren, als 1938 Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Strassmann die erste Kernspaltung am Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie in Berlin verwirklichte und damit die Grundlage für die nukleare Kettenreaktion schafften. Schon kurze Zeit später, im Jahre 1942, gelang Enrico Fermi die erste sich selbst erhaltende nukleare Kettenreaktion unter der Tribüne des Fußballstadions der Universität Chicago. Mit diesen Experimenten begann die Nutzung der Kernenergie.

Bereits 1953 folgte die berühmte „Atoms for Peace“-Rede des damaligen US-amerikanischen Präsidenten Dwight D. Eisenhower vor der UN-Vollversammlung in New York City, in der er seine Vorstellungen über die friedliche Nutzung der Kernenergie darlegte.

1957 wurde die Internationale Atomenergieorganisation, die IAEA, gegründet. In Garching bei München wurde der erste bundesdeutsche Forschungsreaktor, das so genannte „Atom-Ei“, in Betrieb genommen.

Die MPA bestand zu diesem Zeitpunkt bereits seit 73 Jahren, während die Kernenergie sich gerade zu entwickeln begann.

### **2.2 Sicherheitsforschung der MPA**

Schon in den ersten Jahren der Kernenergie wurde deutlich, dass die Weiterentwicklung in der Kernenergie nicht ohne intensive Sicherheitsforschung vonstatten gehen konnte.

Insbesondere Großkomponenten, hier waren an erster Stelle der Reaktordruckbehälter zu nennen, stellten sowohl die Industrie als auch die Wissenschaft vor große Herausforderungen.

Seit der industriellen Revolution gab es zahlreiche Unfälle mit geplatzten Druckgefäßen u. a. in konventionellen Kraftwerken. Hier war Bedarf an intensiver Forschung.

Die MPA war in Deutschland von Anfang an maßgeblich an der Forschung und Weiterentwicklung von Druckgefäßen beteiligt und half mit, Schadensursachen aufzuklären und zukünftige Unfälle zu vermeiden.

So wurde sie beispielsweise 1960, als man sich gerade aufmachte, ernsthaft über Kernenergie in Deutschland nachzudenken, nach einem schweren Kesselschaden im Großkraftwerk Mannheim beauftragt, die Schadensursache zu ermitteln: Es war ein Problem an einer nachträglich aufgebrauchten Schweißnaht, was zuvor niemand vermutet hätte.

Als Folge dieser Untersuchung durch

die MPA empfahl der VGB (Verband der Großkraftwerksbetreiber) seinen Mitgliedern, alle sich in Betrieb befindlichen Dampfkessel von der MPA überprüfen zu lassen.

Die MPA untersuchte in diesem Rahmen allein 31 Kessel in 11 Kraftwerken.

Zu diesem Zeitpunkt war die MPA die führende Institution im Bereich der Werkstoffkunde in der Bundesrepublik Deutschland.

### **2.3 Erste Aktivitäten der MPA im Bereich Kernenergie**

Von 1963-1966 lief eine dreijährige Zusammenarbeit zwischen der MPA und der UKAEA (United Kingdom Atomic Energy Authority) zu „Berstversuchen bei Druckbehältern“ mit bis zu drei Metern im Durchmesser und künstlich eingebrachten Schlitzen.

Einen international guten Ruf im Bereich der Kerntechnik hatte die MPA daher bereits, als sie in der Bundesrepublik intensiv in die Materialforschung für Kernkraftwerke einstieg.

Bis ins Jahr 1965 gab es an der MPA diverse Untersuchungen über das statische Bruchverhalten von Stahlhohlkörpern, welche mit verschiedenen Temperaturen und Drücken beaufschlagt wurden, um das Rissverhalten oder vollständige Versagen zu untersuchen.

Diese Experimente waren die Grundlage für den Beginn des ersten bundesdeutschen Forschungsvorhabens im Nuklearbereich im März 1967 mit dem Titel

„Bruch einer Frischdampfleitung eines Siedewasserreaktors“ – ein Unfallszenario, welches als einer der „Worst Cases“ in der Kerntechnik angesehen wird. Das Szenario wurde auf Vorschlag der RSK von der MPA untersucht.

Dieses Forschungsvorhaben markierte den Beginn der nuklearen Sicherheitsforschung in der Bundesrepublik Deutschland.

1968 wurde die MPA durch das Bundesministerium für wissenschaftliche Förderung beauftragt, Festigkeitsuntersuchungen an dick- und dünnwandigen zylindrischen Hohlkörpern mit künstlich erzeugten Fehlstellen durchzuführen, eine Thematik, die sehr eng mit den Untersuchungen für die britischen Behörden verwandt war.

Die MPA ist somit im 84. Jahr nach ihrer Gründung an vorderster Front der nuklearen Sicherheitsforschung in der BRD tätig.

Zu dieser Zeit, 1968, beginnt die kommerzielle Nutzung der Kernenergie mit der Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Obrigheim durch eines der Vorgängerunternehmen der EnBW Energie Baden-Württemberg AG.

Seitdem agiert die MPA auch als Gutachter in Sachen Kernenergie im Auftrag der aufsichtsführenden Landesbehörden in der Bundesrepublik Deutschland.

Die nukleare Sicherheitsforschung in Deutschland ist zu diesem Zeitpunkt zwar bereits vorhanden, doch eine umfassende Koordination der einzelnen



Forschungsvorhaben war noch aufzubauen. War man bis Ende der 1960er Jahre noch in der Lage, viele Aspekte und Ergebnisse gerade der US-amerikanischen Forschung, die zum damaligen Zeitpunkt schon weiter entwickelt war, zu übernehmen, so zeigte sich, dass sich die deutsche Nuklearbranche in eine eigene Richtung entwickeln würde.

## **2.4 Das Forschungsvorhaben „Großbehälter“**

Im Jahre 1971 bestellte die Kernkraftwerk Philippsburg GmbH den Kraftwerksblock KKP2 – eigentlich baugleich mit KKP1, ein 900MW Siedewasserreaktor (SWR) der Firma AEG. Kurz darauf, im Jahre 1972, kam es im Kernkraftwerk Würgassen (SWR) zu einem Ereignis in der so genannten Kondensationskammer. Dieses Ereignis hatte auch Auswirkungen auf das Projekt KKP2.

Letztlich wurde 1975 der eigentlich vorgesehene Siedewasserreaktor abbestellt und stattdessen ein 1300MW-Druckwasserreaktor bei der Firma Siemens KWU bestellt. Allerdings war der Reaktordruckbehälter (RDB) für den ursprünglichen KKP2-SWR bereits fertig gestellt.

In der Nuklearbranche gab es für diesen RDB 1976 keine Verwendung mehr. Nach Verhandlungen zwischen MPA, KWU und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) erwarb das BMFT für 10 Mio. DM den RDB aus Philippsburg für die MPA.

Zwei Jahre später, 1978, wurde in einer neu errichteten Halle in Stuttgart der RDB mit seinen rund 17,5m Höhe und gut 6m Breite eingebaut. Materialeigenschaften der verwendeten Stahlsorten usw. waren zu dieser Zeit schon recht gut bekannt. Der original RDB diente vor allem folgendem Zweck: man wollte die Leistungsfähigkeit konventioneller und neuartiger zerstörungsfreier Prüfsysteme weiterentwickeln. Außerdem sollte der RDB dazu dienen, Personal an einem realistischen Prüfobjekt zu schulen. Allerdings war der „KKP2-RDB“ für die Untersuchungen zu fehlerfrei. Darum wurde ein 1,75m hohes Zwischenstück absichtlich aus fehlerhaftem Material in den RDB eingefügt. Der Einbau verzögerte sich allerdings ein wenig – die für die Arbeit zuständigen Schweißer weigerten sich, derart „schlechte Arbeit abzuliefern“. Der Fehlerkatalog enthielt am Ende 159 Fehlstellen.

Bis 1985 wurden hier die technischen Voraussetzungen für systematische zerstörungsfreie Ultraschallprüfungen geschaffen. Als besonders „bahnbrechend“ wurden die Prüfungen an Innenkanten von Speisewassereintritts- und Kernflutstutzen aufgenommen. Dies waren Bereiche, welche in amerikanischen Anlagen eine Anfälligkeit für Risse zeigten.

## **2.5 Meilensteine der nuklearen Sicherheitsforschung**

Zum tieferen Verständnis des Verhaltens leistungsstärkerer Reaktoren war es

notwendig, das Wissen über deren Materialverhalten weiter aufzubauen.

Grundlage dafür war die Erstellung eines Statusberichts über den internationalen Stand über alle für die Sicherheit von Reaktordruckbehältern wichtigen Einflussgrößen durch die MPA im Jahr 1971.

Die Erstellung dieser später dann „MPA-Studie“ genannten Arbeit führte zu einem regen Austausch mit den führenden nuklearen Vertretern aus der Industrie, aus Betreibergesellschaften, technischen Überwachungsvereinen, Forschungsinstituten und Hochschulen der westlichen Welt.

