

# Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

**Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse -  
Vorhaben 3607R02514**

**Auftragnehmer:**

**Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), unter Mitwirkung von Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA Stuttgart), TÜV Nord, TÜV Süd Industrie Service**

**M. Gaal, M. Bertovic**

**C. Müller, S. Zickler**

**B. Fahlbruch, V. Spokoiny**

**D. Schombach, T. Just**

**H.-J. Cramer**

**Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.**

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

**BfS-RESFOR-25/09**

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:  
**urn:nbn:de:0221-2009111107**

Salzgitter, November 2009



Industrie Service



**BAM**

Bundesanstalt für  
Materialforschung  
und -prüfung

## BfS-Projekt SR 2514

# Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse

## Endbericht

Projektmanager: Christina Müller  
Projektleiter: Anton Erhard

### Autoren:

M. Gaal  
M. Bertovic  
C. Müller  
S. Zickler  
B. Fahlbruch  
V. Spokoiny  
D. Schombach  
T. Just  
H.-J. Cramer

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung der Autoren wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) übereinstimmen.

Berlin, 7. April 2009

## Inhalt

Zusammenfassung.....	3
Abstract.....	5
1 Einführung.....	7
1.1 Anliegen.....	7
1.1.1 Organisatorischer Kontext des Projektes.....	7
1.1.2 Allgemeine Bemerkungen zum Projektanliegen.....	7
1.1.3 Ablauf und Struktur des Endberichtes.....	9
1.2 Aspekte der menschlichen Faktoren in der zerstörungsfreien Prüfung im Kernkraftwerksbereich – Literaturstudie.....	10
1.2.1 Literaturübersicht.....	10
1.2.2 PISC-Projekt.....	11
1.2.3 Die wichtigsten Resultate anderer Studien.....	12
1.3 Prozessmodell.....	16
1.4 Aktualisierte Zielstellung.....	18
2 Methode und Versuchsdurchführung.....	20
2.1 Probanden.....	20
2.2 Modell zum menschlichen Einfluss.....	20
2.3 Erhebungsinstrumente.....	21
2.3.1 Erfahrung und Qualifikation.....	22
2.3.2 Stressresistenz.....	22
2.3.3 Psychische Arbeitsbelastung.....	22
2.3.4 Stress-Reaktion.....	22
2.3.5 Organisatorische Faktoren.....	23
2.4 Reflektoren und Prüfaufgaben.....	23
2.4.1 Prüfbereiche.....	25
2.4.2 Reflektoren und Prüfköpfe.....	25
2.4.3 Prüfaufgaben.....	27
2.4.4 Demonstrationsübung.....	29
2.5 Ultraschall-Handprüfung.....	29
2.5.1 Versuchsplan und Durchführung.....	29
2.5.2 Ausgangsvariablen.....	32
2.5.3 Faktoren.....	33
2.5.4 Einfluss der Organisation auf die Prüfergebnisse.....	34
2.5.5 Methode der Datenauswertung.....	34
2.6 Mechanisierte Ultraschallprüfung.....	37
2.7 Postulierte Erwartungen.....	38
3 Ergebnisse.....	39
3.1 Ergebnisse der Handprüfung.....	39
3.1.1 Allgemeine Anmerkungen.....	39
3.1.2 Ergebnisse für die Amplitude.....	40
3.1.3 Ergebnisse für die Halbwertslänge.....	42
3.1.4 Ergebnisse für die Streuung der Amplitude, der Halbwertslänge und der Position.....	43
3.1.5 Ergebnisse für den Einfluss der Organisation.....	49
3.2 Ergebnisse der mechanisierten Prüfung.....	51
4 Diskussion.....	54
4.1 Zeitdruck.....	54

4.2	Psychische Arbeitsbelastung .....	55
4.3	Reihenfolge.....	55
4.4	Stress.....	56
4.5	Erfahrung .....	57
4.6	Organisatorischer Kontext .....	57
4.7	Prozeduren und die Demonstrationsübung.....	58
4.8	Aufsicht.....	58
4.9	Zusammenfassung der Diskussion .....	59
4.10	Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen.....	59
5	Stellungnahme der TÜV .....	61
5.1	Vorbemerkungen .....	61
5.2	Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen.....	64
5.2.1	Zweck und Ziel des Vorhabens .....	64
5.2.2	Prüfbedingungen und Untersuchungsparameter.....	64
5.2.3	Prüfpersonal.....	65
5.2.4	Untersuchungsergebnisse .....	65
5.3	Bewertungsmaßstäbe .....	66
5.4	Stellungnahme .....	68
5.4.1	Untersuchungsergebnisse .....	68
5.4.2	Prüfpraxis in Kernkraftwerken.....	69
5.5	Empfehlungen.....	71
6	Schlussfolgerungen.....	72
	Danksagung.....	74
	Referenzen .....	75

