

Studie

- Titel:* **„Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen einschließlich der Festigkeitsberechnung“**
- Auftraggeber:* **Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.**
- Erarbeitung:* **Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH**
- Leitung:* Dr.-Ing. Steffen Keitel
- mitwirkende Bearbeiter:* Dipl.-Ing. Bernd Kranz, Dr.-Ing. Jochen Schuster
- Zeitraum:* Oktober 2001 bis April 2002

Die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH als Ausführender der Gesellschaft für Schweißtechnik International mbH hat mit dieser Studie die Gelegenheit, den Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren bei der Findung neuer Forschungsfelder auf dem Gebiet der Berechnung und Konstruktion gefügter metallischer Konstruktionen zu unterstützen. In diesem Zusammenhang gilt unser Dank allen, die bei der Ausgestaltung dieser Studie behilflich waren. Insbesondere sind hier die Referenten des DVS-Forschungsseminars vom 24.01.2002 zu nennen, die mit ihren Vorträgen in erheblichen Maße zum Gelingen dieser Studie beigetragen haben. Ebenfalls möchten wir uns bei Prof. Dr.-Ing. Hobbacher (FH Wilhelmshafen), Prof. Dr.-Ing. Wohlfahrt (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Zenner (TU Clausthal), Dr.-Ing. Hänel (IMA Dresden), Dr.-Ing. U. Zerbst (GKSS Geesthacht) und Dr.-Ing. Kaßner (Fa. ALSTOM LHB, Vorsitzender des FA 9) für ihre Zuarbeit bedanken, die vor allem in den Abschnitt 4 über den Forschungsbedarf eingeflossen ist. Unser Dank gilt aber auch jenen, die sich Zeit für die Beantwortung unseres Fragebogens genommen haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	5
2 Umfrage zur Auslegung gefügter metallischer Konstruktionen	8
2.1 Vorbemerkungen.....	8
2.2 Ergebnisse der Umfrage	8
2.2.1 Allgemeiner Stand der Berechnung und Konstruktion	8
2.2.2 Fügeverfahren und deren Berücksichtigung bei der Festigkeitsauslegung	10
2.2.3 Erfassen des Werkstoffverhaltens bei der Berechnung und Konstruktion.....	13
2.3 Aus den Umfrageergebnissen folgender Forschungsbedarf	14
2.3.1 Forschungseinrichtungen	14
2.3.2 Automobilbau	16
2.3.3 Maschinenbau.....	16
2.3.4 Nutzfahrzeugbau.....	16
2.3.5 Schienenfahrzeugbau	17
2.3.6 Schiffbau	17
2.3.7 Leichtmetallbau	17
2.3.8 Stahlbau.....	17
2.3.9 Rohrleitungsbau/Druckbehälter	18
2.3.10 Klebetechnik	18
3 Ergebnisse des DVS-Forschungsseminars	19
4 Schlussfolgerungen für Forschungsbedarf	22
4.1 Vorbetrachtungen.....	22
4.2 Erfassen von Fertigungseinflüssen.....	22
4.2.1 Auswirkungen neuerer Schweißtechnologien	22
4.2.2 Erfassen der Nahtqualität.....	23
4.2.3 Einsatz von Nachbehandlungsverfahren	24
4.3 Unterschiede in den Ermüdungsfestigkeitskennwerten von Kleinproben und realen Schweißkonstruktionen.....	24
4.3.1 Allgemeine Hinweise	24
4.3.2 Analyse der vorhandenen Datenbasis zur Ermüdungsfestigkeit und Erstellen einer Referenz-Datenbank	25
4.3.3 Entwicklung von Vorgehensweisen zur differenzierten Erfassung der in Schweißkonstruktionen vorliegenden, für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit maßgebenden Eigenspannungen.....	25
4.4 Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen.....	26
4.4.1 Lastkollektivermittlung	26
4.4.2 Schadensakkumulation	26
4.4.3 Mehrachsigkeit.....	27
4.5 FE-Berechnung der Beanspruchungen in geschweißten Bauteilen und Anwendung örtlicher Nachweiskonzepte	27
4.6 Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen	28
4.7 Geklebte Bauteilverbindungen	29
5 Zusammenfassung.....	30
6 Verzeichnisse	31

6.1	Abbildungsverzeichnis.....	31
6.2	Tabellenverzeichnis.....	31
6.3	Literaturverzeichnis	32

1 Einleitung

Produkte der deutschen Industrie zeichneten sich bisher durch innovative Ideen, eine hohe Qualität und eine lange Lebensdauer bei geringst möglichem Materialverbrauch aus. Um der internationalen Konkurrenz auch in Zukunft entsprechendes Know-how entgegenzustellen und somit Beschäftigung und Nachfrage auf dem Binnenmarkt festigen zu können, sind weitere Anstrengungen auf dem Gebiet der Forschung und Entwicklung notwendig. So muss sich auch die Fügetechnik als integrativer Teil der Systemtechnik verketteter Fertigungsprozesse dem raschen Fortschreiten des Entwicklungsstandes in Naturwissenschaft und Technik stellen und von vornherein sowohl in die Fertigungsplanung als auch in die Produktentwicklung, Konstruktion und Dimensionierung einbezogen werden. Dies gilt speziell auch für Anwendungen in klein- und mittelständischen Unternehmen.

Neben neuen Verfahren der Schweißtechnik wie z. B. Laserstrahl- und Elektronenstrahlschweißen etablieren sich zunehmend auch andere Fügeverfahren auf dem Markt. Verfahren wie Kleben, Löten, Durchsetzfügen, Stanznieten, Nieten sowie Hybridverfahren gilt es, auf dem weiteren Weg in die Forschung und Entwicklung zu integrieren sowie aus der Sicht der Schweißsicherheit neu zu bewerten. Gleiches trifft auch für neue Materialien wie hochfeste Feinkornbaustähle, Aluminium- oder Magnesiumlegierungen sowie für Bauteilverbindungen aus diesen Werkstoffen zu. Darüber hinaus sind die zunehmenden Möglichkeiten der Nachbehandlung von Schweißverbindungen in ihrer Wirkung auf die Festigkeit zu erfassen.

Daher gilt es neben der Bewertung neuer Verfahren und Werkstoffe insbesondere, bestehende Berechnungsverfahren weiterzuentwickeln oder zu optimieren und gegebenenfalls fehlende zu ergänzen. Dabei werden auch spezielle Einflussgrößen der Fügetechnik wie die bemessungsrelevante Bewertung von unvermeidlichen Ungängen in der Fügeverbindung eine Rolle spielen müssen.

Diese Studie hat das Ziel, auf dem Gebiet der Konstruktion und Festigkeitsauslegung von gefügten Bauteilen Erfordernisse aufzuzeigen, um sie in kommende Forschungsarbeiten aufzunehmen. Zur Steigerung der Effizienz der Forschungsarbeit wird es dabei notwendig sein, Interessen einzelner Industriezweige und Branchen zu bündeln. Dies ist das vorrangige Ziel des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. - DVS und der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren.

Der DVS setzt mit dieser Studie seine Bemühungen fort, den Forschungsbedarf der Industrie für die Zukunft vorab zu ermitteln, um eigene Aktivitäten konzentrieren und den Fortschritt in Forschung und Entwicklung forcieren zu können. Diese Studie ist deshalb als Anknüpfung an bereits erarbeitete Studien zu sehen.

Die bisherigen Studien „Innovative Fügetechniken für die Produktion von morgen“ (01/2000), „Herausforderungen an die Fügetechnik im innovativen Anlagenbau“ (01/2001) und „Függbarkeit von Bauteilen aus innovativen Werkstoffen“ (06/2001) beschäftigten sich hauptsächlich mit neuen Fügetechnologien und neuen Werkstoffen d.h. mit der Schweißbarkeit in Hinsicht auf Schweißbeugung und Schweißmöglichkeit.

Mit dieser Studie wird nun der dritte wesentliche Einfluss auf die Schweißbarkeit von Bauteilen – die Schweißsicherheit – aufgegriffen (Abbildung 1). Dies betrifft Fragestellungen zur Konstruktion und Auslegung von zu verbindenden Bauteilen, wobei wiederum als Verbindungsverfahren nicht nur das Schweißen sondern auch alternative Fügetechniken betrachtet werden,

die, wie bereits erwähnt, vor allem bei dünnwandigen Bauteilen zunehmend an Bedeutung gewinnen (z. B. mechanisches Fügen, Kleben etc.).

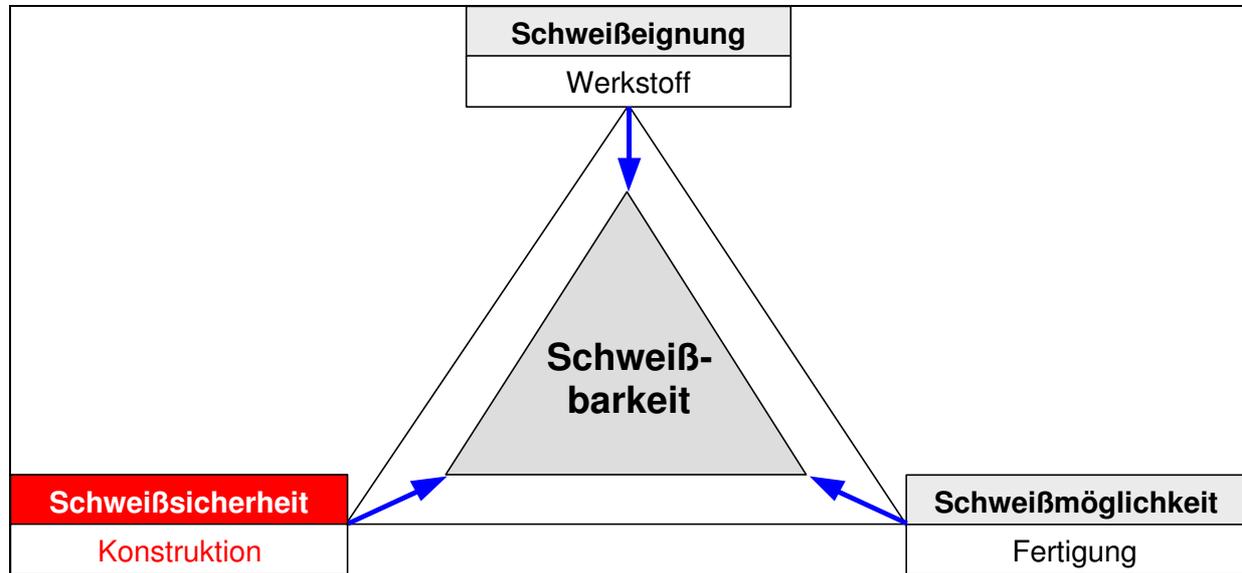


Abbildung 1: Begriff der Schweißbarkeit

Analog zu den vorangegangenen Studien basiert auch diese im Wesentlichen auf der Auswertung einer detaillierten Umfrage in Industrie und Forschungseinrichtungen zum gegenwärtigen Stand und zu offenen Problemen auf dem Gebiet der Konstruktion und Berechnung gefügter Bauteile sowie auf Ergebnissen eines Forschungsseminars, auf dem kompetente Vertreter aus Forschung und Industrie zu dieser Thematik am 29.1.02 in Stuttgart referiert haben.

Sowohl bei der Ausarbeitung des Fragebogens und als auch bei der Auswahl bzw. Festlegung der einzelnen Vortragsthemen für das Forschungsseminar wurde versucht, die mit dieser Thematik verbundenen umfangreichen Aspekte näher einzugrenzen, um damit bereits im Vorfeld eine Fokussierung auf wichtige offene Forschungsfelder vorzunehmen. Aus dem allgemeinen Kenntnisstand [1, 2, 3, 4] und insbesondere aus den aktuellen Forschungsaktivitäten innerhalb der Forschungsvereinigung des DVS – dies betrifft vor allem laufende Forschungsvorhaben – folgt, dass vor allem auf dem Gebiet der Schwingfestigkeit gefügter Bauteile eine größere Zahl offener Fragen zu verzeichnen ist. Daher stehen im Mittelpunkt dieser Studie vor allem Fragestellungen und ungelöste Problemfelder zur ermüdungsfesten Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen.