Die MPA wurde daraufhin im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Wissenschaft Hauptforschungsstelle für die nukleare Sicherheitsforschung.

Es folgten Jahre intensiver Forschung, aufbauend auf dieser Studie.

Im Jahre 1973 unterbreitete die MPA den Vorschlag, „durch Parameterstudien mit schrittweiser Veränderung der Einflussgrößen den Nachweis zu erbringen, dass die Sicherheit [Anmerkung: eines Reaktordruckbehälters] auch unter ungünstigsten Voraussetzungen noch gewährleistet ist.“

Obwohl dieser Vorschlag überwiegend positiv aufgenommen wurde, dauerte es noch Jahre, bis die Verhandlungen zwischen Politik, Industrie und Forschung schließlich das „Forschungsprogramm Komponentensicherheit (FKS)“ zu Wege bringen.

## **2.6 Das „Forschungsprogramm Komponentensicherheit (FKS)“ des Bundesministeriums für Forschung und Technologie (1979-1985)**

In der Rahmenvereinbarung für das FKS wurden der MPA „alle mit der Durchführung des FKS zusammenhängenden fachlichen und administrativen Aufgaben“ übertragen. Dies beinhaltete auch die Vergabe von Unteraufträgen an andere Forschungseinrichtungen.

Partner dieses Forschungsvorhabens waren auch Industrielabors im Ausland, wie Babcock & Wilcox in den USA oder die Japan Steel Works in Muroran.

Aus diesem umfangreichen Forschungsvorhaben, welches viele Teilforschungsvorhaben mit einschloss, deren Zusammenwirken von der MPA koordiniert wurde, entstanden im Laufe der Zeit die Grundlagen für staatliche Genehmigungsentscheidungen hinsichtlich der gesamten so genannten „Druckführenden Umschließung“ eines Kernkraftwerks.

In der MPA erfolgten Grundlagenversuche mit Werkstoffen aus dem Gebiet der Kerntechnik mit fehlerbehafteten, bauteilähnlichen Großkomponenten zur Integritätsabsicherung.

## **2.7 RSK-Leitlinien (RSK: Reaktorsicherheitskommission)**

Als Mitinitiator für die Neuerstellung der RSK-Leitlinien erfolgten 1979 erstmals regulatorische Festlegungen eines



neuen Sicherheitsstandards für druckführende Komponenten von Kernkraftwerken basierend auf den wegweisenden Experimenten und Erfahrungen aus dem Bereich der konventionellen Kraftwerkstechnik (Hochdruckrohrleitungen und hochenergetische konventionelle Behälter) an der MPA.

Die MPA setzte darüber hinaus kontinuierlich maßgebliche Akzente in der Reaktorsicherheitskommission, in der internationalen Länderkommission und im kerntechnischen Ausschuss durch ihre Mitarbeit in diesen Gremien.

In Baden-Württemberg entwickelte sich die Kernenergie in dieser Zeit ebenfalls weiter. Die Vorgängerunternehmen der EnBW Energie Baden-Württemberg AG konnten 1976 die Inbetriebnahme des Gemeinschaftskernkraftwerks Neckar I und 1979 die Inbetriebnahme des Kernkraftwerks Philippsburg 1 feiern.

## **2.8 Konzept der Basissicherheit**

Im Jahre 1980 wurde als Ergebnis der Forschung aufbauend auf der MPA-Studie das Konzept der Basissicherheit als grundlegende neue Festlegung zur Erreichung höchstmöglicher Betriebssicherheit eingeführt. Dieses Konzept ging auf die richtungsweisenden Arbeiten der MPA zurück. Es stellt eine übergreifende Optimierung zwischen Konstruktion, Werkstoffwahl und Herstellung von Anlagenteilen dar.

Im Zuge einer systematischen Aufarbeitung von Rissbildungen an Spei-

sewasserleitungen in Siedewasserreaktoren hat die MPA-Stuttgart maßgeblich die umfangreichen Nachrüstungen in den Jahren 1980/81 mit initiiert. Hierbei kamen vollumfänglich die Grundsätze der Basissicherheit zur Anwendung.

## **2.9 Bruchmechanische Absicherung von Großkomponenten (1980 – 2000) und Integritätskonzept (1993 – 2008)**

Über mehrere Jahrzehnte hat sich die MPA intensiv mit der bruchmechanischen Absicherung von Großkomponenten auch unter Mitberücksichtigung der Strahlenbelastung beschäftigt.

Aufbauend auf den werkstofftechnischen Entwicklungen und den genannten Projekten wurde auf Grundlage des Basissicherheitskonzeptes das Integritätskonzept maßgeblich von der MPA mit entwickelt, welches für sicherheitstechnisch wichtige Komponenten einen Bruchausschluss sicherstellt.

## **2.10 Grundlegende Arbeiten zum Alterungsmanagement (2005 – 2009)**

Basierend auf den experimentellen und analytischen Arbeiten auf dem Gebiet der Komponentensicherheit in den letzten Jahrzehnten wurde ein Konzept zur Einführung eines strukturierten Alterungsmanagements in deutschen Anlagen geschaffen, dass mit diesen fundierten Grundlagen und unter Einbeziehung des Integritätskonzeptes welt-

weit einmalig ist.

Dieses Konzept dient als Basis für den weiterhin sicheren und wirtschaftlichen Anlagenbetrieb.

Auch die Kernenergie entwickelte sich in dieser Zeit weiter. So wurden in Baden-Württemberg 1984 das Kernkraftwerk Philippsburg 2 in Betrieb genommen. Die MPA bestand damals seit 100 Jahren.

1989 folgte die Inbetriebnahme des Gemeinschaftskernkraftwerks Neckar II.

2005 erfolgte die Stilllegung des Kernkraftwerks Obrigheim aufgrund des im Atomgesetz festgeschriebenen Ausstieg aus der Kernenergie nach 37 Jahren erfolgreichen Betriebs in Obrigheim.

Gemeinsam mit den anderen Energieversorgungsunternehmen und dem VGB hat die EnBW in den letzten Jahren die Kompetenz der MPA zigfach in Anspruch genommen.



Dynamische Prüfung von Kindersitzen

Prof. Dr. rer. pol. Peter Gross

*Autor und Publizist*

*Em. Ordinarius für Soziologie an der Universität St. Gallen/ Schweiz*

## Prüfen und Vertrauen. Neue Herausforderungen <sup>1</sup>

Obwohl oder gerade weil Vertrauen überall schwindet und bis ins Selbstvertrauen hinein fragil und knapp zu werden droht, existiert so etwas wie ein Grundvertrauen ins Vertrauen. Misstrauen hingegen ist des Teufels. Dabei sind Vertrauen und Misstrauen komplementäre Mechanismen. In einer modernen Gesellschaft sind beide funktional und notwendig. Aber die Gegenwart kommt nicht klar mit ihrer neuartigen Zukunftsoffenheit. Immer mehr wird zwar beobachtet, geprüft, kontrolliert. Aber die moderne uns tagtäglich mit einem Füllhorn von Neuem beglückende Gesellschaft kommt nicht nach mit der Erzeugung einer Form des Vertrauens, die dieser Zukunftsoffenheit angemessen ist: Vertrauen ohne Rückgriff auf Vertrautes.

### 1. Misstrauen

Natürlich gibt es noch Formen fragilen Vertrauens, die unbeschädigt unser Leben ermöglichen. Ohne Vertrauen, dass der Stuhl mich trägt, der Computer funktioniert und der Vortrag über „Prüfen und Vertrauen“, wenn man nur lange genug an ihm arbeitet, eine druckfähige

Fassung erlangt, wäre schon die erste Stunde heute Morgen undenkbar. Jede Art von Kooperation zwischen Menschen wäre darüber hinaus unmöglich. Aber: in einer modernen Multioptionsgesellschaft mit ihrer überschäumenden Vitalität, ihrem ungebrochenen Drang nach Neuem, der unumgänglichen Vermischung der Kulturen und der rasch voranschreitenden Überfremdung von Heimaten gewinnt das Misstrauen eine eigene, singuläre Notwendigkeit. Der wachsenden Asymmetrie von Wissen lässt sich auch mit Misstrauen nicht begegnen.

Misstrauen ist, wie es Niklas Luhmann nennt, ein funktionales Äquivalent von Vertrauen (Luhmann 1973). Nicht nur ein Handschlag ist effizienter als ein ausgefeilter Vertrag (Prisching 2009), sondern auch seine Verweigerung. Beim Misstrauen handelt es sich nicht einfach, wie das laute Wehklagen über zunehmendes Misstrauen suggeriert, um fehlendes Vertrauen. Misstrauen ist wie Vertrauen ein Mechanismus zur Reduktion von Komplexität. Man sollte deshalb Misstrauen nicht gering-, sondern wertschätzen. Wie Vertrauen vereinfacht auch Misstrauen



<sup>1</sup> Für instruktive Gespräche möchte ich mich bedanken bei Dr. Gerhard Mall (Ulm), Dr. Hans Kastenholz, Dr. Kurt Münger und Dr. Patrick Wäger (Eidg. Materialprüfungsanstalt (Empa), St. Gallen)

die Komplexität und Kontingenz der modernen Welt. Denn wächst die Zahl der Optionen, wächst auch die wechselseitige Bedingtheit von Entscheidungen. Deren Resultate lassen sich wiederum schwerer voraussagen (Gross 2003). Es sei denn, man lässt sich misstrauischerweise gar nicht darauf ein.