## Zusammenfassung

In Kernkraftwerken finden wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen an Behältern und Rohrleitungen sowie auch Fertigungsprüfungen an reparierten Bauteilen in Bereichen mit radioaktiver Strahlung statt. Weitere wesentliche Arbeitsbedingungen für das Prüfpersonal sind Arbeiten unter Atemschutz, hohe Umgebungstemperaturen, Zeitdruck und Lärm. Die übergeordnete Zielsetzung des Vorhabens SR 2514 bestand darin, am Beispiel von Prüfungen mit Ultraschall eine belastbare Aussage zum Einfluss der Arbeitsbedingungen des Prüfers auf die Qualität der Ergebnisse von zerstörungsfreien Prüfungen zu machen und Möglichkeiten zur Minimierung ungünstiger Einflussfaktoren aufzuzeigen. Die Einbindung der Technischen Überwachungsvereine TÜV Nord und Süd in das Vorhaben hatte zum Ziel, dass die Ergebnisse des Vorhabens schnell in die Praxis umgesetzt werden können.

Die Ultraschallprüfungen erfolgten am Großbehälter der MPA Stuttgart und an Vergleichskörpern an dort eingebrachten Testfehlern (Nuten, Risse). Die ausgewählten Fehler (Reflektoren) waren typisch für Prüfaufgaben, die bei wiederkehrenden Ultraschallprüfungen in Kernkraftwerken von den Prüfern zu lösen sind. In dem Untersuchungsprogramm erfolgten Ultraschall-Handprüfungen durch zehn erfahrene Prüfer und mechanisierte Ultraschallprüfungen mit zwei Prüfteams. Die Prüfaufgabe bestand darin, die in den vorgegebenen Prüfabschnitten vorhandenen Reflektoren aufzufinden und deren Amplituden, Ortskoordinaten und Längenerstreckungen zu ermitteln. Als Bewertungsmaßstab für die Qualität der Prüfaussage und für den Einfluss des menschlichen Faktors diente die Genauigkeit der Messwerte.

Um eine klare und statistisch untermauerte Aussage zu erreichen, wurde der Schwerpunkt auf manuelle Prüfung gelegt. Als variable Messgröße wurde die unterschiedlich zur Verfügung stehende Zeit für Prüfdurchführung, Bewertung und Protokollierung gewählt und in drei Stufen variiert. Psychologische Faktoren wie psychische Arbeitsbelastung und Stressresistenz wurden während der Prüfdurchführung erhoben.

Die Ergebnisse zeigen einen hohen Einfluss des menschlichen Faktors auf das Prüfergebnis. Eine Einwirkung des Zeitdrucks auf die Genauigkeit der Prüfergebnisse wurde nachgewiesen. Hierbei war die leistungsmindernde Wirkung des individuell wahrgenommenen Zeitdrucks zusammen mit der psychischen Arbeitsbelastung signifikant. Von den organisatorischen Bedingungen wurde eine gute Vorbereitung auf die Prüfung z.B. durch die sorgfältige Einweisung und ein vorgeschaltetes Fertigkeitstraining an Vergleichskörpern und die Kommunikation zwischen der „Organisation“ (Prüfaufsichten des Betreiber, der Prüffirmen und der Sachverständigenorganisation) und den Prüfern als hoch bedeutsam bewertet. Relevant und für die Prüfpraxis aufschlussreich ist der erhebliche Einfluss der Organisation der Prüfungen. Wenn nach der subjektiven Einschätzung der Teilnehmer die Prüfaufgaben nicht genau definiert, die Arbeitsunterlagen widersprüchlich und nicht handhabbar sowie die Arbeitsbedingungen (Beleuchtung, Gerüste) unzulänglich sind und vor allem wenn sie nicht in die Aufgabenstellung ausreichend eingewiesen worden sind, nimmt die psychische Belastung der Prüfer deutlich zu. Ebenfalls konnten interindividuelle Unterschiede zwischen den Prüfern aufgezeigt werden.