Die Schwingfestigkeit von gefügten Bauteilen hängt von zahlreichen Einflussgrößen ab, die sich in unterschiedlicher Weise auf die Beanspruchbarkeit der Verbindungen auswirken können. In Abbildung 2 sind die wesentlichen Abhängigkeiten dargestellt, die bei der Auslegung von zu verbindenden Bauteilen zu berücksichtigen sind. Diese Zusammenstellung bildete eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung des Fragebogens und für die Themenfestlegung zum Forschungsseminar.

Im Folgenden wird über die Ergebnisse der Umfrage und des Forschungsseminars berichtet und darauf aufbauend werden die wesentlichen daraus folgenden offenen Forschungsfelder aufgezeigt.

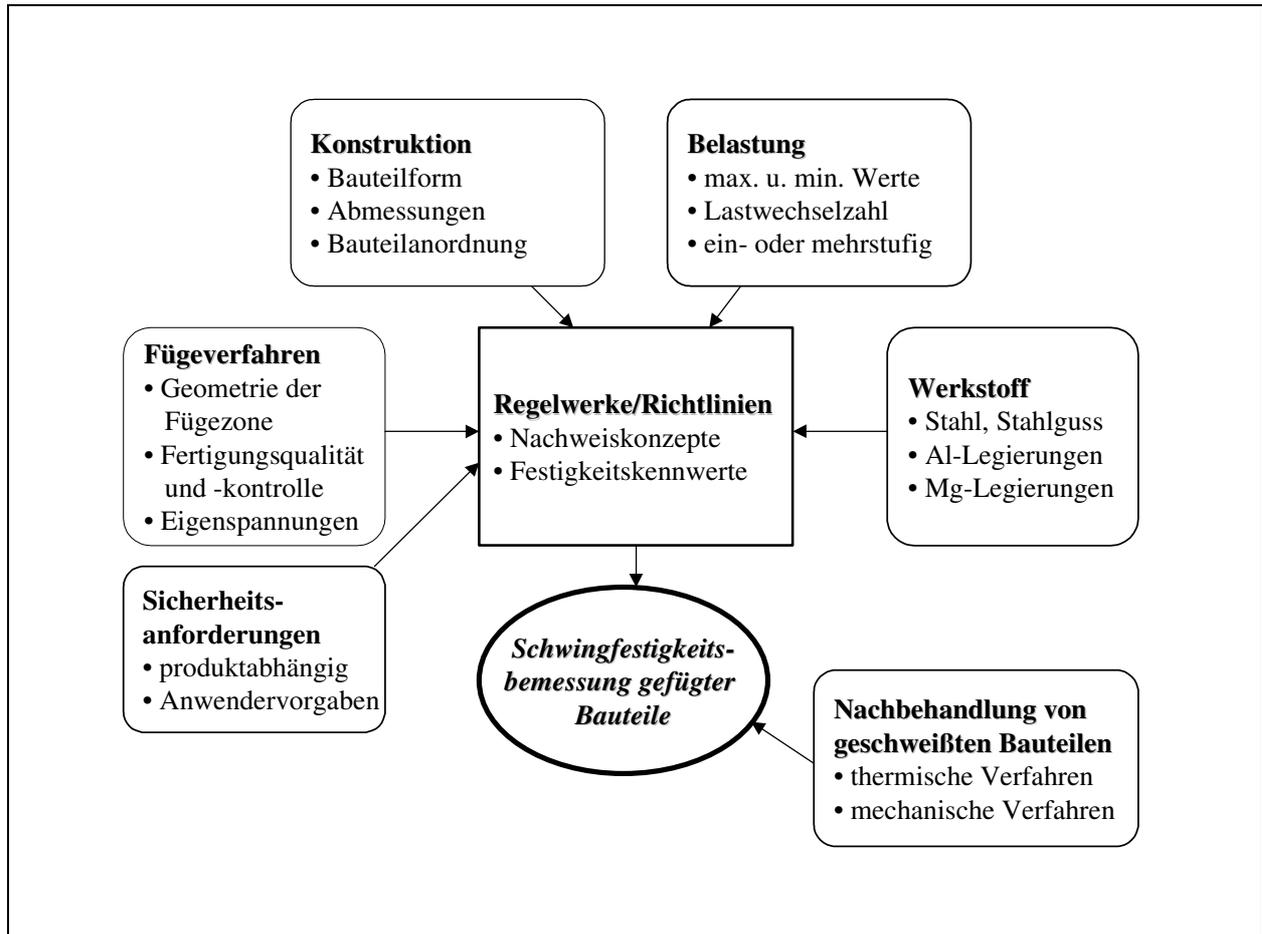


Abbildung 2: Einflussfaktoren der Festigkeitsauslegung von gefügten metallischen Bauteilen

2 Umfrage zur Auslegung gefügter metallischer Konstruktionen

2.1 Vorbemerkungen

Die Befragung von Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen der verschiedensten Branchen zur Konstruktion und Festigkeitsauslegung gefügter Bauteilverbindungen erfolgte im Zeitraum von 12/2001 bis 01/2002. Dabei wurden folgende Hauptproblemfelder angesprochen:

- ◆ Allgemeiner Stand der Auslegung und Konstruktion (Abschnitt 2.2.1)
- ◆ Fügeverfahren und deren Berücksichtigung bei der Festigkeitsauslegung (Abschnitt 2.2.2)
- ◆ Erfassen des Werkstoffverhaltens bei der Berechnung und Konstruktion (Abschnitt 2.2.3).

Gleichzeitig wurde nach offenen Problemen bzw. dem Forschungsbedarf zu diesen drei genannten Schwerpunkten gefragt. An der Befragung nahmen 31 Unternehmen und Forschungseinrichtungen teil. Die Tabelle 1 gibt Aufschluss über die Beteiligung von Firmen aus den verschiedenen Industriezweigen. Anlage A enthält die einzelnen Fragestellungen.

Sparte	Anzahl
Forschungseinrichtungen	9
Automobilindustrie	3
Maschinenbau	4
Nutzfahrzeugbau	1
Schienerfahrzeugbau	4
Kraftwerksanlagenbau	1
Schiffbau	3
Leichtbau	1
Stahlbau	1
Rohrleitungs- und Druckbehälterbau	2
Klebstoffentwicklung	2

Tabelle 1: Umfragebeteiligung

Die Ergebnisse der Befragung sind in Tabellenform zusammengefasst worden, womit sich ein besserer Überblick insbesondere für eine vergleichende Betrachtung ergibt. Die Tabellen enthalten jeweils in der linken Spalte den Schwerpunkt der jeweiligen Frage in stichwortartiger Form. Um den sich daraus ergebenden Stand in der Auslegung und Konstruktion in etwas verallgemeinerter Form darstellen zu können, sind geringfügige Pauschalierungen in den einzelnen Angaben der verschiedenen Firmen vorgenommen worden.

2.2 Ergebnisse der Umfrage

2.2.1 Allgemeiner Stand der Berechnung und Konstruktion

Hierbei wurden Fragen vor allem zu folgenden Punkten gestellt:

- ◆ Erfolgt ein Einsatz der Methode der Finiten Elemente bei der Berechnung von Bauteilen?
- ◆ Erfolgt eine schwingfeste Auslegung von Konstruktionen?
- ◆ Welche Spannungskonzepte werden angewendet?
- ◆ Werden Unregelmäßigkeiten in der Fügeverbindung bei der Auslegung berücksichtigt?

Die Tabelle 2 und Tabelle 3 enthält eine Übersicht der getroffenen Aussagen zu diesem Fragenkomplex.

	Forschung	Maschinenbau	Automobilindustrie	Nutzfahrzeugbau	Schiene-fahrzeugbau
Nutzung der FEM	ja	ja	ja	ja	ja
schwingfeste Auslegung	ja	ja	ja	ja	ja
Dauerfestigkeit	ja	ja	ja	nein	ja
Zeitfestigkeit im Bereich hoher Lastspielzahlen	ja	ja	ja	ja	nein
Zeitfestigkeit im Bereich niedriger Lastspielzahlen	ja	ja	ja	nein	nein
Betriebsfestigkeit	ja	ja	ja	ja	Ja
Nennspannungen	ja	ja	ja	ja	ja
Strukturspannungen	ja	ja	ja	ja	ja
Kerbspannungen	ja	ja	ja	ja	nein
Bruchmechanik	ja	nein	ja	nein	nein
Bauteilversuche	ja	ja	ja	ja	ja
Lastkollektive für Betriebsfestigkeit	aus eigenen Ermittlungen, Betriebsmessungen bzw. Betriebsüberwachungssystemen	Simulation von Lastkollektiven, eigene Ermittlungen	Lastkollektive aus Messungen und eigenen Ermittlungen	Lastkollektive aus Messungen und eigenen Ermittlungen	Lastkollektive aus Streckenmessungen, UIC
Berücksichtigung von Unregelmäßigkeiten in der Fügeverbindung	ja	ja	ja	ja	ja
mit Bezug auf	DIN EN 25817, eigene Forschungsergebnisse	DIN EN 25817, FKM-Richtlinie, eigene empirische Ermittlung, Bauteilversuche	DIN EN 25817, Werknormen	Versuchsergebnisse	DS 952
offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 2: Aussagen zur Berechnung gefügter Verbindungen (1)

	Leichtbau	Stahlbau	Rohrleitungs- und Behälterbau	Kraftwerksanlagenbau	Schiffbau	Klebstoffentwicklung
FEM	ja	nein	nein	ja	ja	ja
schwingfeste Auslegung	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Dauerfestigkeit	ja	ja	nein	ja	ja	ja
Zeitfestigkeit im Bereich hoher Lastspielzahlen	nein	nein	nein	ja	nein	ja
Zeitfestigkeit im Bereich niedriger Lastspielzahlen	nein	nein	nein	ja	nein	ja
Betriebsfestigkeit	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Nennspannungen	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Strukturspannungen	nein	nein	nein	ja	nein	ja
Kerbspannungen	nein	nein	nein	ja	ja	nein
Bruchmechanik	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Bauteilversuche	nein	nein	nein	ja	ja	ja
Lastkollektive für Betriebsfestigkeit	Lastkollektive für Betriebsfestigkeit nicht erforderlich	Lastkollektive für Betriebsfestigkeit nicht erforderlich	Lastkollektive für Betriebsfestigkeit nicht erforderlich	Lastkollektive vom Kunden, aus Messungen oder aus der FKM-Richtlinie	Lastkollektive aus Regelwerken der Klassifikationsgesellschaften, Bauvorschrift für Seeschiffe	Lastkollektive durch eigenständige Ermittlung, Regelwerke der Zulassungsgesellschaften oder Industrienormen
Berücksichtigung von Unregelmäßigkeiten in der Fügeverbindung	ja	ja	ja	ja	ja	nein
mit Bezug auf	DIN EN 30042	DIN EN 25817	DIN EN 25817	KTA	DIN EN 25817	keine Angabe
offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 3: Aussagen zur Berechnung gefügter Verbindungen (2)

2.2.2 Fügeverfahren und deren Berücksichtigung bei der Festigkeitsauslegung

Der zweite Hauptschwerpunkt der Umfrage bezieht sich auf Fügeverfahren und auf deren Berücksichtigung bei der Auslegung und Gestaltung von mit diesen Verfahren hergestellten Konstruktionen. Dabei wurden Schweißverfahren und andere Fügeverfahren, wie z. B. mechanisches Fügen oder Kleben, getrennt betrachtet. Im Einzelnen wurde nach folgenden Punkten gefragt:

- ◆ Welche Schweißverfahren werden in den Unternehmen eingesetzt?
- ◆ Finden die Besonderheiten der Schweißverfahren ausreichende Berücksichtigung bei der Konstruktion und Berechnung?
- ◆ Liegen detaillierte Festigkeitskennwerte vor, mit denen die Auswirkungen dieser Schweißverfahren erfasst werden können?

In der Tabelle 4 und Tabelle 5 sind die hierzu erhaltenen Antworten aufgeführt.