Aber Vertrauen und Misstrauen implizieren auch Differenz. Die Folgekosten des Umgangs mit Vertrautem, wenn das Vertraute enttäuscht, sind offensichtlich höher als jene des Umgangs mit Misstrautem. Insofern ich mich auf Misstrautes gar nicht einlasse, entstehen auch keine Folgekosten – höchstens in der Reue, es verschmäht zu haben, oder aber in der Rache des oder der Verschmähten. Misstrauen ist auch kein Äquivalent zum Vertrauen, wenn man es in der Relation zum Glück oder zur Zufriedenheit betrachtet. Es lässt sich wohl schwerlich behaupten, dass steigendes Misstrauen (wie steigendes Vertrauen) das Wohlbefinden steigert. Wie auch immer, in einer globalisierten, nur noch in Ausschnitten begreifbaren Welt sind alle, wenn sie nicht im Kloster leben, aber selbst da (insofern auch hier die Eintritte vermehrt aus Fremden bestehen), zunehmend mit Fremdem konfrontiert (Gross 1997). Die überkommenen Vertrautheitsmassstäbe, über jahrhundertealte Traditionen eingeschliffene Verhaltensweisen versagen (Giddens 1995). Zwischen Vertrauen und Misstrauen öffnet sich eine immer breiter werdende Spanne der Unsicherheit und

des Zweifels.

Dass in einer globalisierten Gesellschaft Zweifel vorzugsweise in Misstrauen überführt werden, ist verständlich. Die Abwehr ist, wie gesagt, von Personen oder Sachen bequemer als deren Vereinahmung in den Kreis der oder des Vertrauten. Schon Georg Simmel formulierte vor mehr als einem Jahrhundert, dass mit der Vergrößerung der Wirtschaftsräume die gegenseitige Einsicht in die Verhältnisse unvollkommener werde, das Vertrauen damit bedingter, die Vollstreckbarkeit der Ansprüche unsicherer (Simmel 1989). In einer Welt, in der darüber hinaus über die Prozesse der Individualisierung und Autonomisierung des Einzelnen die Handlungen der anderen weniger berechenbar, kontingenter sind, ist deshalb, ob man das nun mag oder nicht, Misstrauen unersetzlich. Es ist nicht nur funktional im Sinne einer Reduktion von Komplexität, sondern auch funktional im Sinne einer Absorption des Neuen und Fremden.

Misstrauen macht auch vor der eigenen Person nicht halt. Eine Portion Selbstmisstrauen ist aber nicht von Schaden. Obwohl Führungshandbücher meist den eitlen Grundsatz pflegen, Selbstvertrauen sei die Basis des Vertrauens überhaupt. Augustinus spricht von Vermessenheit, von einer *perversa securitas*, einer hypertrophen Selbsteinschätzung, allen Unwägbarkeiten des Lebens gewachsen zu sein (Bausenhart 2008). Selbstvertrauen ist von Vorteil, wenn da-

mit das Selbstvertrauen einhergeht, auch Enttäuschungen des Vertrauens gewachsen zu sein. Ansonsten ist überspanntes Selbstvertrauen nicht nur häufig die Basis zu blindem Vertrauen, sondern auch Auslöser von Abwehrgefühlen und Misstrauensäusserungen bei anderen. Gerade in Gesprächen und Veranstaltungen sind Menschen mit einem zu hohen Pegel an Selbstvertrauen suspekt, weil sie, indem sie nur sich selber vertrauen, nicht willens sind, anderen zu vertrauen. Im Übrigen haben die Kinder in mit Fremdem durchsetzten Gesellschaften von Anfang an auch das Misstrauen zu lernen, gegenüber Rutschbahnen wie gegenüber Unbekannten, sie müssen lernen, ihrer eigenen Einschätzung zu misstrauen.

## 2. Zukunftsvertrauen

Um Vertrauen und Misstrauen den richtigen Platz in einer modernen, offenen Gesellschaft zuzuweisen, ist eine zweite Präzisierung vorzunehmen. Die Vertrauensvorstellung hat nicht Schritt gehalten mit der Evolution moderner Gesellschaften. Sie ist stehengeblieben bei einer alttestamentarischen Vorstellung von Vertrauen als Vertrautheit. In vertrauten Welten bestimmt die Vergangenheit die Zukunft. Vertrauen imaginiert Vertrautheit und Erzeugung von Vertrauen suggeriert die Wiederherstellung von vertrauten Umständen. Die Gegenwart aber ist zukunftsorientiert, sie lebt von Mobilität und Durchmischung, von Innovation und Neuerung. Sie will alles

anders machen als es ist. Wie aber können wir in etwas vertrauen, das uns nicht bereits vertraut ist (Offe 2001)? Neu ist etwas nur, so hat es einmal Hermann Lübbe formuliert, weil es nicht vorhersehbar ist, sonst wäre es nicht neu. In einer neophilen, das Neue gegenüber dem Alten präferierenden Gesellschaft muss deshalb ein neues Vertrauen gedacht und entwickelt werden: das Vertrauen ins Unvertraute.

Voraussagen, was kommen wird, war und ist eine Herausforderung für jedes, nicht nur das strategische Deuten. Die grossen Religionen, wie das Christentum oder der Islam, entwickeln darum temporale Zukunftsordnungen und metaphysische Fahrpläne für das Geschehen nach dem Tod. Im Christentum sind sie im letzten Buch der Bibel, im Islam im Koran und bei Mohammed Allah und den Propheten niedergelegt. Vormoderne Gesellschaften führen über Gebote und Verbote in die Zukunft. Das Tun, auch das von morgen und übermorgen, ist regelgeleitet und deshalb vorhersehbar, jedenfalls solange sich die Untertanen daran halten. Die moderne Gesellschaft hingegen hat eine extrem verunsicherte Zukunftsperspektive. Was ist, könnte anders sein, und was kommt, hängt von Entscheidungen ab, die wir nicht kennen. Allerhöchstens lassen sich Möglichkeitsräume explorieren, Trends antizipieren und Szenarien probieren (Hitzler 2005). Man könnte sagen, mit der Autonomisierung des modernen Menschen kommt die Kontingenz

der Zukunft, ihre Ungewissheit und Unbestimmtheit ins Spiel. Wer macht, macht Unvorhersehbarkeit, wer lässt, lässt der Vorhersehbarkeit Raum.

Die Moderne, die Freiheit freisetzt, erhöht also ihre Kontingenz. Alles könnte x-mal anders sein. Sie steigert auch die Nichtantizipierbarkeit von Entscheidungen. Während der Wetterprophet das Wetter einigermaßen voraussagen, aber nicht machen kann, kann der soziologische Prophet die Zukunft gerade dann nicht voraussehen, wenn alle die Zukunft machen und nichts belassen, wie es ist. So können wir nur sicher sein, dass wir nicht sicher sein können, ob in der Zukunft irgendetwas so bleiben wird, wie es war (Luhmann 1992). Ausser der Verursacher der Unsicherheit, der Mensch selber. Insofern sind Vertrauen und Misstrauen nicht nur Reduktionen von Komplexität, sondern auch Verringerung von Kontingenz. Wenn also die Zukunft nur noch im Modus des Wahrscheinlichen bzw. des Unwahrscheinlichen oder in Form von Trendaussagen und Wahrscheinlichkeiten gegeben ist, stellt sich mit Wucht die Frage ein, wie Vertrauensbildung dann aussehen könnte.

### 3. Vertrauenserzeugung

Wo Vertrauen nicht da ist, muss es erzeugt werden. So viel ist sicher. Aber welches Vertrauen und Vertrauen in was? Endlos sind die Vertrauensumschreibungen und noch endloser die Objekte, denen man Vertrauen oder Misstrauen

angedeihen lässt. Man kommt in der Frage nach der Vertrauenserzeugung deshalb am besten vorwärts, wenn man nicht nach einem invarianten Wesenskern von Vertrauen, sondern nach lädierten Vertrauensbeziehungen fragt, die ein System, sei es eine Organisation oder sei es eine Institution, wegen fehlenden Vertrauens in Turbulenzen bringen oder ganz abstürzen lassen.

Das Funktionieren der Familie basiert, bis hin zu Liebesentzug und Strafen, auf dem Vertrauen, dass Entzug oder Strafen das Gleichgewicht wieder herstellen, dass die Bestrafung eine endgültige Abgeltung getanen Unsinn ist. Für die Familie gibt es (noch) keine externen Prüforgane, es sei denn die Eltern verletzen die Fürsorgepflicht oder es geschehe etwas, was strafrechtlich relevant ist. Familienmitglieder generieren durch ihr tägliches Verhalten den Vertrauens Kitt, der das Tageswerk ermöglicht. Nur in Ausnahmefällen erfolgt eine Hilfestellung inform von Ratschlägen oder Therapieangeboten Aussenstehender. Eher kurios muten, aber auch sie sind eine Folge eines neuartigen Misstrauens, die Forderung nach Elternführerscheinen oder Bewilligungspflichten zum Hüten der Enkelkinder an.