Möglichkeiten zur Minimierung eines negativen Einflusses sehen wir in einer verbesserten Planung des Prüfablaufs und einer verbesserten Kommunikation

zwischen den Beteiligten. Speziell bei Ultraschallprüfungen schlagen wir folgende Maßnahmen vor:

1. Umfassende Vorbereitung und Einweisung der Prüfer in die spezielle Prüfaufgabe und den Prüfandrbedingungen. Die Prüfer sollen vor dem Prüfeinsatz an Vergleichskörper trainieren können und die Fähigkeit, die Prüfaufgabe erfüllen zu können, anhand von Testmessungen nachweisen.
2. Stärkung der Verantwortung der Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirma und der Sachverständigenorganisation. Sie sollen gegenüber den Verantwortlichen für die Revisionsplanung die Belange einer ordnungsgemäßen Prüfdurchführung durchsetzen, die sicherstellen, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden. Nach Abschluss der Prüfungen sollen die Prüfaufsichten mit ihrer Unterschrift auf dem Prüfbericht bestätigen, dass die hier genannten Bedingungen eingehalten wurden.
3. Bei wiederkehrenden Prüfungen im Geltungsbereich der KTA 3201.4 sind manuelle Prüfungen als zweifach unabhängige Prüfung durchzuführen, d.h. es hat eine eigenständige Prüfung und Bewertung durch Prüfer der Prüffirma bzw. des Betreibers und durch Prüfer des Sachverständigen nach §20 AtG zu erfolgen.

Dazu werden konkrete Formulierungsvorschläge für das kerntechnische Regelwerk (KTA 3201.4) gemacht.

Weiterhin stellen das im Rahmen des Vorhabens verwendete allgemeine Modell und die Erkenntnisse aus den psychologischen Betrachtungen eine geeignete Grundlage für Untersuchungen weiterer Einflussfaktoren (z. B. Wärme, Kälte, Dunkelheit, beengte Räume, Prüfen unter Atemmasken) auf die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen dar.

## Abstract

In nuclear power plants non-destructive testing (NDT) takes place in areas with radioactive radiation: during in-service inspection at vessels and pipelines as well as during production inspection at repaired components. Other important working conditions for NDT inspectors include tasks carried out wearing breathing protection, under high surrounding temperatures, time pressure and noise. The main goal of this study was to make a well-founded statement about the influence of the working conditions on the quality of the testing results based on the example of ultrasonic testing and to indicate possibilities for minimising undesirable influences. The German Technical Service Providers TÜV Nord and TÜV Süd were involved in the project to enable a fast implementation of the results in practise.

Ten experienced inspectors carried out manual ultrasonic inspection and two teams mechanised/automated inspection on the reactor vessel at MPA Stuttgart and on test peaces with inserted flaws (notches and cracks). The selected flaws were typical for tasks performed during ultrasonic in-service inspection in nuclear power plants. The task was to find the flaws in given areas and to determine the corresponding amplitudes, coordinates and length dimensions. The evaluation criterion for the quality of inspection and for the human factor influence was the precision of the measured quantities.

To come to a clear and statistically well-founded statement, the main focus was put on the manual inspection. The time available for inspection, evaluation and writing the protocols was varied in three levels. Some psychological factors, e.g. mental demand and stress resistance, were assessed in the course of the experiment.

The results show a high influence of human factors on the inspection results. The main hypothesis was confirmed, i.e. that the time pressure has an effect on the measurement precision. The effect of perceived time pressure and mental workload was found to be significant having a negative impact on the performance. A good preparation before the inspection (e.g. thorough briefing and training on test pieces) and the communication between the "organisation" (e.g. the supervision of the utilities, inspection companies and expert organisations) and the inspectors were considered as highly important. The influence of the organisation has shown to be relevant for the practice. When the inspectors consider the inspection tasks as not precise-enough defined, the documentation as ambiguous and not manageable, the working conditions as inadequate, and above all when they feel they have not been sufficiently prepared for the tasks, there is a clear increase in the mental workload of the task. Interindividual differences were also found as significant.

A way to minimize the negative impact of human factors could be found in an improved inspection planning and in a better communication between the involved parties. In regard to ultrasonic testing, we propose the following measures:

1. Comprehensive preparation and briefing of the inspectors with regard to their specific tasks and testing conditions. The inspectors should receive training on test pieces and they should demonstrate their ability to perform the required task.
2. The supervisors of the utilities, inspection companies and expert organisations should have more responsibilities. In their interaction with the authorities for

revision planning, they should enforce the interest of a correct inspection, which ensures that negative effects on the inspection quality are avoided. After inspection the supervisors should confirm with their signatures that the conditions enabling correct inspection were kept.

3. During in-service inspections according to the KTA 3201.4 code the manual ultrasonic inspection should be performed by two inspectors independently, i.e. one inspection performed by an inspector from an inspection company or from the side of the power plant owner and one performed by an inspector from an expert organisation according to §20 AtG.

Regarding these points we have formulated specific proposals for an update of the KTA 3201.4 safety standard.

The statistical model used in this project and the findings regarding psychological considerations are an adequate basis for studies of further factors (e.g. temperature, insufficient light, spatial limitations, and breathing masks) and their influence on the reliability of non-destructive testing.