	Forschung	Maschinenbau	Automobilindustrie	Nutzfahrzeugbau	Schienenfahrzeugbau
Gasschweißen	ja	nein	nein	nein	nein
Lichtbogenhand-schweißen	ja	ja	ja	ja	ja
MAG-Schweißen	ja	ja	ja	ja	ja
MIG-Schweißen	ja	ja	ja	nein	ja
WIG-Schweißen	ja	ja	ja	nein	ja
UP-Schweißen	ja	ja	ja	ja	ja
Widerstandsschweißen	ja	ja	ja	ja	ja
Reibschweißen	ja	nein	ja	ja	nein
Rührreibschweißen	ja	nein	nein	nein	nein
Elektronenstrahl-schweißen	ja	nein	ja	nein	nein
Laserstrahlschweißen	ja	nein	ja	nein	ja
Plasmaschweißen	ja	nein	nein	nein	nein
Hybridverfahren (z. B. Laserstrahl-MIG-Verfahren)	ja	nein	nein	nein	nein
andere	Ultraschall, Lichtbogenbolzen				
Ausreichende Berücksichtigung der Besonderheiten dieser Verfahren	nein	nein	nein	ja	ja
Ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Verfahren	nein	nein	nein	nein	ja
Offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 4: Aussagen zu Schweißverfahren (1)

	Leichtbau	Stahlbau	Rohrleitungs- und Behälterbau	Kraftwerksanlagenbau	Schiffbau	Klebstoffentwicklung
Gasschweißen	nein	nein	ja	keine Aussage	ja	nein
Lichtbogenhand-schweißen	nein	ja	ja	keine Aussage	ja	nein
MAG-Schweißen	nein	ja	ja	keine Aussage	ja	nein
MIG-Schweißen	ja	nein	ja	keine Aussage	ja	nein
WIG-Schweißen	ja	nein	ja	keine Aussage	ja	nein
UP-Schweißen	nein	ja	ja	keine Aussage	ja	nein
Widerstandsschweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Reibschweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Rührreibschweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Elektronenstrahl-schweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Laserstrahlschweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	ja	nein
Plasmaschweißen	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Hybridverfahren (z. B. Laserstrahl-MIG-Verfahren)	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
andere			Orbital, Bolzen			
Ausreichende Berücksichtigung der Besonderheiten dieser Verfahren	ja	ja	ja	keine Aussage	nein	nein
Ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Verfahren	ja	ja	ja	keine Aussage	nein	nein
Offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 5: Aussagen zu Schweißverfahren (2)

Die Fragen zu den anderen Fügeverfahren betreffen folgende Punkte:

- ◆ Welche anderen Fügeverfahren werden in den Unternehmen eingesetzt?
- ◆ Sind gesicherte Vorgehensweisen zur Berechnung solcher Verbindungen verfügbar?
- ◆ Werden die Besonderheiten dieser Fügeverfahren bei der Konstruktion und Berechnung berücksichtigt?
- ◆ Gibt es ausreichende Festigkeitskennwerte für die Auslegung von mit diesen Verfahren gefügten Verbindungen?

Die Tabelle 6 und Tabelle 7 enthalten die Antworten zu diesen Fügeverfahren.

	Forschung	Maschinenbau	Automobilindustrie	Nutzfahrzeugbau	Schienenfahrzeugbau
Löten	ja	nein	ja	nein	ja
Kleben	ja	nein	ja	ja	ja
Durchsetzfügen	ja	nein	ja	ja	ja
Stanznieten	ja	nein	ja	nein	nein
Nieten	nein	nein	ja	ja	ja
Hybridverfahren	ja	nein	ja	ja	nein
andere					Schrumpfverbindungen, Schrumpf-Klebeverbindungen
Gesicherte Vorgehensweisen zur Berechnung dieser Verfahren	nein	nein	nein	nein	
Ausreichende Berücksichtigung der Besonderheiten dieser Verfahren	nein	nein	ja, nach Bauteilprüfungen	ja, nach Bauteilprüfungen	ja, nach Bauteilprüfungen
Ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Verfahren	nein	nein	nein	nein	
Offene Probleme	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 6: Aussagen zu anderen Fügeverfahren (1)

	Leichtbau	Stahlbau	Rohrleitungs- und Behälterbau	Kraftwerksanlagenbau	Schiffbau	Klebstoffentwicklung
Löten	nein	nein	nein	keine Aussage	ja	nein
Kleben	nein	nein	nein	keine Aussage	ja	ja
Durchsetzfügen	ja	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Stanznieten	ja	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Nieten	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	nein
Hybridverfahren	nein	nein	nein	keine Aussage	nein	ja
andere	-	Schrauben	-	-	-	-
Gesicherte Vorgehensweisen zur Berechnung dieser Verfahren	ja	ja	nein	keine Aussage	ja	nein
Ausreichende Berücksichtigung der Besonderheiten dieser Verfahren	ja	ja	nein	keine Aussage	ja	nein
Ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Verfahren	ja	ja	nein	keine Aussage	nein	nein
Offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 7: Aussagen zu anderen Fügeverfahren (2)

2.2.3 Erfassen des Werkstoffverhaltens bei der Berechnung und Konstruktion

Hierbei wurden Fragen zu Werkstoffen und deren Festigkeitserfassung bei der Auslegung von gefügten Bauteilen sowie zum Einsatz und zur Bewertung von Nachbehandlungsverfahren gestellt, mit denen die Verbindungsfestigkeit verbessert werden kann.

- ◆ Welche Werkstoffe werden verwendet?
- ◆ Gibt es ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Werkstoffe?
- ◆ Für welche Werkstoffe bzw. Werkstoffverbindungen fehlen Festigkeitskennwerte?
- ◆ Werden Nachbehandlungsverfahren zur Steigerung der Schwingfestigkeit eingesetzt?
- ◆ Sind ausreichende Erkenntnisse über die Wirkung von Nachbehandlungsverfahren und deren Berücksichtigung bei der Auslegung vorhanden?

In Tabelle 8 und Tabelle 9 sind die zu diesen Fragen erhaltenen Ergebnisse aufgeführt.

	Forschung	Maschinenbau	Automobilindustrie	Nutzfahrzeugbau	Schiene-fahrzeugbau
allgemeine Baustähle	ja	ja	ja	ja	ja
Höherfeste Feinkornbaustähle	ja	ja	ja	ja	ja
hochlegierte Stähle	ja	ja	ja	ja	ja
Aluminiumlegierungen	ja	ja	ja	ja	ja
Magnesiumlegierungen	ja	nein	ja	nein	nein
Kupferlegierungen	ja	ja	ja	nein	nein
andere	-	-	Kunststoffe, Elastomere, Keramik	-	-
ausreichende Festigkeitskennwerte für diese Werkstoffe	nein	nein	nein	ja	nein
ausstehende Festigkeitskennwerte	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3
Einsatz von Nachbehandlungsverfahren	ja	ja	ja	ja	ja
welche	Wärmebehandlung, Kugelstrahlen, WIG-Aufschmelzen	Spannungsarmglühen, Kugelstrahlen, mechanische Bearbeitung	Wärmebehandlung, Kaltverfestigung	Kugelstrahlen	Kugelstrahlen
Problematik der Nachbehandlungsverfahren ist geklärt	nein	ja	ja	ja	ja
offene Probleme	siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 8: Aussagen zu den eingesetzten Werkstoffen (1)

	Leichtbau	Stahlbau	Rohrleitungs- und Behälterbau	Kraftwerks- anlagenbau	Schiffbau	Klebstoff- entwicklung
allgemeine Baustähle	nein	ja	ja	keine Aussage	ja	nein
höherfeste Feinkorn- baustähle	nein	ja	nein	keine Aussage	ja	ja
hochlegierte Stähle	nein	nein	ja	keine Aussage	ja	ja
Aluminiumlegierungen	ja	nein	ja	keine Aussage	ja	ja
Magnesiumlegierungen	ja	nein	nein	keine Aussage	nein	ja
Kupferlegierungen	ja	nein	nein	keine Aussage	ja	ja
andere	-	-	Titan	-	-	Faserverbund- werkstoffe
ausreichende Festig- keitskennwerte für diese Werkstoffe	ja	ja		keine Aussage	ja	nein
ausstehende Festig- keitskennwerte	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3
Einsatz von Nachbe- handlungs-verfahren welche	Nein	Nein	nein	keine Aussage	ja	nein
Problematik der Nach- behandlungs-verfahren ist geklärt	ja	ja	ja	keine Aussage	nein	Keine Aussage
offene Probleme	Siehe Abschnitt 2.3	Siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3	siehe Abschnitt 2.3

Tabelle 9: Aussagen zu den eingesetzten Werkstoffen (2)

2.3 Aus den Umfrageergebnissen folgender Forschungsbedarf

2.3.1 Forschungseinrichtungen

An der Umfrage haben sich vorrangig Forschungseinrichtungen beteiligt, die gemeinsam mit Industriepartnern auf dem Gebiet der Berechnung und Konstruktion von gefügten Bauteilen tätig sind. Laufende Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit folgenden Problemstellungen:

- ◆ Experimentelle und rechnerische Ermittlung von Eigenspannungen und des Verzuges,
- ◆ Untersuchungen zu Unterschieden von Probekörpern und Bauteilen hinsichtlich ihres statischen und dynamischen Festigkeitsverhaltens,
- ◆ Erfassung des Steifigkeitsverhaltens von Bauteilen und dessen Einfluss beim Übergang von Kleinprobenkennwerten zu realen Bauteilen,
- ◆ Schaffen von Grundlagen für die Anwendung örtlicher Konzepte bei geschweißten Al-Bauteilen,
- ◆ Untersuchungen zum Mittelspannungseinfluss auf das Schwingfestigkeitsverhalten von geschweißten Al-Bauteilen,
- ◆ Ermittlung von Schwingfestigkeitskennwerten für geschweißte Bauteile aus Aluminiumlegierungen,
- ◆ Erweiterung der Anwendbarkeit des Strukturspannungskonzeptes,
- ◆ Untersuchung der Schwingfestigkeit von Mischschweißverbindungen aus austenitischen und ferritischen Stählen, Nickelbasislegierungen und warmfesten Stählen,
- ◆ Einfluß von Imperfektionen in Schweißkonstruktionen auf die Lebensdauer.

Die Vielschichtigkeit der Problematik bedingt, dass die Forschungseinrichtungen auch nach wie vor den Forschungsbedarf bei o.g. Punkten sehen. Weitere Vorschläge zum Forschungsbedarf beinhalten die folgenden Schwerpunkte:

- ◆ Abminderung der Tragfähigkeit von Schweißverbindungen in Abhängigkeit von Vorgaben der ZfP,
- ◆ Vereinheitlichung des Kerbfallspektrums in den verschiedenen Regelwerken,
- ◆ Ermittlung der für die Auslegung von gefügten Bauteilen maßgebenden Lastverteilungen,
- ◆ Verfügbarkeit von temperaturabhängigen Festigkeitswerten,
- ◆ Berechnungsvorgaben für Verbundwerkstoffe und -verbindungen.

Des Weiteren bestehen Schwierigkeiten in der Umsetzung neuerer Erkenntnisse bzw. bei deren praktischer Anwendung. Hierbei wird vorrangig auf den Einsatz der örtlichen Nachweiskonzepte verwiesen. Obwohl bestehende Regelwerke bereits entsprechende Vorgaben für deren Anwendung enthalten, sind diese offensichtlich nicht ausreichend.

Hinsichtlich der Berücksichtigung des Verfahrenseinflusses bei der Auslegung von geschweißten Konstruktionen werden folgende offene Punkte genannt:

- ◆ Ausreichende Erfassung der Kerbgeometrie bei der Anwendung örtlicher Konzepte,
- ◆ Berücksichtigung des Schweißprozesses bei der Zuordnung zu Kerbfällen und
- ◆ Einfluss des Energieeintrags, der Abkühlgeschwindigkeit und des Zusatzwerkstoffes auf die Beanspruchbarkeit von geschweißten Verbindungen.

Laut Aussagen der Forschungseinrichtungen liegen im Allgemeinen bei neuen Werkstoffentwicklungen keine ausreichenden Festigkeitskennwerte (z. B. Fließspannung) vor. Insbesondere sollte die Erstellung einer Datenbank für Festigkeitskennwerte von Aluminiumlegierungen vorangetrieben werden. Des Weiteren werden Schwingfestigkeitswerte für die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes vor allem für Bauteilverbindungen aus Al- und Mg-Legierungen benötigt.

Weitere offene Probleme hinsichtlich des Werkstoffeinflusses sind:

- ◆ Erfassung des Umwandlungsverhaltens von Werkstoffen beim Schweißen,
- ◆ Aufnahme von festigkeitssteigernden Nachbehandlungsverfahren in Regelwerke,
- ◆ Klärung der Abhängigkeit des Kerb-, Mittel- und Eigenspannungseinflusses von der Festigkeit des Grundwerkstoffes bzw. von der Härte in schwingbruchkritischen Zonen.