Anders stellt sich die Sachlage in der Wirtschaft und bei den Unternehmen dar. Händeringend sucht man nach Mitteln, Vertrauen zu gewinnen. Vertrauenserzeugung heisst hier Vertrauen in Firmen, Unternehmen, Marken und Vertrauen in



Produkte erzeugen. Es genügt, im Unterschied zur Familie, nicht, wenn die Mitarbeiter eine grosse vertraute Familie sind. Das traute Zusammensein fliegt schnell auf ohne Kunden. Alles, was in einer Unternehmung geschieht, deren gesamte Choreographie von der Geschäftsleitung bis zum Marketing, steht im Dienste des Kunden. Das Vertrauen des Kunden gilt es zu erringen (Kenning 2002).

Das Potential an Handlungsmöglichkeiten einer Unternehmung, kundenrelevante vertrauensbildende Massnahmen zu ergreifen, ist allerdings unerschöpflich. Was soll man in den Vordergrund rücken? Verfahren oder Personen? Produkte, die Marke, den Verkauf, den Verkäufer? Was nützt einer in Rücklage geratenen Grossbank am ehesten? Die Inthronisierung von gestandenen Vertrauensmännern und Alt-Ministern? Der Abschluss von internationalen oder bilateralen Verträgen? Die Festigung der Systeme? Die Installation neuer Sicherheitseinrichtungen oder die Erfindung transparenter und abgesicherter Produkte, für die die Garantie übernommen wird, dass ihnen nicht passiert, was den strukturierten Produkten der Banken gestern passiert ist? Oder alles zusammen? Vermutlich gibt es - ausser in Krisen - keinen besten Schachzug. Es kommt, wie beim Schachspiel, auf die Situation an.

Jedenfalls lässt sich, schon das Wort „erzeugen“ legt das nahe, Vertrauen weder befehlen noch kaufen. Es gibt elementare Tatbestände des modernen

Lebens, wie Glück, Liebe oder Hass, die sich nicht erzwingen, aber auch nicht wegzaubern lassen. Schon die Reflexion dieser Zustände kann heikel sein. Das Vertrauen ist, wie Annette Baier es nennt, eine empfindliche Pflanze, die eine Untersuchung ihrer Wurzeln möglicherweise nicht schadlos übersteht (Baier 1986). Auch das Kaufen-wollen von Vertrauen führt meistens zum Gegenteil, selbst wenn der Gekaufte die Prämie annimmt, wächst nicht das Vertrauen, sondern das Misstrauen.

Vertrauen ist auch nur bedingt mittels Ab- und Versicherungen zu gewinnen. Versicherungen sind ein Schutz gegen Konsequenzen einer Entscheidung, die sich vorausnehmen und in Wahrscheinlichkeiten berechnen lassen. Versicherungen operieren auf dem Boden von Bekanntem. Wer seinen Hausrat versichert, muss ihn dem Versicherer eröffnen und zeigen. Ein Bild, das gegen Diebstahl versichert wird, muss in seinem Wert eingeschätzt werden können. Ein Atlantikflug lässt sich aufgrund der geschehenen Abstürze in seinem Risiko berechnen und versichern. Sofern die erwarteten Schadenshöhen und -frequenzen sich nicht kalkulieren lassen, wird es schwieriger. Besonders problematisch ist die Abschätzbarkeit von Grossrisiken (Industrieanlagen, Staudämme), wo keine statisch relevanten Grössen vorliegen. Bei neuen Risiken, wo noch keine Erfahrungswerte vorliegen, wo also nicht von „Berechenbarkeit“ gesprochen werden kann, wird

Vertrauen auf eine harte Probe gestellt. Aber gerade solches Vertrauen ist nötig.

Die Krux der Vertrauenserzeugung liegt in modernen Gesellschaften also darin, dass sich die mit bestimmten Entscheidungen verbundenen Unsicherheiten nicht vorausnehmen lassen. Die Geothermie beispielsweise, als neuartige und noch wenig erprobte Technologie zur Wärmeproduktion, ist zwar klimafreundlich, unerschöpflich und lokal vorhanden. Aber was geschieht, wenn direkt unter Siedlungen gebohrt wird, wenn der Permafrost Risse bekommt oder wenn dem Erdinnern zunehmend Wärme entzogen wird? Die Erfahrungen liefert letztlich die Natur in ihrer beobachtbaren Antwort auf die Bohrungen. Ähnliches gilt für alle neuen Technologien: etwa die Nanotechnologie, deren Eindringen in Pharmazie, Kosmetik und Medizin in ihren Auswirkungen auf den Menschen sich noch überhaupt nicht abschätzen lässt. Überall, wo Neuland erschlossen und bislang Unerprobtes erprobt wird, dieselbe Crux.

#### 4. Evolution externer Prüfsysteme

Eine Konsequenz dieser Sachlage ist die Hilfestellung der Prüfindustrie. Ihre Antwort heisst Kontrolle und Prüfung und nicht Vertrauen. Vertrauen ist gut, Kontrolle ist besser. Soll Lenin gesagt haben. Vertrauen in Kontrolle scheint einen Königsweg zu bieten. Die Prüfindustrie, und darunter verstehen wir alle öffentlichen oder privaten Institutionen, die prüfen, seien es (wohl der Ursprung aller

Prüfungen) Personen, seien es Produkte, Prozesse, Eigenschaften, Materialien, was auch immer. Die Prüfindustrie hat zwar, und die Materialprüfanstalten haben dabei eine Pionierrolle gespielt, den Umschwung von internen zu externen Beobachtungen von Prüfobjekten mitgetragen. Die Situation wird nicht mehr nur vom Kunden und den Überlegungen und Selbsterforschungen der Unternehmung, ihrer „freiwilligen Selbstkontrolle“, bestimmt.

Seit geraumer Zeit sind neue Akteure im Spiel, welche eine immer wichtigere Rolle im Konzert vertrauensbildender Massnahmen spielen: nämlich externe und unabhängige Prüfsysteme. Mit entsprechenden Organisationen und Experten. Die internen Massnahmen, durch welche die Unternehmung über verschärftes Controlling neue Buchführungsstandards und Qualitätssicherungssysteme Vertrauen zu erringen versuchen, haben einen Systemfehler. Sie werden von jenen in die Wege geleitet, welche gleichzeitig die Hersteller sind. Die kollektive Selbstbindung (Schenker-Wicki 2008) ist in dieser Beziehung eher problematisch. Die gegenseitige Vereinbarung von Standards und Verhaltenskodices sind wegen ihrer Freiwilligkeit nur beschränkt. Seit Beginn der 90er Jahre im Binnen- Aussenverhältnis von Unternehmen etabliert, haben diese informellen und freiwilligen Selbstbindungen die Exzesse der letzten Jahre nicht verhindern können.

Deshalb geniessen externe Empfeh-

lungen und Prüfungen weit grösseres Vertrauen als jene der Hersteller. Fremdbeobachtung zählt mehr als Selbstbeobachtung. Den gleichen Fehler pflegt im Übrigen die Werbewirtschaft, indem die Unternehmen mit ihrer Hilfe ihre eigenen Produkte belobigen. Eigenlob stinkt. Wie am Beispiel der Atomkraftwerke ersichtlich, haben die internen Kontrollen nicht nur nicht selten versagt, sondern sind manipuliert worden, indem Sicherheitsprobleme nicht kommuniziert, Störungen nicht behoben und Risiken verheimlicht worden sind.

An die Stelle interner Prüfmechanismen tritt deshalb eine explodierende unternehmensexterne, heute grossteils privatwirtschaftlich operierende Prüfindustrie. Die Unternehmen erhöhen ihre Resonanzfähigkeit durch Erhöhung der Einfallstore für externes Wissen (Gross, Brügger 2001). Es begann mit Kundenreklamationen und dem Einsatz von verdeckten „Ermittlern“. Undercover Aktionen, wie jene von Günter Wallraff, sind noch in bester Erinnerung. Während die öffentlichen Prüfinstitutionen, wie die vor einem guten Jahrhundert gegründete „Materialprüfungsanstalt“ (MPA) oder ihr schweizerisches Pendant, die Eidgenössische „Materialprüfungs- und Forschungsanstalt“ (Empa), sich sukzessive auf Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten („agieren statt reagieren“) verlegen, schiessen seit einigen Jahrzehnten die privaten Prüfungsanstalten wie Pilze aus dem Boden. Sie prüfen Werk- und

Baustoffe, sie messen Umweltfaktoren wie Immissionen und Strahlungen, sie analysieren Wasser- und Bodenproben, testen Spielzeuge, Lebensmittel, Medikamente oder Konfitüren oder ganze Systeme und Anlagen wie Kraftfahrzeuge oder Förderbänder.