# 1 Einführung

## 1.1 Anliegen

### 1.1.1 Organisatorischer Kontext des Projektes

Für das BfS Vorhaben SR2514 „*Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse*“ wurde das Angebot der BAM vom 15. November 2006 akzeptiert und gefördert. Im Angebot wird ein zweijähriges Projekt unter Mitwirkung der MPA, des TÜV Nord und des TÜV Süd vorgeschlagen, bei dem die BAM federführend ist, und seitens der MPA, als Austragungsort der Versuche am MPA Großbehälter, weitere Prüffirmen in Form von Unteraufträgen hinzugezogen werden. Aufgrund des umfangreichen Themenkomplexes des Untersuchungsvorhabens werden insbesondere zerstörungsfreie Prüfungen, wie sie nach dem derzeitigen Stand des Regelwerkes durchgeführt werden, betrachtet.

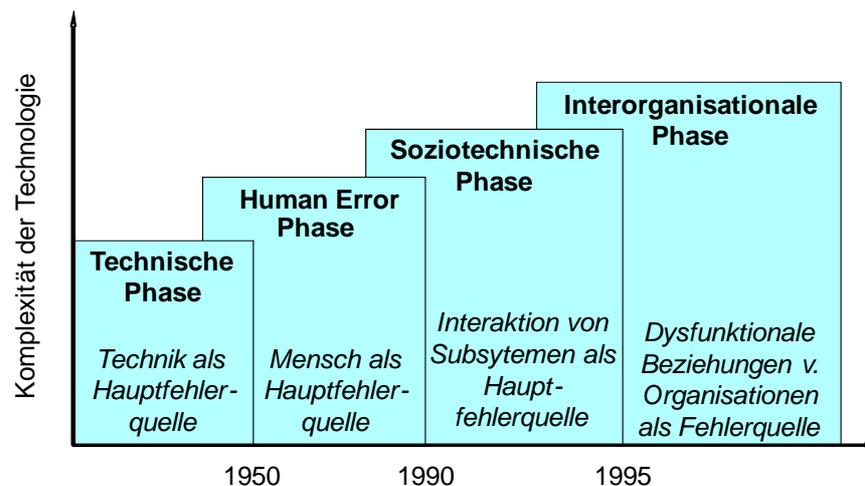
Die Einbindung der Technischen Überwachungsvereine in das Vorhaben hat zum Ziel, dass die Ergebnisse dieses Untersuchungsvorhabens schnell in der Praxis umgesetzt werden. Beide eingeplanten Überwachungsvereine, TÜV Süd und TÜV Nord, sind seit Beginn der Kerntechnik in Deutschland als Gutachter von den Genehmigungsbehörden beauftragt. Ferner ist der Erfahrungsschatz, den beide Überwachungsvereine in Bezug auf den menschlichen Einfluss auf das Prüfergebnis bei der zerstörungsfreien Prüfung haben, für die Auswertung der Messergebnisse der einzelnen Prüfteams wichtig für die Durchführung des Untersuchungsvorhabens.

### 1.1.2 Allgemeine Bemerkungen zum Projektanliegen

Bei Fertigungsprüfungen und Wiederkehrenden Prüfungen mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) sind die das Prüfergebnis beeinflussenden Faktoren teilweise bekannt; zu ihrer Wirksamkeit können jedoch bisher keine konkreten Aussagen gemacht werden. In dem internationalen Forschungsprogramm PISC 3 (Programme for the Inspection of Steel Components) wurden die Faktoren Ermüdung und Stress als diejenigen dargestellt, die das Prüfergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen am stärksten beeinflussen. Zur Erzeugung von Ermüdung und Stress wurden im Labor Parameter wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Lärm sowie die Zugänglichkeit zum Prüfstück, die Zeit für die Prüfung, die Arbeitszeit und die Gesamtzeit für die Prüfung geändert. Die Übertragbarkeit auf die Verhältnisse in Deutschland ist jedoch kaum möglich, da die Ergebnisse von der Gerätetechnik, den Normen und Regeln sowie Gesetzen (z. B. Arbeitsrecht) abhängig sind. Diese „Randbedingungen“ variieren international sehr stark. Im Rahmen des Projektes sollen zur Erzeugung von Ermüdung und Stress vor allem die Arbeitszeiten variiert werden und die klimatischen Umgebungsbedingungen betrachtet werden. Die jeweiligen Prüfergebnisse werden miteinander verglichen.