Darüber hinaus sollten der Einfluss von Reparaturschweißungen auf die Ermüdungsfestigkeit und die Auswirkungen von örtlichen plastischen Verformungen infolge von Imperfektionen geklärt werden. Zu den IIW-Empfehlungen [4], die für die Schwingfestigkeitsauslegung künftig von besonderer Bedeutung sind (u. a. Bestandteil der europäischen Normung im Stahlbau), sollte ein Anwenderdokument für Praktiker mit entsprechender Beispielsammlung erarbeitet werden.

Hinsichtlich der Berücksichtigung anderer Fügeverfahren bei der Festigkeitsauslegung wurden folgende offene Probleme genannt:

- ◆ fehlende Kennwerte zum Zeitstandsverhalten beim Kleben,
- ◆ Erarbeitung von Regelwerken für die Auslegung mechanisch gefügter Bauteile, Kombination von Verfahren sowie eine Vereinheitlichung der Anwendung von Prüfverfahren,

- ◆ ausreichende Erfassung dominierender Kerbeeinflüsse und
- ◆ Einführung von Verformungsnachweisen.

2.3.2 Automobilbau

Der Automobilbau setzt verstärkt eigene Bemessungskonzepte und Werkstandards im Bereich der Bemessung und Konstruktion ein. Er ist ein sehr innovativer Industriezweig, der eigene, umfangreiche Forschung betreibt und sehr enge Kontakte zu Forschungseinrichtungen pflegt.

Viele der unter 2.3.1 aufgeführten Probleme können für den Automobilbau übernommen werden. Hauptprobleme sind die richtige FE-Modellierung, die Berücksichtigung von Eigenspannungen und die Festigkeitsbewertung von Überlappverbindungen, die mit dem Laserstrahlschweißverfahren hergestellt werden. Bei anderen Fügeverfahren stützt man sich auf eigene Versuche. Externe Daten liegen nur in ungenügender Anzahl vor. Bedarf wird ebenfalls in der Ermittlung von Festigkeitskennwerten für neue Werkstoffe wie z. B. Magnesiumlegierungen gesehen.

2.3.3 Maschinenbau

Im Maschinenbau liegt die vom Forschungskuratorium Maschinenbau erarbeitete FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ [5] vor, wonach sowohl der statische als auch Ermüdungsfestigkeitsnachweis geführt werden kann. Für den Schwingfestigkeitsnachweis sind darin weitgehend die in den IIW-Empfehlungen [4] enthaltenen Vorgehensweisen übernommen worden. Die einzelnen Nachweise basieren auf Nennspannungen und auch auf örtlichen Spannungen. Angaben über die Ermittlung örtlicher Spannungen, erforderliche Vernetzungsdichten für FE-Berechnungen von Schweißverbindungen bzw. über die Lage von Dehnmessstreifen zur messtechnischen Erfassung lokaler Beanspruchungen bei Versuchen sind nicht oder nur unzureichend enthalten. Der Anwendungsbereich der FKM-Richtlinie beschränkt sich auf Stahl und Eisengusswerkstoffe.

Aus der Sicht des Maschinenbaus sollte künftig die Schwingfestigkeit von Schweißnähten in Abhängigkeit von der Nahtausführung und von mehrachsigen Spannungszuständen näher untersucht werden.

2.3.4 Nutzfahrzeugbau

Der Nutzfahrzeugbau bedient sich einer Reihe von Normen und Richtlinien wie z. B. [4, 5, 6, 7]. Bei der Bewertung der Lebensdauer werden verstärkt Lastkollektive aus eigenen Betriebsmessungen und dynamischen Simulationen verwendet. Deshalb wird auch als vorrangiges Problem die realitätsnahe Erfassung von Beanspruchungen genannt. Des Weiteren sollten die Anforderungen an die Qualität einer FE-Analyse näher untersucht werden. Bei dem Einfluss der Fügeverfahren bestehen weiterhin Probleme hinsichtlich der Berücksichtigung von Eigenspannungen und des Verzuges. Des Weiteren werden Schwingfestigkeitswerte für höherfeste Feinkornbaustähle benötigt.

2.3.5 Schienenfahrzeugbau

Im Schienenfahrzeugbau werden Schweißverbindungen nach Regelwerken bemessen, die in Abhängigkeit vom Kunden und von der Zulassungsbehörde festzulegen sind. Vorrangig kann hier die DS 952 [8] genannt werden, die jedoch dringend überarbeitungsbedürftig ist, da sie nicht mehr dem aktuellen Kenntnisstand entspricht.

Weitere offene Probleme im Schienenfahrzeugbau sind die Berücksichtigung der Schweißnahtgüte (u. a. nach DIN EN 25817 [9] und DIN EN 30042 [10]), die Bewertung neuer Fügetechnologien (z. B. laserstrahlgeschweißte Punktverbindungen oder Reibrührschweißungen) und die Zuordnung von an Kleinproben ermittelten Schwingfestigkeitswerten zu Festigkeitswerten, die für reale Konstruktionen bzw. Bauteilverbindungen gelten (u. a., Anwendung der IIW-Empfehlungen, Berücksichtigung von Eigenspannungszuständen).

2.3.6 Schiffbau

Im Schiffbau wird nach Regelwerken der Klassifikationsgesellschaften (Germanischer Lloyd [11]) bemessen. Der Nachweis der Schwingfestigkeit erfolgt für den Bereich der Dauer- und Betriebsfestigkeit. Sowohl das Nennspannungskonzept als auch örtliche Nachweiskonzepte kommen zum Einsatz. Auch hier sind die IIW-Empfehlungen [4] in die Regelwerke eingeflossen.

Der Schiffbau sieht den Bedarf an Weiterentwicklungen in der praktikableren Anwendung örtlicher Nachweiskonzepte sowie in der Ermittlung von Festigkeitsparametern für mit neuen Schweißprozessen gefertigten Verbindungen.

2.3.7 Leichtmetallbau

Hierbei handelt es sich ausschließlich um Schweißkonstruktionen aus Al-Legierungen. Die Bemessung erfolgt nach DIN 4113 [12] und BS 8118 [13] sowie nach Eurocode 9 [14, 15, 16]. Die Bewertung von Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht erfolgt nach DIN EN 30042 [10].

Offene Probleme bestehen in der Bewertung von Fügeverbindungen unterschiedlicher Werkstoffkombinationen sowie von Verbindungen, die mit neueren Verfahren hergestellt wurden (z. B. Reibrührschweißen).

2.3.8 Stahlbau

Im deutschen Stahlbau ist für vorwiegend ruhend beanspruchte Schweißkonstruktionen mit der Einführung der DIN 18800 Teil 1 [17] der Festigkeitsnachweis mit Teilsicherheitsbeiwerten und nach Grenzzuständen zu führen. Dies entspricht der Vorgehensweise des Eurocodes 3 [6], der die künftige europäische Norm für den Stahlbau darstellt. Im Gegensatz zur DIN 18800 T1 enthält der Eurocode 3 auch den Ermüdungsfestigkeitsnachweis, der im wesentlichen auf den Inhalten der IIW-Empfehlungen basiert. So kann danach der Schwingfestigkeitsnachweis auf der Grundlage von Nenn- und Strukturspannungen erfolgen.

Darüber hinaus ist der Betriebsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen nach DIN 15018 [7] im Kranbau und nach DIN 4132 [18] von Kranbahnen möglich. Die darin enthaltenen Kerbfälle sind jedoch offensichtlich für die Belange des Stahlbaus nicht umfassend genug. Der Betriebsfestigkeitsnachweis in der „Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke“ - DS

804 [19] basiert ebenfalls auf Nennspannungen. Da alle diese Normen zulässige Spannungswerte enthalten, sind sie nicht kompatibel mit der Vorgehensweise der neuen Stahlbaunorm DIN 18800 und dem Eurocode 3, die von Grenzzuständen und Teilsicherheitsfaktoren ausgehen. Da in einigen Jahren die endgültige Fassung der europäischen Stahlbaunorm vorliegen soll, ist hier baldige Abhilfe zu erwarten.

Weitere offene Probleme bestehen in der Festigkeitsbewertung neuer Werkstoffentwicklungen (z. B. hochfeste Feinkornstähle), die in den bisherigen Normen noch nicht berücksichtigt sind.

2.3.9 Rohrleitungsbau/Druckbehälter

Rohrleitungen und Druckbehälter werden nach den AD Merkblättern berechnet. In den Merkblättern S1 und S2 [20] ist der Festigkeitsnachweis bei wechselnden Beanspruchungen enthalten. Der Nachweis bei geschweißten Bauteilen kann auf der Basis von Nennspannungen (AD Merkblatt S1) und von Strukturspannungen (AD Merkblatt S2) erfolgen. Strukturspannungen sind mittels FEM oder experimentell zu ermitteln. Angaben über erforderliche FE-Vernetzungsdichten im Schweißnahtbereich bzw. über die Lage von Dehnmessstreifen sind im Merkblatt S2 nicht aufgeführt. Es existieren aber bereits Berechnungsprogramme, mit denen auf der Basis örtlicher Spannungskonzepte die Ermüdungsfestigkeit nachgewiesen werden kann [21]. Das AD Regelwerk bezieht sich auf die Werkstoffe Stahl, Eisengusslegierungen, Aluminium- und Kupferlegierungen. Im Zuge der europäischen Normung ist die DIN EN 13445-3 [22] in Vorbereitung, d.h., hierzu liegt bereits ein Normentwurf vor.

Offene Probleme bestehen vor allem hinsichtlich der Auswirkung von Schweißnahtfehlern auf das Festigkeitsverhalten der Verbindungen sowie des Einflusses von Eigenspannungen und Verzug auf die Beanspruchbarkeit geschweißter Bauteile.

2.3.10 Klebetechnik

Auf dem Gebiet der Klebetechnik vollzog sich in den letzten Jahren eine rasche Entwicklung, da der Bedarf insbesondere im Leichtbau stark angestiegen ist. Trotz intensiver Forschung auf diesem Gebiet, ist aufgrund dessen, dass es sich um einen relativ jungen Zweig der Fügetechnik handelt, noch ein Nachholbedarf an neuen Entwicklungen und Erkenntnissen zu verzeichnen.

Der Bedarf an zukünftiger Forschung wird in der Untersuchung des Schädigungsmechanismus, in der Entwicklung neuer Berechnungs- und Bewertungsmethoden (geeignete Vergleichsspannungshypothesen) und in der Entwicklung neuer, nichtlinearer Werkstoffgesetze sowie deren Implementierung in FE-Programmen durch neuartige Klebelemente gesehen. Somit könnte es gelingen, Aussagen über die Auswirkung von Klebverbindungen auf die Steifigkeit des Gesamtbauteils treffen zu können, sowie den rechnerischen Nachweis der statischen Festigkeit, der Schwingfestigkeit und des Crashverhaltens zu verbessern. Das Langzeitverhalten von Klebverbindungen lässt ebenfalls Fragen offen. Hierbei ist zu klären, welche Auswirkungen die Fertigung und Montage auf die Festigkeit hat und welche Oberflächenbehandlungen die Festigkeit unterstützt.

3 Ergebnisse des DVS-Forschungsseminars

Auf dem Forschungsseminar am 24.1.02 in der MPA Stuttgart haben zunächst in einem ersten Teil Vertreter aus verschiedenen Forschungseinrichtungen über den Entwicklungsstand und über neuere Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Festigkeit und Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen berichtet, wobei geschweißte Verbindungen im Vordergrund standen. Dabei wurde auch auf bisher nicht ausreichend geklärte Problemfelder eingegangen, die aus Sicht der Forschung weiteren Handlungsbedarf erfordern.

Anschließend haben Industrievertreter in einem zweiten Teil den gegenwärtigen Stand in der industriellen Praxis und offene Fragestellungen zu dieser Thematik aufgezeigt. Das Programm dieses Seminars sowie Kopien der Folien aller auf diesem Seminar vorgestellten Vorträge sind in den Anlagen B und C aufgeführt. Im Folgenden wird ein zusammenfassender Überblick über die Inhalte der einzelnen Vorträge gegeben.