Externe Unternehmensprüfungen erfolgen durch Setzung von Standards im Finanzwesen (Richtigkeit, Genauigkeit, Ordnungsmässigkeit), im Informationsmanagement, im Datenschutz, den Produktionsabläufen und im Kundenmanagement. Mittels Zertifizierung werden die Einhaltung bestimmter Standards für Produkte und Dienstleistungen und ihre jeweiligen Herstellungsverfahren garantiert. Ausbildungsstandards, persönliche Befähigungen und Qualitätserfordernisse (z. B. ISO 9000) werden erhoben. Informationssicherheit, die Einhaltung der Umwelt- und Sozialstandards, die Arbeits- und Umweltschutz-Massnahmen werden erforscht. Derart etabliert sich ein Wettbewerb um Zertifizierungen.

Die Zertifizierungs-, Güte- und Prüfsiegel-Vergabe ist unterdessen für den Laien so unübersichtlich geworden, dass er eine Prüfung der Prüfagenturen verlangt. Das gilt insbesondere für den Bereich der Lebensmittel und Spielwaren, für die Medikamente und Geräte. Die grossen Rating-Agenturen wie Moody's Investor Service oder Standard & Poor's messen die Bonität von Unternehmen, sind aber mit der Finanzkrise selber in Ungnade geraten. Wir wollen

schweigen davon, dass das Wirtschaftsprüfungswesen selber zum Handlanger krimineller Machenschaften wurde (Malik 2008).

Alles ist sehr unübersichtlich geworden. Im Bereich der Lebensmittel konkurrieren unterschiedliche Bio-labels (Bio-suisse, Natura Beef, Max Havelaar, Bio Weide Beef, Demeter, fidelio bio, naturaplan, kagfreiland, bio engagement, Bio Natur Plus, claro, fair-fish, ip-suis-seagri-natura etc. etc.). Es gibt private und öffentliche Labels, nationale und internationale. Überall ist man auf der Suche nach den besten Aufpassern und den besten Aufpassern über Aufpasser. Die wachsende Zahl an privaten Instituten erfordert wiederum eine Zertifizierung und Akkreditierung von staatlicher Seite. Je vielfältiger und komplexer die Prüf-, Inspektions- und Zertifizierungsangebote werden, desto dringlicher wird deren Zertifizierung. Und je grenzüberschreitender die Aktivitäten von Unternehmern werden, umso internationaler werden die Akkreditierungsnormen und -verfahren.

## 5. Audit-Explosion und Web

Auch die Lehranstalten und Universitäten konnten sich der externen Prüfmanie nicht entziehen. Unablässig wird evaluiert. Entsprechend wird von einer „Evaluitis“ (Matthies, Simon 2008), von einer „Audit Explosion“ oder einer „Audit Society“ gesprochen (Power 1997). Zu den Aufnahmeprüfungen und Schlussprü-

fungen kommen immer neue Prüfungen hinzu. Lehrkräfte prüfen Studierende, Studierende prüfen Lehrkräfte, Lehrkräfte prüfen sich wechselseitig. Wer prüft, muss sich auch selber prüfen lassen, so die Betreiber von spickmich.de und schulradar.de. Studiengänge und Universitäten werden gecheckt und Gütesiegel wie AACSB, Equis, Epas, Amba, OAO oder Fibaa verteilt. Unablässig werden wir aufgefordert, Bewertungen abzugeben, im Hotel, im Restaurant, auf Tagungen, bei Referaten. Und zunehmend werden die Evaluationen ins Internet gestellt. Schon expandieren Unternehmen im Web, die gegen Bezahlung Reputationskontrollen auch der eigenen Erscheinung im Internet in Aussicht stellen. Gleichwohl laufen die Prüfanstalten der täglichen Explosion von Produkten und Dienstleistungen, von Angeboten und Verheissungen hinterher. Warentest hat seit den Jahren seines Bestehens 70 Tausend Produkte geprüft. Etwa so viele wie täglich auf den Markt gelangen.

Das Internet als Prüforgan mit seinen sich explosionsartig vermehrenden Formen ist für die traditionellen Prüfsysteme eine neue Herausforderung. Es bietet bezüglich Schnelligkeit, Verbreitung und Greifbarkeit völlig neue Möglichkeiten. Aber auch die über Blogs, Internet Communities wie Facebook, Twitter oder Flickr veröffentlichten Meinungen können die systematische Lücke zwischen ungeprüften Novitäten und deren Prüfung niemals schliessen. Im Netz finden

sich deshalb nicht nur Nutzertestimonials, sondern immer mehr Vertrauensbarometer und Indices, die Bewertungen komprimieren. Sie ergänzen zwar die Misstrauensausbeutungsindustrie, sind aber selber wegen ihrem Jekami-Charakter und wegen der Möglichkeit der Anonymisierung der Absender in Verruf gekommen. Zu viele Köche verderben den Brei. Dennoch: Wieviel und wie immer geprüft wird, die Hauptwirkung von Web 2.0 ist deren Drohung. Es kommt, wie beim Zoll, auf das „könnte“ und nicht auf die effektiven Kontrollen an.

Jedenfalls: Das Vertrauen in Hersteller, Händler und Expertenwissen nimmt generell ab, das Vertrauen in Meinungs- und Nutzerwissen zu (Frick 2007). Nutzerwissen und Konsumenteneinschätzungen wiederum widersprechen sich in der Bewertung von Produkten oder Personen häufig und lassen viele Fragen offen, weil sie unsystematisch erfolgen. Durch sie wird zwar eine Art Demokratisierung der Prüfsysteme und der entsprechenden Vertrauens- und Misstrauensbildungen in die Wege geleitet. In der Politik sind Twitter, Youtube und Facebook Hauptwaffen von Oppositionellen und Demonstranten geworden. Internetplattformen können in Zukunft nicht nur zum Tod des Despotismus und der Diktaturen führen, sondern auch globale Marktleader im Lebensmittel-, Finanz- oder Pharmabereich nachhaltig schädigen oder vernichten.

## 6. Individualisierte Prüfsysteme

Die Zukunft wird eine nochmalige Evolution von individualisierten und privat anwendbaren Prüfsystemen hervorbringen. Wenn zum Beispiel jeder, der Markenprodukte einführt, die sich als gefälscht erweisen, entschädigungslos Beschlagnehmung zu erwarten hat, wenn also dem Konsumenten die Echtheitsprüfung übertragen wird, dann wird der Kunde früher oder später, sofern der Bund nicht an allen Schweizer Botschaften Markenprüfer abstellt, bei denen der Kunde seine Produkte testen lassen kann, Geräte erwerben, mit denen er selber Echtheitsprüfungen durchführen oder mobil abrufen kann. Wie erinnertlich hat der Streit um Mobilfunkantennen alle genannten Prüfstufen durchlaufen. Die technischen Mittel dazu sind mit den neuen Kommunikationstechnologien und der mobilen Internetverbindung gegeben. Suchmaschinen lassen sich mit Handys aktivieren, Warentests abfragen, von Neuentwicklungen Tests herunterladen. Testkunden und mystery-shopper schwärmen in der Warengesellschaft aus, explorieren das Neue und werden zu Stuntmen für Follower. Es wird in nicht allzu ferner Zeit möglich sein, Kompressionen von internen, externen und Web-Bewertungen auf dem Handy von Waren und Geräten zu erhalten. Die Hersteller führen Call-Center, die sich unterwegs anzapfen lassen. Einkäufe werden begleitet durch von Suchmaschinen zusammengetra-

gene Bewertungen, Referenzen und Testimonials.

Schrittmacher privater Prüfsysteme sind zweifellos die privaten (in der Regel für medizinische Zwecke entwickelten) Körperanalysegeräte, die von der Waage und dem Fiebermesser bis zur neuesten Generation der Körperfettmessgeräte reichen. Geräte wie Fieberthermometer, Sensoren, Waagen, Ozonmesser, Blutdruckmessgeräte, Puls- und Kalorienmesser zählen zu den Grundausstattungen moderner Haushalte. Nicht aber Messgeräte, um den Sulfit- oder Schwefelgehalt in Weinen zu prüfen, nicht Lügendetektoren zur Prüfung des Charakters von Verkäufern. Private Messgeräte sind (nicht nur bei Alkoholtestgeräten) kräftig auf dem Vormarsch und haben, je restriktiver die Vorschriften werden, Konjunktur. Auch bezüglich der privaten Messgeräte für Elektrosmog, Formaldehyd, Ozon oder UV-Strahlung evolviert ein Markt von Messgeräten, der indessen seinerseits schon wieder so reichhaltig ist, dass er selber wieder periodisch getestet wird. Möglicherweise werden in naher Zukunft schon nicht nur Verbrauchsdaten und Bio-Labels die Produkte schmücken, sondern ins Handy einbaubare Codes, die alle relevanten Informationen zusammenfügen.

Eine Kolonne von Prüfgeräten und Messsystemen folgt der Explosion von Neuem. Die mobilen Kommunikationstechnologien werden Zusatzfunktionen wie Ozon- und Smogmesser aufweisen.