Seit Mitte der neunziger Jahre werden auch in Deutschland bei der Analyse sicherheitsrelevanter Anlagen, insbesondere der Kerntechnik, psychologische und arbeitswissenschaftliche Aspekte herangezogen. Auf diesem Gebiet unterscheiden Fahlbruch und Wilpert [8] in Anlehnung an Reason [40] vier sich überlappende Phasen der Sicherheitsforschung, die mit der wachsenden Komplexität der

Technologie korrespondieren. In der ersten, der technischen Phase wird das größte Sicherheitsproblem in der Technik gesehen. Anstrengungen zur Erhöhung der Sicherheit zeigen sich überwiegend in technischen Verbesserungen. In der darauffolgenden Phase der menschlichen Fehler wird der Mensch als die Hauptfehlerquelle angesehen. Maßnahmen wie Training oder Personalauswahl zielen auf die Reduzierung von Fehlern des Personals. In der dritten, der soziotechnischen Phase, wird das Blickfeld auf die gesamte Organisation erweitert. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stehen jetzt die Interaktionen des technischen und sozialen Subsystems, die als potenzielle Sicherheitsgefährdungen gesehen werden. Dementsprechend zielen Verbesserungen vor allem auf die Optimierung dieser Interaktionen. Die jüngste Phase wurde durch Untersuchungen von katastrophalen Unfällen, wie beispielsweise das Sinken der Fähre „Herald of Free Enterprise“, der Reaktorunfall in Tschernobyl oder das Flugzeugunglück bei Überlingen eingeleitet. Diese Untersuchungen zeigten, dass auch Institutionen oder Organisationen außerhalb der Betreiberorganisation an der Entstehung der Unfälle beteiligt waren. In der Phase der interorganisationalen Beziehungen werden daher zusätzlich zu den organisationalen Interaktionen eben auch dysfunktionale Beziehungen zwischen Organisationen als Gefährdung für die Sicherheit konzipiert [54]. Maßnahmen zur Erhöhung der Sicherheit zielen auf eine verbesserte Koordination zwischen den Organisationen. Die Abb. 1 zeigt die sich überlappenden Phasen.



**Abb. 1. Phasen der Sicherheitsforschung (in Anlehnung an Wilpert & Fahlbruch [54]).**

In der vorliegenden Untersuchung werden die ersten drei Aspekte Technik, Mensch, Umfeld miteinbezogen. Die Basis dafür ist ein Prozessmodell (s. Kapitel 1.3) über die Wirkweise der verschiedenen Einflussfaktoren. Ein entsprechendes Prozessmodell für die ZfP bei wiederkehrender Prüfung in deutschen Kernkraftwerken soll hier eine solide wissenschaftliche Basis zur Definition des Untersuchungsprogramms bilden. Weiterhin sollen neben den technischen Aspekten psychologische Variable erhoben

werden, um Ansatzpunkte für eine mögliche Optimierung der Prüfprozesse zu identifizieren.

Das Ergebnis der Prüfung, nämlich die Aussage, dass im Prüfobjekt keine relevanten Fehler vorhanden sind, muss mit einem Maximum an Sicherheit getroffen werden.

Die übergeordnete Zielsetzung dieses Untersuchungsvorhabens lautet, eine für Deutschland gültige Aussage zum Einfluss des Prüfers auf das Prüfergebnis zu machen und die relevanten Faktoren zu finden, die zu einer Minimierung dieses Einflusses beitragen können.

Das Ziel des Untersuchungsprogramms kann auch wie nachfolgend ausgeführt beschrieben werden: Die Ursachen, die die Prüfung bzw. das Prüfergebnis nachhaltig beeinflussen, sollen bei unterschiedlichen Prüfbedingungen identifiziert werden. Die Ergebnisse der Aktivitäten unter diesem Programmpunkt sollten dazu verwendet werden, Methoden zu entwickeln, die es ermöglichen einen negativen Einfluss des Menschen auf das Prüfergebnis zu erkennen, zu reduzieren und dies im Regelwerk zu verankern.

### **1.1.3 Ablauf und Struktur des Endberichtes**

In einer umfassenden Literaturstudie (Arbeitspaket 1) der BAM und der MPA wird zunächst der aktuelle internationale Stand der wissenschaftlichen Forschung und praktischen Erfahrungen zum Faktor Mensch, speziell in der zerstörungsfreien Prüfung, ermittelt und dargestellt. Zusammen mit der Expertise unterschiedlicher Fachleute im Projektteam und anhand der konkreten Randbedingungen wird daraus ein Modell erstellt. Weiterhin werden die konkreten Faktoren für die Untersuchung eingegrenzt, woraus sich die aktualisierte Zielstellung ergibt. Bei der MPA wurden die Testfehler an den Testkörpern und Großbehälter bereitgestellt, die Prüfanweisungen entwickelt sowie Kontakte zu den Prüffirmen, die im Projekt tätig werden sollen, hergestellt. Ein statistischer Versuchsplan, erstellt von der BAM, schließt Arbeitspaket 1 ab.