Zu Beginn der Veranstaltung wurde in einführenden Worten durch D. von Hofe auf die Bedeutung und Zielsetzung der durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS durchgeführten Seminare zu unterschiedlichen Themenstellungen der Schweißtechnik hingewiesen und dabei die Wichtigkeit der Konstruktion als einen der drei Hauptaspekte der Schweißtechnik hervorgehoben. Danach sind von S. Keitel erste Ergebnisse der Umfrage zur Thematik dieses Forschungsseminar vorgestellt worden.

In einem grundlegenden Beitrag hat A. Hobbacher alle zu berücksichtigenden Aspekte bei der Festigkeitsauslegung von Schweißkonstruktionen beleuchtet. Dabei wurde deutlich, dass vor allem auf dem Gebiet der schwingfesten Auslegung geschweißter Bauteile noch viele offene Probleme zu lösen sind. Von besonderer Bedeutung erscheint hierbei das systematische Erfassen aller verfügbaren Kennwerte zur Schwingfestigkeit in einer Referenz-Datenbank zu sein.

In dem Beitrag von H. Zenner und F. Yousefi wurden Bewertungsmöglichkeiten zur Schwingfestigkeit von mehrachsigen beanspruchten Schweißverbindungen vorgestellt. Hierbei handelte es sich um Forschungsergebnisse, mit denen eine Verbesserung der Lebensdauerberechnung von derart beanspruchten Verbindungen erreicht werden soll. Die gezeigten Ergebnisse lassen deutliche Fortschritte erkennen, jedoch ist die Berechnung allgemeiner mehrachsiger Betriebsbeanspruchungen wegen der komplexen Abläufe im Bauteil immer noch mit Unsicherheiten verbunden. Hierzu sind weitere experimentelle und theoretische Untersuchungen notwendig.

H. Wohlfahrt und C. M. Sonsino haben über den Einfluss von schweißtechnischen Fertigungsbedingungen auf die Schwingfestigkeit von Aluminiumschweißverbindungen berichtet. Im Rahmen von Forschungsarbeiten wurden Möglichkeiten zur Schwingfestigkeitsverbesserung durch optimierte Fertigungsverfahren aufgezeigt, wobei neben dem Einsatz verschiedener Schweißverfahren auch Nachbehandlungsmethoden zur Nahtprofilverbesserung und Randschichtverfestigung untersucht worden sind. Forschungsbedarf besteht in der weiteren Absicherung der erzielten Ergebnisse, um diese in Regelwerke aufzunehmen (z. B. in DIN EN 30042 [10]) und bei der Auslegung derartiger Verbindungen nutzen zu können.

In einem weiteren Beitrag über Aluminiumschweißverbindungen haben J. G. Blauel und C. M. Sonsino Forschungsergebnisse zum Festigkeitsverhalten bei statischer, bei Schwing- und Crashbelastung vorgestellt. Dabei wurde das unterschiedliche Verhalten von Grundwerkstoff, Wärmeeinflusszone und Schweißgut berücksichtigt, welches u. a. aus Härtemessungen und aus der Prüfung von Mini-Rundzugproben ermittelbar ist. Aus den dargestellten Ergebnissen geht hervor, dass bei statischer Belastung größere Festigkeitsunterschiede in den untersuchten

Werkstoffbereichen (Mismatch) ungünstig für die Fehlertoleranz von Al-Schweißverbindungen sind. Dagegen hängt die Schwingfestigkeit vorrangig von der Nahtgeometrie und der dadurch bedingten Kerbwirkung sowie von der Mittelspannungsempfindlichkeit ab. Durch die Minimierung von Zugmittel- und Zugeigenstressungen wird die Lebensdauer verlängert.

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis im Druckbehälterbau und Empfehlungen für seine weitere Qualifizierung war Gegenstand des Beitrages von E. Weiß und J. Rudolph. Der aktuelle Stand der Nachweisführung mit Bezug auf das hierfür maßgebende Regelwerk wurde kritisch analysiert, und für die daraus folgenden Kritikpunkte sind Ansätze zur verbesserten Nachweisführung aufgezeigt worden. Dies bezog sich vor allem auf die Anwendung lokaler Nachweiskonzepte, wie z. B. das Struktur- und Kerbspannungskonzept sowie das Kerbdehnungskonzept. Dazu wurden konkrete Vorschläge zum Einsatz der FEM für die Ermittlung der benötigten örtlichen Beanspruchungswerte gemacht und darüber hinaus spezielle Softwarelösungen vorgestellt, die ergänzend zu CAD- und FE-Programmen den Nachweisvorgang unterstützen. Offene Probleme bestehen vor allem beim Nachweis im Kurzzeitfestigkeitsbereich (Lastwechsel $< 10^4$).

Der Beitrag von B. Hänel enthielt praktische Probleme bei der ermüdungsfesten Auslegung von geschweißten Bauteilen. An konkreten Beispielen wurden Schwierigkeiten in der Anwendung von Nenn-, Struktur- und Kerbspannungskonzept aufgezeigt. Ein weiteres unzureichend gelöstes Problem ist die Zuordnung von Schweißnahtqualität und Festigkeit. Um die genannten Probleme zu lösen, wird die Formulierung von Forschungsvorhaben zur Zusammenstellung und systematischen Aufbereitung von vorhandenem Wissen über die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen vorgeschlagen.

Über die Bewertung der Lebensdauer geschweißter Stahlbauteile in Raupenbaggern hat W. Burget berichtet. Im Einzelnen wurde auf die Lastkollektivermittlung, die Spannungs- und Schädigungsrechnung, auf die Bewertung nach Regelwerken sowie auf die Verifizierung der rechnerischen Auslegung von Schweißverbindungen eingegangen. Für künftige Forschungsarbeiten zur Konstruktion und Berechnung von Schweißbauteilen wurden folgende Schwerpunkte genannt:

- ◆ Zusammenhang von Fertigungsqualität und Lebensdauerqualität,
- ◆ Konzeptbezogene Anforderungen an die Qualität der FE-Analysen und
- ◆ Übertragbarkeit von Lastkollektiven auf der Basis dynamischer Simulation.

Der Beitrag von M. Kaßner bezog sich auf die Auslegungspraxis von geschweißten Bauteilen im Schienenfahrzeugbau. Insbesondere wurde die Beanspruchungsbewertung mittels Strukturspannungen erläutert. Obwohl das Strukturspannungskonzept schon weit entwickelt ist und in verschiedene Berechnungsrichtlinien aufgenommen wurde, besteht für bestimmte praktische Anwendungsfälle noch Klärungsbedarf, wie z. B. für Schweißverbindungen mit unterschiedlicher Lage von Strukturspannungsberechnung und kritischem Anrissort. Neben der Überarbeitung des Regelwerkes bzw. der Anpassung an den aktuellen Kenntnisstand sollten folgende weitere Schwerpunkte forschungsseitig bearbeitet werden:

- ◆ Zuordnung von Beanspruchbarkeit zu Schweißnahtgütegruppen der Fertigung,
- ◆ Festigkeitsbewertung von Verbindungsformen infolge neuer Schweißtechnologien und
- ◆ Entwicklung von FE-Vernetzungstechniken zur Reduzierung des Berechnungsaufwandes für die lokale Spannungsermittlung.

Mit dem Beitrag von E. Dutzler über die Lebensdaueranalyse von längsgeschweißten Bauteilen bei dynamischer Belastung wurden die Möglichkeiten des Programms FEMFAT WELD vorge-

stellt, mit dem ausgehend von der FE-Berechnung der Gesamtkonstruktion eine lokale Spannungsbewertung von Schweißnähten auf der Basis von Kerbfaktoren vorgenommen werden kann. Die Anwendbarkeit dieses Programms für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis auf der Grundlage von Kerbspannungen ist am Beispiel des Fahrwerkrahmens eines Schienenfahrzeugs aufgezeigt worden. In der weiteren Programmentwicklung soll die Datenbasis (Kerbfaktoren, Stoßarten) erweitert, neue Fügetechnologien (Laserstrahlschweißen, Stanznieten) berücksichtigt und die Eingangsdaten (Lastannahmen, Materialkennwerte) verbessert werden.

Auf die Bewertung von laserstrahlgeschweißten Verbindungen im Schienenfahrzeugbau mit dem Schwerpunkt Überlappverbindungen ist S. Keitel eingegangen (weitere Autoren: Rümpel, Wendler, Langner u. Schuster). Im Einzelnen wurden verschiedene Verbindungsarten (Laserrund- u. Laserpendelnaht sowie Widerstandspunktschweißungen) und Stoßformen (Stumpfstoß u. Überlappstoß mit unterschiedlicher Nahtgestaltung) hinsichtlich der dynamischen Belastbarkeit vergleichend betrachtet. Forschungserfordernisse ergeben sich vor allem aus fehlenden Angaben zur konstruktiven Ausbildung schwingfester Laserstrahlverbindungen, zur Berücksichtigung der Nahtgüte bei der Festigkeitsbewertung sowie zur optimalen Prozessführung bei der Herstellung solcher Verbindungen.

Die Bewertung der Schwingfestigkeit von Laserstrahlschweißverbindungen war ebenfalls Gegenstand des folgenden Beitrages, in welchem M. Eibl und C. M. Sonsino auf die Einsetzbarkeit örtlicher Konzepte für die Auslegung von Aluminium- und Stahldünnblechverbindungen im Automobilbau eingegangen sind. Dies betraf vor allem das Struktur- und Kerbspannungskonzept, wobei insbesondere neuere Forschungsergebnisse vorgestellt wurden. Um die bisher erzielten Ergebnisse auf praktische Anwendungen übertragen bzw. in ein Softwareprogramm implementieren zu können, sind jedoch noch weitere Untersuchungen notwendig.

Abschließend wurde in dem Beitrag von M. Brede der Entwicklungsstand und der Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Klebtechnik dargestellt. Geklebte metallische Konstruktionen sind zunehmend in allen technischen Bereichen zu finden, wie verschiedene Beispiele u. a. aus dem Flugzeugbau, Automobilbau, Schiffbau und dem Schienenfahrzeugbau gezeigt haben. Der Einsatz des Klebens führt zur Kostensenkung und fördert den Leichtbau. In der weiteren Forschung auf diesem Gebiet sollten vor allem folgende Probleme gelöst werden:

- ◆ Entwicklung von Methoden zur Kennwertermittlung für die Festigkeitsauslegung,
- ◆ Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten unter Betriebsbedingungen bzw. zur Berücksichtigung von Langzeitwirkungen,
- ◆ Erfassen des Steifigkeitseinflusses großer Bauteilstrukturen,
- ◆ Berücksichtigung der Fertigung und Montage in ihrer Auswirkung auf die Beanspruchbarkeit,
- ◆ Entwicklung von übergreifenden Methoden für die Erfassung von ganzen Fahrzeugen sowie von Konzepten für die Bewertung der Kombination von Fügetechniken.

4 Schlussfolgerungen für Forschungsbedarf

4.1 Vorbetrachtungen

Sowohl die in Forschungseinrichtungen und in Unternehmen verschiedener Industriebranchen vorgenommene Umfrage als auch das am 24.1.2002 durchgeführte DVS-Forschungsseminar haben eine Reihe ungelöster Problemfelder zur Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen aufgezeigt. Diese Problemfelder sind vor allem eine Folge

- ◆ der sich ständig weiterentwickelnden Fügetechnologien und der daraus folgenden neuen Verbindungsgeometrien (z. B. neue Anwendungsgebiete des Laserstrahlschweißens, Entwicklung des Reibrührschweißens),
- ◆ des Einsatzes neuer Werkstoffe mit geringerem spezifischem Gewicht bzw. höherer Festigkeit (z. B. Mg-Legierungen, höherfeste Feinkornbaustähle),
- ◆ der steten, aus Leichtbaugründen zu optimierenden Verbindungsfestigkeit (z. B. flache Nahtübergänge, Einsatz von Nachbehandlungsverfahren) und
- ◆ des zunehmenden Einsatzes der Rechentechnik und der damit verbundenen Möglichkeit, den Festigkeitsnachweis auf der Basis lokaler Beanspruchungen zu führen.

Darüber hinaus ergeben sich bei der Überarbeitung bzw. Neufassung von Regelwerken inhaltliche Probleme, die nur durch Forschungsarbeiten zu klären sind. Diese verschiedenen Gründe lassen gleichzeitig erkennen, welche wirtschaftliche Bedeutung die Lösung der nachfolgend im Einzelnen dargestellten Problemschwerpunkte hat und welche Vorteile für Industrieunternehmen daraus entstehen.