Es wird Einkaufsjacken geben, in die alle verfügbaren Prüfgeräte eingebaut sind. Brillen, die ultraviolette Strahlung anzeigen, usf. Die Prüfanstalten und -institutionen verschwinden im Individuum. Die Prüfindustrie wird individualisiert, miniaturisiert („lab on a chip“) und persönlichen Bedürfnissen angepasst, wie man das bei Anzügen, Fahrrädern, elektronischen Ausstattungen von Automobilen u.ä.m. kennt. Die MPA dockt gleichsam individuell an: jeder und jede eine kleine Material-, Waren- und Menschenprüfanstalt! Ebenso findig werden allerdings die Möglichkeiten der Produkthersteller sein, den Messgeräten zu entgehen. Es wird zugehen wie bei den Schwimmweltmeisterschaften. Wo Anzüge getragen werden, deren Prüfung noch aussteht, werden sie, sobald geprüft, flugs durch wieder andere, wieder neue und ungeprüfte ersetzt werden.

## 7. Vertrauen ins Unvertraute

Wie also lässt sich das bewerkstelligen, was als zentrale neue Herausforderung für die Vertrauensbildung genannt wurde, das Vertrauen ins Neue, Unbekannte? Wie lässt sich Vertrauen in etwas erzeugen, was noch niemand gesehen und noch keine Institution geprüft hat? Muss Vertrauen in einer freiheitlichen Gesellschaft nicht systematisch in Schwierigkeiten kommen, wenn das uns allen Vertraute die andauernde Erzeugung von Unvertrautem ist?

In einer rasant sich wandelnden Ge-

sellschaft, die sich selber immer neu arrangiert, wird auf diese Situation mit Personen und Verantwortlichkeiten reagiert. Wie beim Schachspiel kommt es zwar auf die Situation an, welcher Zug der bestmögliche ist. Aber das Vertrauen muss die ungewisse Zukunft antizipieren und akzeptieren. Optimal wäre es wohl, schiffahrtsterminologisch gesprochen, wenn Schiff und Kapitän mein Vertrauen haben, unbekannte Gewässer zu meistern. Aber in Krisenzeiten findet eine Personalisierung der Vertrauensdebatte statt. Dass die Vertrauenskrise letztlich auf das autonome Individuum rekurriert, ist gesellschaftsanalytisch zwingend. Es ist die Person, an der sich Vertrauen festsetzen muss. Systeme lassen sich als Systeme nicht zur Rechenschaft ziehen, auch nicht Staaten, Wirtschaftsordnungen oder die Ganzwelt. Systeme können sich selber korrigieren, aber nicht innovieren. Systeme sind dazu nicht in der Lage. Sie können sich wasserdicht machen, aber nur gegen das Wasser. Je fragiler das Vertrauen, desto stärker der Ruf nach Führern, die Vertrauen verdienen. In einer subjektorientierten Gesellschaft, welche die Autonomie und Selbstverantwortlichkeit des Einzelnen resolut ins Zentrum rücken, wollen Verantwortlichkeiten zugeschrieben und Schuldige gefunden werden.

Der Rekurs auf Person, Subjekt oder das Individuum impliziert mehr. Die Autonomie des Einzelnen, die freie Entfaltung des Individuums ist eine in langen Kämpfen den kirchlichen und weltlichen

Mächten abgetrotzte Errungenschaft. Autonomie heisst, das ist in der langen Geschichte der Evolution dieses Begriffes in Vergessenheit geraten, Selbstgesetzgebung, Selbstbindung und Selbstverantwortung. Autonomie führt sonst schnurstracks in Anomie. Selbstverantwortung wiederum bedeutet, Einstehen für die Folgen, gerade dann, wenn wir nicht sicher sein können, was kommt. Und Einstehen heisst, Einstehen für Folgen, die jenen entstehen, die vertraut haben. Selbstverantwortung verschmilzt mit Mitverantwortung. Selbstbindung wird zur zukunftsbezogenen interpersonalen Bindung. Wer Verantwortung zu tragen bereit ist, denkt über den Zeithorizont des Hier und Jetzt hinaus und voraus in die Zukunft. Von dieser weiss er eines sicher, dass sie bei allen Unwägbarkeiten von seinen Entscheidungen geprägt ist, im guten oder im schlechten Sinne.

Dieses Verständnis von Verantwortung zügelt den Innovationsdrang und diszipliniert die Gier. Dass jemand seine Freiheit verantwortlich nutzt, ist indes anspruchsvoller und anstrengender als die Repetition und das Vertrauen, dass das Vertraute sich immer wiederholt. In seinem Buch „Die unsichtbaren Städte“ schildert Italo Calvino eine Stadt namens Ottavia, die an einem Netz zwischen zwei Bergen aufgespannt ist. Das Leben in ihr ist, so Calvino, sicherer als in anderen Städten, weil die Bewohner wissen, dass das Netz nur ein bestimmtes Gewicht zu tragen vermag. Das bedeutet, auf unsere



Welt übertragen, dass die Akteure sich auch zu kollektiven Bindungen bekennen müssen, damit nicht einzelne, anarchistische Akteure das Netz zum Reißen bringen.

Diese Sachlage bedarf zweifellos eines Grundvertrauens in eine Gesellschaft der offenen Horizonte. Eine „Certitudo“, die früher vielleicht der Vorsehung Gottes zukam. Certitudo meint ein vertrauensvolles sich Einlassenkönnen auf das Wagnis der Existenz und seine Zukunftsoffenheit. Die Gegenwartssicht ist eingetrübt durch die (eine christliche Erbschaft) verweltlichte Heilsbotschaft einer erschütterungs- und störungsfreien Zukunft und unterschätzt die Vorteile und Geschenke der Offenheit. Eine offene Gesellschaft ist auch offen für Anderes, für Alternativen. Und nicht zuletzt offen dafür, die Selbstverantwortung an Vertrauenspersonen zu delegieren. Nur eine offene Gesellschaft birgt Hoffnung, dass es sich zum Besseren wendet.

Dass wir die Zukunft nicht genau kennen, ist deshalb kein Nach-, sondern ein Vorteil. „Durch die Hoffnung werden wir selig. Die Hoffnung aber, welche man sieht, ist keine Hoffnung, denn was jemand sieht, wie hofft er mehr darauf? (Röm. 8, 24, 25). Das Vertraute wiederholen mag glücklich stimmen, das Unvertraute wagen aber birgt neue Möglichkeiten (Kierkegaard 1961): Möglichkeiten, die sich zum Guten wie zum Schlechten wenden können. Oder in den Worten von David Hume: „Man kann (die

Möglichkeit) des Guten unmöglich vom (Risiko) des Übels trennen.“ Fügen wir hinzu: Auch die Mittel der Prüfindustrie sind im Hinblick darauf sehr beschränkt.

## LITERATUR

Baier, Annette (1986): Trust and Antitrust. In: Ethics 96, S.213-260

Barber, Benjamin R. (2007): Consumed. New York, London: W.W. Norton

Bausenhardt, Guido (2008): Vertrauen in die Kontingenz? Theologische Überlegungen. In: Fischer, Michael, Kaplow, Martin (Hg.): Vertrauen im Ungewissen. Berlin: lit-Verlag

Beck, Ulrich (1986): Risikogesellschaft – auf dem Weg in eine andere Moderne. Frankfurt a. Main: Suhrkamp

Calvino, Italo (1984): Die unsichtbaren Städte. München: Hauser

Fukuyama, Francis (1995): Trust. The Social Virtues and the Creation of Prosperity. New York: Free Press

Gross, Peter (1994): Die Multioptionsgesellschaft. Frankfurt a. Main: Suhrkamp

Gross, Peter (1997): Alle sind fremd. Leben in der Multioptionsgesellschaft. In: Erlanger Forschungen. Reihe A/Geisteswissenschaften, Bd. 77. Universitätsbibliothek Erlangen-Nürnberg, S. 45-55

Gross, Peter (2003): Das Paradoxon der Moderne. In: McK Wissen 07 (Magazin von McKinsey)

Gross, Peter (2004): Kontingenzmanagement. Über das Management der Ungewissheit. forum Nr. 9: Malik Management Zentrum St. Gallen

Gross, Peter (2007): Jenseits der Erlösung. Die Wiederkehr der Religion und die Zukunft des Christentums. Bielefeld: Transcript

Kenning, Peter (2002): Customer Trust Management. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag

Kierkegaard, Sören (1961): Die Wiederholung. Hamburg: Reinbek

Luhmann, Niklas (1973): Vertrauen. Ein Mechanismus der Reduktion sozialer Komplexität. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag

Luhmann, Niklas (1992): Die Beschreibung der Zukunft. In: Luhmann, Niklas: Beobachtungen der Moderne. Opladen: Westdeutscher Verlag. S.129-149

Malik, Fredmund (2008): Die richtige Corporate Governance. Frankfurt a. Main: Campus