Die Arbeitspakete 2-4 wurden in z. T. parallel laufenden Experimenten der zerstörungsfreien Prüfung und der psychologischen Untersuchung vor Ort im Zeitraum Dezember 2007 bis Oktober 2008 unter Berücksichtigung des statistischen Versuchsplanes abgearbeitet. Die MPA hat die anfallenden Daten gesammelt und an die BAM übergeben. Das Arbeitspaket 4 enthält die Ergebnisauswertung für die Ultraschallhandprüfung und die mechanisierte Prüfung an Testkörpern und am Großbehälter. Es wurde von der BAM mit Unterstützung der international anerkannten Experten in Statistik (Prof. Spokoiny) und in Arbeitspsychologie (Dr. Fahlbruch) erarbeitet. Die Ergebnisse mit wissenschaftlichen Trendaussagen werden den TÜV zur Stellungnahme und Erarbeitung von Empfehlungen für das KTA-Regelwerk übergeben.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete zusammengefasst dargestellt.

## 1.2 Aspekte der menschlichen Faktoren in der zerstörungsfreien Prüfung im Kernkraftwerksbereich – Literaturstudie

### 1.2.1 Literaturübersicht

Dem Problem der Schwankungen in der Leistung der ZfP begegnete man bisher üblicherweise durch Verbesserung der Geräte und Veränderung der Prüfanweisungen – aber nur wenig Ressourcen wurden im Bereich der Forschung zum menschlichen Faktor investiert. Allerdings ist die häufigste Ursache für die Leistungsvariation das Bedienpersonal. Es ist der Prüfer, der das Signal bewertet, das von den Geräten geliefert wird. Um den Prozess der zerstörungsfreien Prüfung besser zu verstehen und dadurch die Zuverlässigkeit verbessern zu können, muss daher der Einfluss und die Wichtigkeit des menschlichen Faktors untersucht werden, aber nicht indem man den Einfluss des Menschen ausschließt, sondern indem man seine Fähigkeiten nutzt.

Damit eine Prüfung zuverlässig ist, müssen sowohl das ganze System als auch seine Teile zuverlässig sein (Geräte, Prüfanweisung und Personal). Studien haben gezeigt (z.B. Wheeler et.al. 1986; Taylor et.al. 1989; Swets, 1996; in [2], [30][31][32]), dass trotz der Kontrolle der Geräte, der Prüfanweisungen und der formalen Qualifikation des Personals die Qualität der ZfP noch in einem hohen Maße von den persönlichen Qualitäten des Prüfers abhängt, der die Prüfung durchführt. Die Leistung variiert sogar bei mechanisierten Prüfungen. Dies liegt offenbar an unterschiedlichen Interpretationen der Bewertungs- und Entscheidungskriterien durch die jeweiligen Prüfer (Skånberg, 1991 in [2]).

Die Ultraschall-Handprüfung stellt eine komplexe Aufgabe dar. Ihre Qualität hängt von den kognitiven und von den motorischen Fähigkeiten des individuellen Prüfers ab. Je komplexer eine Aufgabe wird, umso größer wird der Einfluss von Umweltfaktoren und Faktoren der Arbeitssituation auf die Leistung. Wie diese Faktoren nun die Prüfleistung in Kernkraftwerken in Deutschland beeinflussen, soll durch diese Untersuchung ermittelt werden.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurde eine Literaturstudie angefertigt, um einerseits Kenntnis über den aktuellen internationalen Stand der Untersuchungen des menschlichen Faktors zu erhalten, um andererseits die Schwerpunkte für diese Arbeit zu definieren. Obwohl unser Schwerpunkt auf der manuellen Ultraschallprüfung in Kernkraftwerken lag, können viele der ermittelten Fakten auch auf andere ZfP-Methoden angewandt werden. Folgende Projekte und Untersuchungsprogramme von international bekannten Institutionen, die auf dem Gebiet der ZfP arbeiten, wurden zusammen mit allgemeiner Literatur zum menschlichen Faktor recherchiert (für die detaillierte Beschreibung, siehe [1]):

Projekte:

- Programme for the Inspection of Steel Components, PISC (PISC 3) [29]
- Programme for the Assessment of NDT in Industry, PANI (PANI 3) [27][28]
- Network for Evaluating Structural Components, NESK (NESK 3) [52]

Arbeit von Instituten:

- U.S. Nuclear Regulatory Commission, NRC [37][16]
- Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI [4][5][3][2][21][53][45]

- Electric Power Research Institute, EPRI [46][13][12][14]
- Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety, STUK [24][25][35]
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Germany [9][32][30][31]
- Nondestructive Examination Training and Certification Facility, NDEF (Ukraine) [22][23]

### 1.2.2 PISC-Projekt

Das aufwändigste Projekt zur Untersuchung des menschlichen Faktors im Kernkraftwerksbereich, das zu Beginn dieser Untersuchung vorlag, war das PISC-Projekt. Teil 7 des PISC 3 Programms [29] mit dem Titel “Human Reliability in Inspection” (‘Zuverlässigkeit des Menschen bei Inspektionen’) untersuchte hauptsächlich den Einfluss von Umwelt und Prüfbedingungen auf das Fehlerauffindvermögen eines Prüfers.