Wie bereits eingangs dieser Studie erläutert, wurde ausgehend von dem in der Fachliteratur vorliegenden Kenntnisstand und den aktuellen Forschungsprojekten der Forschungsvereinigung des DVS vorrangig die schwing- bzw. ermüdungsfeste Auslegung gefügter metallischer Bauteile betrachtet. Dass vor allem zu dieser Thematik gegenwärtig noch ein erhöhter Forschungsbedarf besteht, haben insbesondere die Beiträge des Forschungsseminars bestätigt. Andere Aspekte der Auslegung gefügter bzw. geschweißter Bauteile sind dagegen von untergeordneter Bedeutung, wie z. B. der Nachweis der statischen Festigkeit oder der Stabilität.

Im Folgenden werden wesentliche offene Problemstellungen der ermüdungsfesten Auslegung zunächst von geschweißten Bauteilen näher erläutert. Anschließend wird als ein Beispiel alternativ gefügter Verbindungen auf die Auslegung geklebter Bauteile eingegangen. Dabei wird deutlich, dass in diesem Fall noch ein erheblich breiteres Spektrum offener Fragen in der Festigkeitsauslegung vorliegt.

4.2 Erfassen von Fertigungseinflüssen

4.2.1 Auswirkungen neuerer Schweißtechnologien

Mit der Neu- und Weiterentwicklung von Schweißverfahren entstehen Fügegeometrien, deren Schwingfestigkeitsbewertung mit den in Regelwerken und in der Fachliteratur vorliegenden Angaben häufig nicht möglich ist. Besondere, in den Vorträgen des Forschungsseminars genannte Beispiele sind hierfür das Laserstrahlschweißen zum punktförmigen Verbinden von dünnwandigen Blechen an Aussteifungsprofilen und das Reibrührschweißen, das als neues Fügeverfahren zunehmend in der Al-Legierungen verarbeitenden Industrie als Ersatz für das MIG-Schweißen eingesetzt wird. In beiden Fällen liegen bisher keine ausreichenden Ermüdungsfestigkeitskennwerte vor. Dies betrifft zunächst den Nachweis mittels Nennspannungen, gilt aber auch für

die Anwendung lokaler Nachweiskonzepte. Um diese Lücke zu schließen, sind vor allem experimentelle Untersuchungen erforderlich. Da die Verfahrensentwicklung ein steter Prozess ist, muss von sich immer wieder neu ergebenden Verbindungsformen ausgegangen werden, für die u. a. Kennwerte zur Ermüdungsfestigkeit zu ermitteln sind.

4.2.2 Erfassen der Nahtqualität

Ein besonders großes Problem stellt die Berücksichtigung der Verbindungsqualität bei der schwingfesten Auslegung von geschweißten Bauteilen dar. Einerseits sind die in den verschiedenen Regelwerken enthaltenen Festigkeitskennwerte im Allgemeinen in Abhängigkeit von der Nahtqualität angegeben. Andererseits liegen in den Normen für die Bewertung der schweißtechnischen Fertigungsqualität Merkmale bzw. Unregelmäßigkeiten (mit quantitativen Angaben) zur Einstufung in Bewertungsgruppen der Schweißnahtgüte vor, die nicht deckungsgleich mit den in den Festigkeitsnormen enthaltenen Kriterien sind. Eine eindeutige und abgesicherte Zuordnung der in Regelwerken zur Festigkeit enthaltenen Qualitätskriterien zu den in den Normen der Fertigung aufgeführten Bewertungsgruppen (z. B. DIN EN 25817 [9]) ist bisher nicht erfolgt. Es liegen hierzu lediglich Empfehlungen in der Fachliteratur und in Merkblättern vor (z. B. DVS-Merkblatt 0705 [23, 24]), die aber nicht ausreichend belegt sind.

Bei einer gründlicheren Analyse der Fertigungsnormen für die Beurteilung der Schweißnahtqualität sowie der darin enthaltenen Bewertungskriterien wird deutlich, dass diese vor allem für eine zweckmäßige und mit möglichst geringem Aufwand durchzuführende Herstellungskontrolle von Schweißverbindungen entstanden sind. Das Betriebsverhalten bzw. die Beanspruchbarkeit der Bauteilverbindungen war somit kein unmittelbares Kriterium der Einstufung. Die sachgerechte Erfassung von Auswirkungen der Nahtqualität auf die Schwingfestigkeit erfordert jedoch ein anderes Herangehen, wie dieses aus den verschiedenen Festigkeitsnormen erkennbar ist. So müssen beispielsweise Unregelmäßigkeiten mit überlagernder bzw. additiver Wirkung von konkurrierenden Merkmalen unterschieden werden. Insofern besteht hier ein erheblicher Handlungsbedarf, der deutlich über eine Überarbeitung vorliegender Empfehlungen oder Merkblätter hinausgeht.

Wenn man davon ausgeht, dass sich die für die Qualitätskontrolle vorliegenden Fertigungsnormen bewährt haben und daher auch weiterhin dafür genutzt werden, so wird eine Zuordnung zu den in Festigkeitsnormen enthaltenen Angaben benötigt. Um dieses zu erreichen, ist die Bearbeitung von folgenden Teilkomplexen erforderlich:

- ◆ Zusammenstellung aller vorliegenden Kenntnisse und Daten zum Zusammenhang zwischen Festigkeit und Schweißnahtgüte, Auswertung und Aufbereitung dieser Angaben, Ermitteln von offenen, nicht ausreichend belegten Datenbereichen,
- ◆ Experimentelle Untersuchungen des Festigkeitseinflusses derjenigen Schweißnahtgütekriterien, für die bisher keine ausreichende Klärung vorliegt und
- ◆ Entwicklung eines Softwareprogramms, mit der nach Eingabe der Nahtgeometrie und der Beanspruchung die maximal tolerierbaren Imperfektionen in Bezug auf das Betriebsverhalten ermittelt werden können und umgekehrt.

Eine gute Basis für solche Forschungsarbeiten bilden z. B. die in [25] enthaltenen Informationen.

4.2.3 Einsatz von Nachbehandlungsverfahren

Nachbehandlungsverfahren führen entweder durch eine Verringerung der Kerbwirkung aufgrund einer Verbesserung des Nahtprofils oder durch das Einbringen günstiger Druckeigenstressungen und Verfestigungen in die Bauteilrandschichten zu Schwingfestigkeitsverbesserungen. Die erzielbaren Steigerungsbeträge sind insbesondere bei hochfesten Werkstoffen beträchtlich, hängen aber in starkem Maße auch von der zyklischen Beanspruchungsart und von der Verbindungs- oder Bauteilgeometrie ab. Die Ausnutzung dieses verfügbaren Potentials zur Schwingfestigkeitssteigerung gewinnt unter dem Gesichtspunkt verstärkter Leichtbuanstrengungen zunehmend Bedeutung, wird in Richtlinien zur Bauteilbemessung aber erst Eingang finden können, wenn die Wirksamkeit der Verfahren für unterschiedlichste Beanspruchungsfälle und Bauteilgeometrien durch weitere gezielte Untersuchungen klargestellt ist.

Für Verfahren wie Abschleifen, Wiederaufschmelzen der Nahränder, Hämmern und Nadelstrahlen liegen mit dem IIW-Dokument XIII-1815-00 zwar Arbeitsanweisungen und Hinweise zur Wirksamkeit vor. Die Wirkung von Randschichtverfestigungen und Druckeigenstressungen bei Werkstoffen unterschiedlicher Festigkeit ist aber noch nicht hinreichend erfasst. Es gibt hierzu zwar zahlreiche Einzeluntersuchungen. Ein zusammenfassender Überblick mit zahlenmäßigen Angaben von Steigerungsfaktoren unter besonderer Berücksichtigung neu eingeführter Verfahren wie Ultraschallstrahlen und einschränkender Kriterien muß aber noch erarbeitet werden. Notwendig sind daher experimentelle Untersuchungen über die Wirkung von Randschichtverfestigungsverfahren bei realen Schweißbauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen und unter verschiedenartigen Schwingbeanspruchungen (unterschiedliche periodische Belastungsarten mit und ohne Mittelspannungen sowie Mehrstufen- bzw. Randombeanspruchungen). Aufbauend darauf sind Arbeitsanweisungen zur Verfahrensausführung auszuarbeiten.

4.3 Unterschiede in den Ermüdungsfestigkeitskennwerten von Kleinproben und realen Schweißkonstruktionen

4.3.1 Allgemeine Hinweise

Die neuen IIW-Empfehlungen [4] zur Schwingfestigkeit enthalten im Gegensatz zu bisher eingesetzten Regelwerken Ermüdungsfestigkeitskennwerte, die für reale Schweißkonstruktionen gelten. In der industriellen Praxis wurde und wird auch in absehbarer Zukunft die schwingfeste Auslegung noch vorrangig anhand von Nennspannungen vorgenommen, denen Festigkeitswerte gegenübergestellt werden, die sich auf die Schwingprüfung von Kleinproben beziehen (z. B. in DIN 15018 [7], DS 804 [19], DV 952 [8], AD-Merkblätter S1 und S2 [20]). Ein Vergleich dieser Werte mit denen der IIW-Empfehlungen lässt deutliche Unterschiede erkennen. So sind z. B. die Werte der Wechselfestigkeit ($R=-1$) von vergleichbaren Verbindungs- bzw. Nahtformen in den IIW-Empfehlungen deutlich niedriger. Die Unterschiede sind insbesondere auf den in den IIW-Werten erfassten Größeneinfluss und Eigenspannungszustand zurückzuführen. Vor allem Zugeigenstressungen, wie sie beim Schweißen im Nahtbereich bis zur Größe der Fließgrenze entstehen können, wirken sich deutlich reduzierend auf die Schwingfestigkeit aus.

Da die IIW-Empfehlungen im wesentlichen in die europäische Normung (Eurocode 3 und 9) übernommen werden, ist eine ausreichende Klärung dieser Unterschiede und weiterer Anwendungsprobleme, wie z. B. der darin aufgeführten Möglichkeiten zur Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes, für die industrielle Praxis von großer Bedeutung. Mit der wissenschaftlichen Bearbeitung der nachfolgend dargestellten Schwerpunkte könnte hier erhebliche Abhilfe geschaffen werden.

4.3.2 Analyse der vorhandenen Datenbasis zur Ermüdungsfestigkeit und Erstellen einer Referenz-Datenbank

Zunächst sind alle verfügbaren Angaben zur Schwingfestigkeit von Schweißverbindungen auf wissenschaftlicher Grundlage umfassend zu analysieren. Damit sind Forschungsaufgaben verbunden, mit denen vorhandenes Wissen zusammengestellt, aufbereitet und anwendungsbereit zur Verfügung gestellt wird. Hierbei ließen sich Erfahrungen und Kenntnisse aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen zusammenführen, wie z. B. aus dem Stahlbau, Fahrzeugbau, Kranbau, Schiffbau, Behälterbau, Anlagenbau, allgemeinen Maschinenbau und anderen Industriebereichen. Die wissenschaftlichen Anforderungen ergeben sich dabei vor allem durch die Vereinheitlichung von Daten für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit

Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist eine Referenz-Datenbank zu entwickeln, in die auch die Datenbasis der europäischen Normung zu dieser Thematik aufgenommen werden sollte. Diese Aufgabe ist von besonderem Nutzen und besonderer Dringlichkeit, denn die Entwicklungsarbeiten zum Eurocode 3 [6] und zum Eurocodes 9 [14, 15, 16] nähern sich dem Ende. Alle dafür verwendeten bzw. relevanten Daten zur Festigkeit von Schweißbauteilen liegen an verschiedenen Forschungsstellen in unterschiedlicher Form vor. Es ist zu befürchten, dass nach Abschluss der Arbeiten und Auflösung der Arbeitsgruppen die Daten nicht weiter gepflegt und somit für eine Überarbeitung in ca. 7 Jahren nicht mehr zur Verfügung stehen werden.

In den USA ist das „Data Mining“ ein anerkanntes Verfahren der wissenschaftlichen Arbeit. Es sollte daher auch in Deutschland möglich sein, im Rahmen von Forschungsarbeiten eine Referenz-Datenbank für die Schwingfestigkeit geschweißter Bauteile zu entwickeln.