Moldaschl, Manfred (2005): Audit-Explosion und Controlling-Revolution. In: Sozial Welt 56, S. 1153-190

Münch, Richard (2009): Globale Eliten, lokale Autoritäten. Bildung und Wissenschaft unter dem Regime von Pisa, McKinsey & Co. Frankfurt am Main: Suhrkamp

Offe, Claus (2001): Wie können wir unseren Mitbürgern vertrauen? In: Hartmann, Martin, Offe, Claus (Hg.): Vertrauen. Die Grundlage sozialen Zusammenhalts. Frankfurt am Main: Campus, S. 241-295

Power, Michael (1997): The Audit Society. Rituals of Verification. Oxford: Univ. press

Schenker-Wicki, Andrea (2008): Auswege aus der Audit-Society: Staatliche Kontrolle versus kollektive Selbstbindung. In: Hirszowcz, Christine u.a. (Hg.): Die ISB-Jahre mit Ruedi Volkart und Hans Geiger: Auf den Wogen von Banking und Finance (Festschrift), Zürich: University of Zurich

Simmel, Georg (1989): Philosophie des Geldes. Frankfurt am Main: Suhrkamp

# AWARD

of the

## CARL VON BACH COMMEMORATIVE MEDAL



The Carl von Bach Commemorative Medal is awarded to

### **Professor Teruo KISHI**

President

National Institute for Materials Science, Ibaraki/ Japan

who rendered outstanding merit with Carl von Bach in mind  
in the support of research, development and teaching  
in the area of materials engineering, materials testing and  
strength of materials in connection with the  
**Materialpruefungsanstalt (MPA) Universität Stuttgart.**



Stuttgart, 8<sup>th</sup> October 2009



Professor Dr.-Ing. habil. Eberhard Roos  
Managing Director



## Verleihung der Carl-von-Bach-Medaille an Prof. Teruo Kishi

Sehr geehrte Damen und Herren,  
keine andere Veranstaltung als die 125 Jahrfeier zum Bestehen der MPA Universität Stuttgart passt besser zur Verleihung der, nach dem MPA Gründer genannten, Carl-von-Bach-Medaille.

Die Carl-von-Bach-Medaille wird in unregelmäßigen Abständen von der MPA Universität Stuttgart Persönlichkeiten verliehen, die im Sinne der Bachschen Philosophie - wonach es keinen Widerspruch zwischen der aufgestellten Theorie und der sich einstellenden Wirklichkeit geben kann und darf - gewirkt und in ihren Arbeiten entsprechend umgesetzt haben.

Ich freue mich, heute eine Persönlichkeit ehren zu können, die mit großem Engagement und Erfolg die Werkstoffwissenschaft wirklich sehr grundlagenorientiert bearbeitet hat, aber dabei die

Verifizierung mit realen Ereignissen und die Anwendungsmöglichkeiten nicht vergessen hat.

Sehr geehrter Herr Professor Kishi, ich darf Sie an dieser Stelle noch einmal besonders begrüßen.

Viele der Anwesenden hier im Auditorium kennen Sie, standen sie doch viele Jahre und stehen sie auch noch heute mit Ihnen in engem fachlichem und auch persönlichem Kontakt.

Lieber Herr Kishi, gestatten Sie mir, dass ich trotzdem kurz aus Ihrem Lebenslauf berichte und auch auf Ihre Arbeiten eingehe.

Sie wurden 1939 geboren, studierten an der Universität Tokio Ingenieurwissenschaft und promovierten an dieser Universität im Jahre 1969. Aufgrund Ihrer

wissenschaftlichen Leistungen wurden Sie 1974 Associate Professor am „Institute of Space and Aeronautical Science“ an der Universität Tokio. 1988 wurden Sie Professor am „Research Center for Advanced Science and Technology“ der Universität Tokio und 1995 Generaldirektor dieses Institutes.

Ende der 90er Jahre wurde in Japan unter wesentlicher Beteiligung von Ihnen ein Prozess eingeleitet, der die zwei wesentlichsten Materialforschungsinstitute vereinigte zu dem heute weltweit führenden Institut „NIMS“, dem „National Institute for Materials Science“, dessen Direktor Sie 2001 wurden. Diese Bündelung von Kompetenzen ist sicher einer der Gründe für den Erfolg der japanischen Materialwissenschaftler, der andere ist die apparative Ausstattung, die für den Erfolg notwendig ist und um die man Sie wirklich beneiden kann.

Die sehr gute Zusammenarbeit zwischen der MPA und einem der Vorgängerinstitute, dem „National Research Institute of Metals (NRIM)“ wurde 1999 durch ein „Memorandum of Understanding“ auf das NIMS übertragen, formalisiert und strukturiert. Diese Kooperationsvereinbarung wurde heute Vormittag erneuert und verlängert.

Die ganzen Jahre war es nicht zuletzt durch Ihre Unterstützung möglich, dass ein kontinuierlicher Austausch von Erfahrungen zwischen den Wissenschaftlern beider Institute in bilateralen

Workshops möglich war, zu denen häufig weitere Wissenschaftler eingeladen wurden und dass kontinuierlich längere Aufenthalte von Wissenschaftlern bilateral möglich waren. Leider waren aus meiner Sicht weniger Mitarbeiter von der MPA am NIMS als umgekehrt. Ich hoffe, dass dieses Verhältnis aber in der Zukunft etwas ausbalanciert werden kann.

Ihre persönliche Entwicklung war das Ergebnis von Forschung auf hohem wissenschaftlichem Niveau. Dabei zieht sich wie ein roter Faden durch all Ihre Arbeiten die Verknüpfung von Theorie und Praxis. Sie haben immer versucht, Vorgänge und Mechanismen in der Mikrostruktur des Werkstoffes aufgrund äußerer Einwirkungen, i. Allg. Belastungen, zu verstehen und abzubilden, d. h. zu simulieren und mit entsprechenden Experimenten zu verifizieren, um eine abgesicherte Basis für die allgemeinere Anwendung zu haben. Ich möchte in diesem Zusammenhang zwei Ihrer Arbeiten kurz ansprechen, die repräsentativ für Ihre Arbeitsweise sind.

Eine Ihrer frühesten Arbeiten befasste sich mit dem Bauschinger Effekt. Sie haben das bekannte Phänomen der Änderung der Festigkeit und Verformung in Form einer Hysterese bei Entlastung und Wiederbelastung untersucht. Sie erarbeiteten Beziehungen zur Berechnung der Fließfläche, also der Streckgrenze, in Abhängigkeit von mehrachsigen Spannungszuständen und der Werkstoffani-

sotropie in Folge herstellungsbedingter Texturen.

Da mikrostrukturelle Vorgänge die Werkstoffschädigung auslösen, war es nur konsequent, eine Methode zu suchen, mit der diese Vorgänge, die theoretisch und experimentell identifizierbar sind, auch durch zerstörungsfreie Prüfung im Bauteil nachzuweisen. Dabei stießen Sie auf die Schallemissionstechnik.

Die Interaktion von mikrostrukturellen Vorgängen im Werkstoff, die zum Bauteilversagen führen können und deren frühe Detektion mit der Schallemissionstechnik hat Sie dann nicht mehr losgelassen und das gesamte Berufsleben begleitet. Dabei haben Sie die theoretischen Grundlagen erarbeitet und weil damals die heute weitverbreitete Finite-Elemente-Technik diese Phänomene noch nicht beherrschte, haben Sie eigene Programme auf der Basis der Finiten-Differenzen erstellt.

Diese wissenschaftliche Vorgehensweise, d. h. die Verknüpfung von Beanspruchung, Mikrostrukturverhalten des Werkstoffs und die Detektion von Schädigungsmechanismen mittels der zerstörungsfreien Prüfung und dabei vor allem der Schallemissionstechnik, hat Ihnen weltweit hohe Anerkennung sowie zahlreiche Ehrungen eingebracht.

Diese Arbeitsphilosophie - die Beschreibung des Zusammenwirkens von Material- und Ingenieurwissenschaft -

entspricht der Carl von Bachs und ist ein wesentliches Element des heutigen technischen Fortschritts und damit einer der Gründe für die Verleihung der Carl von Bach Medaille.

Ein weiterer ist die Ausbildung von qualifiziertem Nachwuchs. Hier haben Sie mit dem Aufbau des „International Center for Young Scientists“ eine Idee verwirklicht, die Vorbildcharakter hat und, wie Sie es formulieren, einen multikulturellen Schmelztiegel junger Wissenschaftler bildet. Denn nichts ist so fruchtbar für die persönliche und fachliche Entwicklung wie Diskussionen und gemeinsames Arbeiten. Auch hier schließt sich der Kreis zu Carl von Bach, denn in der Verfügung mit der Bekanntmachung der Errichtung der MPA steht: „Die Materialprüfungsanstalt ist bestimmt, den Interessen der Industrie wie auch derjenigen des Unterrichts zu dienen“.

Ich freue mich sehr, Ihnen heute die Carl-von-Bach-Medaille überreichen zu können.