Eine Serie von psychologischen Verfahren wurde verwendet, um den mentalen Zustand, das Temperament, die Persönlichkeit und den physischen Zustand (Sehvermögen) sowie weiterer Fähigkeiten, die notwendig für die Prüfaufgaben sind (z. B. Rechentest, räumliches Vorstellungsvermögen) zu beurteilen. Verschiedene Fragebögen wurden erstellt, um die Ziele des Prüfers, seine Interessen und seine Einstellung zur Arbeit, seine Qualifikationen sowie seine Erfahrung einzuschätzen. Um den Grad der Ermüdung festzustellen, wurden physiologische Messungen durchgeführt (EKG, Pulsfrequenz und Körpertemperatur). Zwei unterschiedliche Umgebungsbedingungen (STUDIO und TEL) wurden erstellt, um den Unterschied zwischen günstigen und ungünstigen Arbeitsbedingungen zu messen (siehe Tab. 1).

**Tab. 1. Vergleich der Arbeitsbedingungen in STUDIO und TEL.**

BEDINGUNG	STUDIO	TEL
Dauer der Schicht	8h	12h
Zeitpunkt der Schicht	08:30 – 16:30 Uhr	08:30 – 20:30 Uhr
Pause	2 x 1 Stunde; 2 x 15 Minuten	1 x 1 Stunde; 1 x 45 Minuten; 2 x 15 Minuten
Anzahl der Arbeitstage	5	11
Anzahl der Ruhetage	0	1
Temperatur (°C)	18-23°C	25-27°C
Feuchtigkeit (%)	Umgebungsfeuchtigkeit	40-50%
Geräuschpegel (dB)	-	80 dB

Die Beobachtungen aus der Studie betonen die Bedeutung von Müdigkeit und Demotivierung, die durch lange Arbeitszeiten hervorgerufen werden, für die menschliche Zuverlässigkeit in der ZfP sowie für ein Absinken der Prüferleistung mit fortschreitender Prüfdauer. Fehler in der Dokumentation der Prüfdaten wurden vermutlich durch die Ausrüstung hervorgerufen. Unterschiede im Auffindvermögen traten aufgrund der Unterschiede in den technischen Fähigkeiten, einem

Konzentrationsverlust und einem Rückgang der Aufmerksamkeit aufgrund von Müdigkeit auf.

Vermutlich wurden aufgrund der geringen Anzahl an Prüfern (N = 6) keine statistischen Analysen durchgeführt (es gibt keine entsprechenden Daten in dem Bericht). Daher fehlt die Information, ob die Ergebnisse der Untersuchungen statistisch signifikant sind. Das heißt, dass keine gültigen Rückschlüsse aus den Ergebnissen gezogen werden können.

PISC 3 wurde für seine angewandte Methodik kritisiert (z. B. für das Abbrechen von Messungen während des Experiments). Dadurch wurden die mögliche Bedeutung und der Nutzen der Studie relativiert. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass Umgebungsbedingungen und andere Faktoren nicht einzeln untersucht wurden. Daher kann der Einfluss einzelner Faktoren sowie deren Zusammenspiel nicht separat beurteilt werden. Es wird empfohlen, ein Forschungsprojekt zu erstellen, das die separate Variation dieser Variablen ermöglicht. Die Temperaturunterschiede bei PISC 3 waren nicht groß genug, um signifikante Unterschiede in der Prüfleistung hervorzurufen. Echeverria et. al. (1991; in [37]) haben bei der Analyse von mehr als 600 Studien herausgefunden, dass Leistungsschwankungen ab einer Temperatur von 30 – 33°C auftreten. Ein Lärmpegel von 80 dB, wie er während der PISC 3 Studien vorherrschte, verringert die Leistung hauptsächlich bei lang andauernden Tätigkeiten. Ansonsten kann Lärm, abhängig von vielen weiteren Faktoren, die Leistung sowohl verbessern als auch verschlechtern (Grandjean, 1985; in [37]).