4.3.3 Entwicklung von Vorgehensweisen zur differenzierten Erfassung der in Schweißkonstruktionen vorliegenden, für die Bewertung der Ermüdungsfestigkeit maßgebenden Eigenspannungen

Dieser Schwerpunkt erfordert grundlegendere Untersuchungen, denn der gegenwärtige Kenntnisstand erlaubt nur verhältnismäßig pauschale bzw. qualitative Aussagen zum Eigenspannungszustand, der für die Schwingbeanspruchbarkeit maßgebend und daher bei der Auslegung von geschweißten Konstruktionen zu berücksichtigen ist. Durch eine Finite-Elemente-Simulation des Schweißprozesses mit einer thermischen und strukturmechanischen Analyse können zwar schweißbedingte Eigenspannungsverteilungen rechnerisch ermittelt werden. Aber abgesehen von ungelösten Problemen in der FE-Modellbildung (z. B. fehlende Werkstoffdaten bei hohen Temperaturen) bestehen besondere Schwierigkeiten darin, dass sich die unmittelbar nach dem Schweißen vorliegenden Eigenspannungen in ihrer Größe und Verteilung durch Schwingbeanspruchungen verändern, d.h., sie werden verringert und umgelagert.

Experimentell sind diese Vorgänge unter grundsätzlichen metallkundlichen Aspekten bereits vielfach untersucht worden. Jedoch wurden daraus keine konkreten Vorgehensweisen für die ingenieurmäßige Berücksichtigung der Eigenspannungen bei der Schwingfestigkeitsauslegung abgeleitet. Insbesondere fehlen bisher Möglichkeiten zur Vorausberechnung der schwingungsbedingten Eigenspannungsverringern und damit der Eigenspannungswirksamkeit vor allem für große, reale Schweißkonstruktionen. Zur Lösung dieser Problematik sind experimentelle und rechnerische Untersuchungen erforderlich. Dabei ist der Mittelspannungseinfluss zu berücksichtigen, der im engen Zusammenhang mit der Wirkung von Eigenspannungen steht. Im Einzelnen ergeben sich folgende Forschungsaufgaben:

- ◆ Aufstellen eines Kataloges von Eigenspannungszuständen für unterschiedlich hergestellte Schweißbauteile mit verschiedenen großen Einspanngraden der Schweißverbindung. Klärung des Einflusses der Bauteilgeometrie bzw. -abmessungen.
- ◆ Experimentelle Untersuchungen zur quantitativen, ingenieurmäßigen Bewertung des Eigenspannungseinflusses auf die Schwingfestigkeit bzw. Lebensdauer typischer Schweißbauteile in Abhängigkeit
 - ◆ vom Werkstoff (Festigkeit, Gefügestand),
 - ◆ von der Kerbwirkung infolge Bauteilanordnung und Nahtgeometrie und
 - ◆ vom Belastungsablauf (ein- oder mehrstufig; Zeit-, Betriebs- oder Dauerfestigkeitsbereich; Belastungsrichtung wie z. B. längs- oder querbeanspruchte Nähte).
- ◆ Erstellen von Modellen zur Vorausberechnung von schwingungsbedingten Eigenspannungsverringern beispielsweise mit FEM.

4.4 Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen

4.4.1 Lastkollektivermittlung

Die Ermittlung von Lastkollektiven bzw. -matrizen aus gemessenen Betriebsbelastungen ist der sicherste Weg zu einer zuverlässigen Lastannahme. Angewendet wird heute vorzugsweise die Rainflowzählung, die nach dem Stand des Wissens die schädigungsrelevanten Anteile der Belastungen besser erfasst als andere Zählverfahren.

Wenn diese Vorgehensweise auch klar ist, so ist doch festzustellen, dass die meisten Schadensfälle aufgrund falscher Lastannahmen auftreten. Es sind deshalb verbesserte Methoden für die Lastannahmen zu entwickeln, die vor allem die Simulation des Schwingungsverhaltens von Systemen und Strukturen einschließen. Diese Vorgehensweise ist an Anwendungsbeispielen aufzuzeigen. Insbesondere ist dabei zu klären, inwieweit Lastkollektive, die durch dynamische Simulationen auf der Basis von Mehrkörpersystemen ermittelt werden, auf die Festigkeitsauslegung geschweißter Verbindungen übertragbar sind.

4.4.2 Schadensakkumulation

Zur Lebensdauerberechnung schwingend beanspruchter geschweißter Bauteile ist eine Schadensakkumulationshypothese notwendig. Sowohl für das Nennspannungskonzept als auch beim Örtlichen Konzept (Kerbdehnungs- und Kerbspannungskonzept) wird fast ausschließlich auf die lineare Schadensakkumulationshypothese nach Palmgren-Miner zurückgegriffen, wobei unterschiedliche Modifikationen wie Miner-Original, Miner-Elementar, Miner-Haibach und z. B. Miner-Liu-Zenner angewendet werden. Diese Modifikationen unterscheiden sich in der Bewertung, wie Amplituden unterhalb der Dauerfestigkeit zur Schadenssumme und damit zur Lebensdauer beitragen.

Die Treffsicherheit der rechnerischen Lebensdauerabschätzung ist heute noch unbefriedigend. Dies gilt für geschweißte und nicht geschweißte Bauteile und Strukturen. Wesentlicher Forschungsbedarf wird deshalb in der Verbesserung der Lebensdauerabschätzung gesehen, und zwar für den LCF- und HCF-Bereich. Dazu gehören eine bessere Trennung der Anriss- und

Rissfortschrittsphase sowie eine bessere Kenntnis der Schädigungsmechanismen und ihre Beeinflussung durch Werkstoff, Geometrie und Fügeprozess.

4.4.3 Mehrachsigkeit

Schweißnähte in Bauteilen und Strukturen unterliegen vielfach einer mehraxialen Beanspruchung. Liegen proportionale Beanspruchungen vor, kann das Festigkeitsverhalten mit Hilfe von Festigkeitshypothesen abgeschätzt werden. Proportionale Beanspruchungen stellen aber einen Sonderfall dar. Beim allgemeinen Beanspruchungsfall handelt es sich um voneinander unabhängige Komponenten. Nichtproportionale Beanspruchungen führen zu einer zeitlich veränderlichen Hauptspannungsrichtung. Das bedeutet, dass die konventionellen Festigkeitshypothesen nicht mehr anwendbar sind.

In den letzten Jahren war der Einfluss der Mehrachsigkeit auf die Lebensdauer von Schweißverbindungen Gegenstand intensiver Forschungen, z. B. an geschweißten Rohr-Flansch-Verbindungen. Um dieses komplexe Thema befriedigend behandeln zu können und z. B. auch in das Technische Regelwerk einzubringen, sind weitere Untersuchungen unabdingbar.

4.5 FE-Berechnung der Beanspruchungen in geschweißten Bauteilen und Anwendung örtlicher Nachweiskonzepte

Wie aus den Umfrageergebnissen deutlich hervorgeht, werden die in Schweißkonstruktionen vorliegenden Beanspruchungen standardmäßig mit FEM berechnet. Damit besteht grundsätzlich die Möglichkeit, die im Schweißnahtbereich lokal auftretenden Spannungsspitzen rechnerisch zu ermitteln. Für geschweißte Konstruktionen aus Stahl sind die lokalen Nachweiskonzepte soweit entwickelt, dass die Dauerfestigkeit anhand von Strukturspannungen (bauteilbedingte Spannungserhöhungen im Verbindungsbereich) oder anhand von Kerbspannungen (Berücksichtigung der durch die Nahtgeometrie bedingten Spannungsspitzen) nachgewiesen werden kann. In neueren Richtlinien und Empfehlungen zur Schwingfestigkeitsauslegung sind das Struktur- und Kerbspannungskonzept bereits verankert [4, 5]. Für geschweißte Konstruktionen aus Al-Legierungen laufen gegenwärtig verschiedene Forschungsarbeiten zur Schaffung der Voraussetzungen für den Einsatz lokaler Nachweiskonzepte. Die künftigen europäischen Normen zur Festigkeitsauslegung geschweißter Bauteile werden neben dem Nennspannungskonzept auch das Strukturspannungskonzept enthalten (Eurocode 3 u.9, Druckbehälternorm).

Somit bestehen an sich günstige Voraussetzungen für die Schwingfestigkeitsauslegung von geschweißten Bauteilen auf der Basis lokaler Beanspruchungen. Die Ergebnisse der Umfrage und des Forschungsseminars lassen jedoch deutliche Defizite hinsichtlich der Anwendbarkeit der verschiedenen örtlichen Konzepte erkennen. Dies betrifft zunächst die FE-Ermittlung lokaler Beanspruchungsgrößen und damit Fragen der zweckmäßigen bzw. geeigneten FE-Modellbildung, d.h. Festlegungen zur Vernetzungsstruktur des nachzuweisenden Verbindungsbereiches. Die hierfür in Berechnungsrichtlinien enthaltenen Vorgaben sind offensichtlich nicht ausreichend (z. B. in IIW-Empfehlungen u. Eurocode 9).

Darüber hinaus erfordert die lokale Beanspruchungsermittlung bedingt durch örtlich notwendige FE-Netzverfeinerungen einen deutlich erhöhten Modellierungs- bzw. Berechnungsaufwand, wobei dieser für die Berechnung von Kerbspannungen gegenüber der Strukturspannungsermittlung noch einmal erheblich ansteigt. Letztlich aber ergeben sich auch aus dem gegenwärtigen Entwicklungsstand der verschiedenen örtlichen Nachweiskonzepte deutliche Anwendungsgrenzen.

zen für die Schwingfestigkeitsauslegung geschweißter Bauteile. So fehlen bisher ausreichende Grundlagen vor allem für den Nachweis der Zeit- und Betriebsfestigkeit geschweißter Bauteile.

Von den lokalen Nachweisverfahren erscheint für die industrielle Praxis das Strukturspannungskonzept offensichtlich von vorrangiger Bedeutung zu sein, denn es ist einerseits in allen neueren Richtlinien einschließlich der künftig maßgebenden europäischen Normen erfasst [4, 5, 6, 22], und andererseits erfordert es im Vergleich zum Kerbspannungskonzept erheblich weniger Modellierungsaufwand. Aber auch für die Anwendung des Strukturspannungskonzeptes sind noch offene Fragen zu klären. Im Einzelnen betrifft das folgende Problemstellungen:

- ◆ detailliertere Vorgaben für die FE-Vernetzung des Verbindungsbereiches (Elementtyp und Elementgröße, Netzabstufung bzw. Netzverfeinerung),
- ◆ Entwicklung von Vorgaben für die Spannungsextrapolation auf den Nahtübergang („hot spot“-Spannung) für plattenförmige Verbindungsstrukturen (bisher fehlen hierfür im Gegensatz zu Hohlprofilverbindungen allgemeingültige Aussagen [3]),
- ◆ Anwendungserweiterung des Strukturspannungskonzeptes auf Schweißverbindungen mit unterschiedlicher Lage von maximaler Strukturspannung und kritischem Anrißort (bisher Anwendungsbeschränkung auf Schweißungen mit schwingbruchkritischer Stelle im Nahtübergang),
- ◆ Berücksichtigung von mit neueren Füge-technologien hergestellten Verbindungsformen (z. B. Reibrührschweißungen),
- ◆ Ermittlung von Schwingfestigkeitswerten für bisher nicht erfasste Werkstoffverbindungen (z. B. Mg-Legierungen).

Abschließend ist darauf hinzuweisen, das die Anwendung des Struktur- und auch des Kerbspannungskonzeptes in der industriellen Praxis wesentlich davon abhängen wird, inwieweit es gelingt, durch die Entwicklung und Implementation von speziellen Modellierungs- bzw. Vernetzungstechniken den Berechnungsaufwand bei der Ermittlung der lokal benötigten Spannungswerte deutlich zu reduzieren.