## **Sponsoren**

**Die Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart  
dankt allen Firmen herzlich für die freundliche Unterstützung  
unserer Festveranstaltung am 8. Oktober 2009!**





**Kernkraftwerk  
Philippsburg – KKP**  
Rheinschanzinsel  
76661 Philippsburg  
[www.enbw.com/kkp](http://www.enbw.com/kkp)

**Kernkraftwerk  
Neckarwestheim – GKN**  
Im Steinbruch  
74382 Neckarwestheim  
[www.enbw.com/gkn](http://www.enbw.com/gkn)

**Kernkraftwerk  
Obrigheim – KWO**  
Kraftwerkstraße 1  
74847 Obrigheim  
[www.enbw.com/kwo](http://www.enbw.com/kwo)



**amtec**  
Messtechnischer Service GmbH  
Hoher Steg 13  
74348 Lauffen  
Tel.: 07133/9502-0  
Fax.: 07133/9502-22  
[info@amtec.de](mailto:info@amtec.de) [www.amtec.de](http://www.amtec.de)



**Advanced Test Consulting**  
Dr.-Ing. Gerhard Mall  
Gleisselstetten 25/1  
D-89081 Ulm  
Tel.: 0731/9 38 78 47  
e-mail: [mall@atc-ulm.de](mailto:mall@atc-ulm.de)



**Carbolite GmbH**  
Ubstadter Straße 28  
76698 Ubstadt-Weiher  
Tel.: 00 49 (0) 72 51 96 22 86  
Fax: 00 49 (0) 72 51 96 22 85  
<http://www.carbolite.com>













**DYNA-MESS Prüfsysteme GmbH**  
Leimberg 19  
D-52222 Aachen/Stolberg  
Tel.: (02402) 766810  
Fax: (02402) 7668160  
[info@dyna-mess.de](mailto:info@dyna-mess.de)  
[www.dyna-mess.de](http://www.dyna-mess.de)













**FORM + TEST Seidner & Co. GmbH**  
Zwiefalterstr. 20 POB 1154  
D-88491 Riedlingen  
Tel.: 07371/9302-0 Fax 07371/9302-99  
[info@formtest.de](mailto:info@formtest.de) [www.formtest.de](http://www.formtest.de)



**GTM Gassmann Testing  
and Metrology GmbH**  
Philipp-Reis-Straße 6  
D-64404 Bickenbach  
Tel.: +49 (0) 6257 / 9720-0  
Fax: +49 (0) 6257 / 9720-77  
<http://www.gtm-gmbh.com>

 <p><b>Hegewald &amp; Peschke</b> Meß- und Prüftechnik GmbH</p> <p>Hegewald &amp; Peschke Meß- und Prüftechnik GmbH Am Gründchen 1 D-01683 Nossen Tel (035242) 445 10 Fax (035242) 445 11 www.hegewald-peschke.de</p>	 <p>Hilti Corporation 9494 Schaan Liechtenstein Feldkircherstrasse 100/P.B. 333 Tel.: +423-234 2111 Fax: +423-234 2965 www.hilti.com</p>	 <p>Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V.</p> <p>Industrieverband Steine und Erden Baden-Württemberg e.V. Gerhard-Koch-Straße 2 73760 Ostfildern Tel.: 0711 / 32732-100 Fax: 0711 / 32732-127 eMail: verband@iste.de www.iste.de</p>
 <p><b>Inova</b> Prüfsysteme</p> <p>Inova GmbH Brunnenstr. 51 D-65307 Bad-Schwalbach Tel.: +49 6124 7276945 Fax: +49 6124 7276946 www.inova-gmbh.com</p>	 <p><b>INSTRON®</b></p> <p>Instron® Deutschland GmbH Werner-von-Siemens-Strasse 2 64319 Pfungstadt, Germany tel +49 (0) 6157 4029 600 fax +49 (0) 6157 4029 700 www.instron.de</p>	 <p><b>IST</b> INSTRON® STRUCTURAL TESTING SYSTEMS</p> <p>Instron Structural Testing Systems GmbH Landwehrstr. 65 64293 Darmstadt Tel.: +49 6151 3917-0 Fax: +49 6151 3917-500 www.instron.com</p>
 <p><b>MCT</b> MATCOMPTEST GMBH <i>Materials &amp; Components Testing!</i></p> <p>MatCompTest GmbH Kleyerstr. 7 D-64295 Darmstadt Fon +49 6151 / 9068812 Fax +49 6151 / 9068813 E-Mail: info@matcomptest.de www.matcomptest.de</p>	 <p><b>MAYTEC</b> Hochttemperatur-Vakuum-Prüfssysteme</p> <p>[mV/V/mm] ΔL [μ] [W/(K·m)] [K] [kN] [°C] [mbar]</p> <p>info@maytec-ht.de www.maytec-ht.de</p> <p>MAYTEC Mess- und Regeltechnik GmbH</p>	 <p><b>Messtek</b> Prüfsysteme GmbH</p> <p>MessTek Prüfsysteme GmbH info@messtek.de www.messtek.com</p>
 <p><b>PCI®</b> Für Bau-Profis</p> <p>PCI Augsburg GmbH Piccardstr. 11 86159 Augsburg Postfach 10 22 47 86012 Augsburg Tel.: +49 (8 21) 59 01-0 Fax: +49 (8 21) 59 01-372 E-Mail: pci-info@basf.com</p>	 <p><b>SAFA®</b></p> <p>SAFA Saarfiterasche-Vertriebs- GmbH &amp; Co. KG Römerstraße 1, 76532 Baden-Baden www.safa.de</p>	 <p><b>SAG</b> Ingenieure</p> <p>SAG-Ingenieure Süddeutsche Abwasserreinigungs-Ingenieur GmbH Hörvelsinger Weg 23, D-89081 Ulm Tel.: +49 731 / 96 41 - 0 Fax: +49 731 / 6 06 63 www.sag-ingenieure.de</p>

 <p><b>Sakowsky GmbH</b>          Vertrieb von Spezialzementen          Riedstr. 14          D-71691 Freiberg a. N.          Fon.: 07141/688759-0          Fax: 07141/707478          www.sakowsky.de</p>	 <p><b>SANDNER-Messtechnik GmbH</b>          Am Winkelgraben 4          64584 Biebesheim/Rh.          Tel (06258) 98 38-0          Fax (06258) 98 38-20          www.sandner-messtechnik.com          info@sandner-messtechnik.de</p>	 <p><b>SCHWENK Zement KG</b>          Hindenburgring 15          89077 Ulm          Tel.: 07 31 / 93 41 - 0          Fax: 07 31 / 93 41 - 416          www.schwenk.de</p>
 <p><b>SHIMADZU</b>          Solutions for Science          since 1875          Testing Machines:          Universal Testing Machines          Hardness Tester          High-Speed Video Camera          Capillar Rheometer          Shimadzu Europa GmbH          Albert-Hahn-Str. 6-10 47269 Duisburg          www.shimadzu.eu</p>	 <p><b>Toni Technik Baustoff-          prüfsysteme GmbH</b>          Gustav-Meyer-Allee 25          13355 Berlin          Phone: +49-(0)30-464039-0          Fax: +49-(0)30-464039-22          www.tonitechnik.com</p>	 <p><b>TRIES - Hydraulik-          partner für innovative          Produktideen.</b>          TRIES GmbH &amp; Co. KG          Hydraulik-Elemente          Ehingen          Röntgenstraße 10 89584 Ehingen          Fon 00 49 (0)73 91/58 09-0          Fax 00 49 (0)73 91/58 09 -50          e-mail: info@tries.de          www.tries.de</p>
 <p><b>walter+bai ag Prüfmaschinen</b>          Industriestraße 4          CH-8224 Löhningen, Schweiz          Tel.: +41 (0)52 687 25 25          Fax: +41 (0)52 687 25 20          info@walterbai.com          www.walterbai.com</p>	 <p><b>Xella Kundeninformation:</b>          Telefon: 0800 5235665 (freecall)          Telefax: 0800 5356578 (freecall)          www.ytong-silka.de</p>	 <p><b>Eduard Züblin AG</b>          Albstadtweg 3          70567 Stuttgart          www.zueblin.de</p>
 <p><b>Zwick GmbH &amp; Co. KG</b>          August-Nagel-Straße 11          D-89079 Ulm          Tel.: 07305-10-0          Fax: 07305-10-200          eMail: info@zwick.de          www.zwick.de</p>		

**Bildergalerie**  
**Festveranstaltung 8. Oktober 2009**  
**in der Staatsgalerie in Stuttgart**

















## Impressum

### Herausgeber:

Materialprüfungsanstalt  
MPA Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 32  
D-70569 Stuttgart  
[www.mpa.uni-stuttgart.de](http://www.mpa.uni-stuttgart.de)

### Redaktion:

E. Roos  
S. Bisinger  
A. Kleinbauer

### Konzeption und Gestaltung:

Ulrich Franz Grafik Design + Illustration, Reutlingen

### Druck:

DCC Siegmars Kästl e.K., Ostfildern

© 2010 Materialprüfungsanstalt MPA Universität Stuttgart