4.6 Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen

Durch den Einsatz bruchmechanischer Konzepte lässt sich bei der Bauteilauslegung und bei der Betriebsüberwachung von geschweißten Konstruktionen zusätzliche Sicherheit gewährleisten. Dies ist vor allem für Konstruktionen mit erhöhtem Gefahrenpotential und hohen Sicherheitsanforderungen von Bedeutung, wo bruchmechanische Konzepte in zunehmendem Maße eingesetzt werden (z. B. Kraftwerkstechnik, Flugzeug- und Raumfahrtindustrie, Turbinenbau, in jüngerer Zeit auch Offshore-Industrie, Pipelinebau, chemische Industrie u. a.). Im Vergleich zu konventionellen Bauteilauslegungskonzepten kann die Bruchmechanik im Sinne einer zweiten Sicherheitsbarriere zusätzliche Informationen liefern. Beispielsweise können für ein auf Dauerfestigkeit ausgelegtes Bauteil physikalisch begründete Inspektionsintervalle bestimmt werden. Dies ist dann wesentlich, wenn ein nach der Fertigung als rissfrei angesehenes Bauteil in Wirklichkeit rissartige Defekte einer bestimmten Größe enthält und diese während des Betriebes überwacht werden müssen.

Obwohl die Entwicklung bruchmechanischer Konzepte in den letzten Jahren nicht zuletzt für die Bewertung von Schweißverbindungen weit vorangeschritten ist [26, 27, 28], besteht auch hier noch erheblicher Forschungsbedarf, u. a. hinsichtlich der Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten insbesondere für moderne Schweißverfahren oder der Bereitstellung von entsprechenden Referenzspannungsprofilen.

4.7 Geklebte Bauteilverbindungen

Wie schon mehrfach betont, werden alternativ zu den herkömmlichen Schweißverfahren zunehmend mechanische Fügeverfahren (u. a. Durchsetzfügen u. Nieten) und das Kleben sowie darauf basierende Verfahrenskombinationen angewendet. Dies gilt vor allem für Verbindungen von dünnwandigen Bauteilstrukturen wie z. B. im Automobilbau.

Am Beispiel der Klebetechnik wird deutlich, dass für die Festigkeitsauslegung von solchen Verbindungen noch zahlreiche offene Fragen zu klären sind und somit ein erhöhter Forschungsbedarf besteht. Ausgehend von den Umfrageergebnissen und dem dazu auf dem Forschungsseminar vorgestellten Beitrag sind für den weiteren erfolgreichen Einsatz der Klebetechnik zum Fügen metallischer Strukturen folgende Problemstellungen forschungsseitig zu bearbeiten:

- ◆ Durchführung von grundlegenden Untersuchungen an unterschiedlich geklebten Verbindungen zur
 - ◆ Klärung des Schädigungsmechanismus,
 - ◆ Entwicklung neuer nichtlinearer Werkstoffgesetze,
 - ◆ Ableitung von Berechnungs- bzw. Bewertungsmethoden für den Festigkeitsnachweis bei statischer u. bei schwingender Belastung insbesondere für ingenieurmäßiges Vorgehen bzw. Bewerten,
- ◆ Ermittlung von geeigneten Festigkeitskennwerten
 - ◆ Festlegungen von Probenform und Prüfverfahren für die Ermittlung der benötigten Kennwerte,
 - ◆ Berücksichtigung von Langzeitverhalten (Alterung), Temperaturabhängigkeit und der Oberflächenbeschaffenheit,
- ◆ Untersuchungen zum Steifigkeitseinfluss bei großen Verbindungsstrukturen,
- ◆ Erfassen von Auswirkungen der Fertigung und Montage auf die Festigkeit,
- ◆ Entwicklung von FE-Modellen bzw. von speziellen FE-Elementen zur Berücksichtigung des Verformungs- und Festigkeitsverhalten in FE-Analysen für die Auslegung großer geklebter Bauteilstrukturen,
- ◆ Festigkeitsbewertung von durch Verfahrenskombination gefügten Bauteilen (z. B. Verbindungen durch Kleben/Durchsetzfügen oder Kleben/Stanznieten).

5 Zusammenfassung

Zur Ermittlung des Forschungsbedarfes auf dem Gebiet der Konstruktion und Berechnung gefügter, metallischer Konstruktionen führte die SLV Halle GmbH im Auftrag des DVS eine Befragung von Forschungs- und Industrieunternehmen verschiedenster Branchen durch. Des Weiteren veranstaltete der DVS ein Forschungsseminar zum gleichen Thema. Sowohl die Befragung als auch das Seminar zeigen eine Reihe ungelöster Problemfelder zur Auslegung von gefügten metallischen Konstruktionen auf. Nach wie vor wird dabei den schwingend beanspruchten Konstruktionen der Vorrang gegeben.

Als Schwerpunkte des zukünftigen Forschungsbedarfes wurden dabei folgende Punkte herausgearbeitet:

- ◆ Erfassen von Fertigungseinflüssen und hier speziell
 - ◆ die Auswirkungen neuerer Schweißtechnologien,
 - ◆ die Berücksichtigung der Nahtqualität und
 - ◆ der Einsatz von Nachbehandlungsverfahren.
- ◆ Unterschiede in den Ermüdungsfestigkeitskennwerten von Kleinproben und realen Schweißkonstruktionen und hier insbesondere
 - ◆ die Analyse der vorhandenen Datenbasis zur Ermüdungsfestigkeit und Erstellen einer Referenz-Datenbank und
 - ◆ die Entwicklung von Vorgehensweisen zur differenzierten Erfassung der Eigenspannungen.
- ◆ Betriebsfestigkeitsnachweis von Schweißverbindungen mit den Unterpunkten
 - ◆ zuverlässige Lastkollektivermittlung,
 - ◆ Schadensakkumulation und
 - ◆ Berücksichtigung der Mehrachsigkeit.
- ◆ FE-Analyse der Beanspruchungen in geschweißten Bauteilen und Anwendung örtlicher Nachweiskonzepte mit entsprechenden
 - ◆ Angaben für die Vernetzung und Spannungsextrapolation auf den Nahtübergang bei Anwendung des Strukturspannungskonzeptes,
 - ◆ Annahmen zur Berücksichtigung des Werkstoffverhaltens (u. a. Kerbdehnungskonzept, Erfassen von Leichtbauwerkstoffen)
 - ◆ Möglichkeiten zur weiteren Reduzierung des Berechnungsaufwandes.
- ◆ Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen insbesondere
 - ◆ Ermittlung von bruchmechanischen Kennwerten für moderne Schweißverfahren und
 - ◆ die Bereitstellung von entsprechenden Referenzeigenspannungsprofilen.
- ◆ Geklebte Bauteilverbindungen und hier hauptsächlich
 - ◆ der Schädigungsmechanismus,
 - ◆ die Entwicklung neuer nichtlinearer Werkstoffgesetze,
 - ◆ ingenieurmäßige Berechnungs- bzw. Bewertungsmethoden für den Festigkeitsnachweis bei statischer u. bei schwingender Beanspruchung und
 - ◆ die Ermittlung von geeigneten Festigkeitskennwerten insbesondere zum Langzeitverhalten

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Begriff der Schweißbarkeit.....	6
Abbildung 2:	Einflussfaktoren der Festigkeitsauslegung von gefügten metallischen Bauteilen.....	7

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Umfragebeteiligung	8
Tabelle 2:	Aussagen zur Berechnung gefügter Verbindungen (1)	9
Tabelle 3:	Aussagen zur Berechnung gefügter Verbindungen (2)	10
Tabelle 4:	Aussagen zu Schweißverfahren (1)	11
Tabelle 5:	Aussagen zu Schweißverfahren (2)	11
Tabelle 6:	Aussagen zu anderen Fügeverfahren (1).....	12
Tabelle 7:	Aussagen zu anderen Fügeverfahren (2).....	12
Tabelle 8:	Aussagen zu den eingesetzten Werkstoffen (1).....	13
Tabelle 9:	Aussagen zu den eingesetzten Werkstoffen (2).....	14

6.3 Literaturverzeichnis

- [1] Seeger, T.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. In: Stahlbau-Handbuch Band 1, Teil B. Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln, 1996
- [2] Radaj, D. u. Sonsino, C. M.: Fatigue Assessment of welded joints by Local Approaches. Abington Publishing, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 1998
- [3] Radaj, D., Sonsino, C.M.: „Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten“, DVS-Verlag, Düsseldorf 2000
- [4] Hobbacher, A.: Empfehlungen zur Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen und Bauteile. IIW-Dokument XIII-1539-96/XV-845-96, DVS-Verlag Düsseldorf 1997
- [5] Hänel, B., Haibach, E., Seeger, T., Wirthgen, G., Zenner, H.: Die FKM-Richtlinie „Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile“ 3. Auflage, VDMA Verlag GmbH, Frankfurt/ Main 1998
- [6] DIN V ENV 1993 (04.1993), Teil 1-1: Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
- [7] DIN 15 018 (11.1984), Teil 1 und 2: Krane – Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung, Grundsätze für bauliche Durchbildung
- [8] Deutsche Bundesbahn (Hrsg.) DS 952: Schweißen metallischer Werkstoffe an Schienenfahrzeugen und maschinentechnischen Anlagen, Minden (Westf.) 1991
- [9] DIN EN 25817 (09.1992): Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl – Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
- [10] DIN EN 30042 (08.1994): Lichtbogenschweißverbindungen an Aluminium und seinen schweißgeeigneten Legierungen - Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
- [11] Germanischer Lloyd: Bauvorschriften & Richtlinien 2000. V – *Berechnungstechnik* Selbstverlag Germanischer Lloyd, Hamburg, 1998
- [12] DIN 4113-1 (05.1980): Aluminiumkonstruktionen unter vorwiegend ruhender Belastung; Berechnung und bauliche Durchbildung
- [13] BS 8118 (1991), Part 1: Structural use of aluminium. Code of practice for design.
- [14] (Vornorm) DIN V ENV 1999-1-1 (10.2000): Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln; Bemessungsregeln für Hochbauten
- [15] (Vornorm) DIN V ENV 1999-1-2 (10.1999): Eurocode 9: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen - Teil 1-2: Allgemeine Regeln; Tragwerksbemessung für den Brandfall
- [16] [Vornorm) DIN V ENV 1999-2 (03.2001): Eurocode 9: Bemessung und Konstruktion von Aluminiumbauten - Teil 2: Ermüdungsanfällige Tragwerke
- [17] DIN 18800 Teil1, (11/1990): Stahlbauten – Bemessung und Konstruktion
- [18] DIN 4132 (02/1981): Kranbahnen; Stahltragwerke; Grundsätze für Berechnung, bauliche Durchbildung und Ausführung

- [19] DS 804: Vorschriften für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke (VEI), Fassung 01.06.93, Bekanntgabe B3
- [20] AD-Merkblatt S1 u. S2. Berechnung auf Wechselbeanspruchung. Ausgabe Mai 1998. AD-Regelwerk. Carl Heymanns Verlag KG, Köln, 1998
- [21] Rauth, M.: FEM-integrierendes Berechnungskonzept für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis von Behälter-Stützen-Verbindungen, Tagungsband, Universität Dortmund, 20. November 2001, Aachen, Shaker Verlag 2001
- [22] (Norm-Entwurf) DIN EN 13445-3 (08.1999): Unbefeuerte Druckbehälter - Teil 3: Konstruktion
- [23] Merkblatt DVS 0705, Beiblatt 1, 11/2001: Empfehlungen für zulässige Spannungen von Schweißverbindungen an Stahlbauteilen des nichtgeregelten Bereiches bei vorwiegend ruhender Beanspruchung, DVS-Verlag, Düsseldorf 2001
- [24] Merkblatt DVS 0705, Beiblatt 2, 11/2001: Empfehlungen zum Nachweis von Teilsicherheiten bei vorwiegend ruhender Beanspruchung, DVS-Verlag, Düsseldorf 2001
- [25] Ogle, M. H.: Weld quality specifications for steel and aluminium structures. Welding in the World/Le Soudage dans le Monde. Vol. 29, No 11/12, pp. 341-362, 1991
- [26] Zerbst, U., Wiesner, C., Kocak, M., Hodulak, L.: SINTAP: Entwurf einer vereinheitlichten europäischen Fehlerbewertungsprozedur – eine Einführung. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Bericht GKSS 99/E/65.
- [27] Zerbst, U. u. Langenberg, P.: Die industrielle Anwendung bruchmechanischer Konzepte vor dem Hintergrund internationaler Bewertungsvorschriften und Regelwerke. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Bericht GKSS 2000/38.
- [28] Zerbst, U., Kocak, M. u. Hübner, P.: Bruchmechanische Bewertung von Schweißverbindungen. GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, Bericht GKSS 2002/1.