### 1.2.3 Die wichtigsten Resultate anderer Studien

Die in der existierenden Literatur behandelten Themen können in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: Forschung zu den **persönlichen Eigenschaften des Personals (Personalcharakteristik)** (Fähigkeiten, Entscheidungsfindung, Charakter, usw.) und Wege diese so zu nutzen, dass die Leistung verbessert wird sowie Forschung zum Einfluss der **Umweltfaktoren** (Arbeitsbedingungen, Organisation, etc.) auf die Prüfleistung des Personals.

#### *Personalcharakteristik*

Verschiedene Studien fokussierten auf die Fähigkeiten und Charakterunterschiede als Hauptindikatoren der variierenden Leistung. EPRI führte zwei Verfahren ein:

- VNDE (computerbasiertes Trainingssystem in einer virtuellen Umgebung), das auf das Training zur Datenauswertung ausgerichtet ist und den Prüfer in die Lage versetzt Ultraschallprüfungen zu trainieren und bezüglich ihrer Prüfungsfähigkeiten getestet zu werden; und
- DIAT (Dynamic Inspection Aptitude Test).

Diese Verfahren wurden entwickelt, um den Erfolg in der Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren, die die kombinierte Fähigkeit von

- allgemeiner Denkfähigkeit (Fähigkeit zu lernen, Anweisungen zu verstehen und Probleme zu lösen),
- abstraktem Denken (Fähigkeit, ein zugrunde liegendes Prinzip oder logisches Muster zu erkennen, dieses anzuwenden, um Beziehungen zu verstehen),
- räumlicher Vorstellungskraft (die Fähigkeit, sich Prüfungen im Dreidimensionalen vorstellen zu können) und

- Mustererkennung und Stressresistenz

vorherzubestimmen. Gemäß EPRI ist der DIAT überwiegend für die Auswahl von Auszubildenden geeignet, nicht jedoch für die Einschätzung qualifizierter oder erfahrener Prüfer.

In den Studien des EPRI wurden Informationsverarbeitung und Entscheidungsfindung fokussiert, sowie die Möglichkeit, diese bei der Prüfung zu verbessern. Harris [12][13] identifizierte Informationsverarbeitungsstrategien, die die Prüfleistung verbessern können. Wenn diese wohldefinierten Strategien in Form von Checklisten vorgelegt wurden, zeigten die Prüfer eine 25% höhere Prüfleistung [14].

Die PANI-3-Studie ergab, dass die Leistungen des Personals zu ihren Werten auf einer Fähigkeitsskala und auf zwei Charakterskalen in Beziehung standen. Eine bessere Personalleistung war verbunden:

- mit einer höheren Punktzahl im Test zur mechanischen Auffassungsgabe (Verständnis der mechanischen Basisprinzipien),
- mit niedrigen Punktzahlen auf den Charakterskalen, die einfaches Denken messen (der Grad mit dem ein Individuum dazu tendiert, intellektuell eigensinnig zu sein oder das Ausmaß, inwieweit es nicht mag, an schwierigen oder komplizierten Problemen zu arbeiten) und
- mit Umsichtigkeit (der Grad mit dem ein Individuum die Dinge betrachtet, bevor es eine Entscheidung trifft, Chancen ergreift oder Risiken eingeht).

Die Beziehung zwischen dieser Fähigkeit und den Persönlichkeitsskalen und der Ultraschallprüfleistung war größer als die, die zwischen der Ultraschallprüfleistung und der Anzahl der Erfahrungsjahre eines Prüfers im Ausführen von Ultraschallhandprüfungen gefunden wurde [28].

Das PANI-3-Team hält die Befähigungs- und Persönlichkeitstests geeignet für die Auswahl neuer Nachwuchskräfte, für das "Zuschneiden" von Trainingskursen, um den spezifischen individuellen Bedürfnissen für die Ausbildung der Prüfer gerecht zu werden und um die Entwicklung von angemessen detaillierten Prüfanweisungen.

### *Umweltfaktoren*

Die Zuverlässigkeit eines ZfP-Systems wird von der Eignung der Geräte und der Prüfanweisung sowie der Qualifikation des Personals bestimmt. Jedoch sind bei der Arbeit in einem Kernkraftwerk noch eine Reihe weiterer Arbeitsbedingungen vorhanden, die im Rahmen dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden konnten. Lärm, Hitze, Zeitdruck, schlechte Vorbereitungen, Bürokratie und nicht zuletzt Strahlenbelastung sind Beispiele für solche Faktoren.

Eine NRC Studie von 1983 [51] liefert eine umfangreiche Liste der sogenannten leistungsformenden Faktoren (Performance Shaping Factors, PSF), die die Zuverlässigkeit der ZfP beeinflussen. Harris [3] benennt sechs davon als die wichtigsten für die wiederkehrende Ultraschallprüfung: Umgebungsbedingungen, Schutzkleidung, Zeitstress, Organisationsstruktur, Wissen und Fertigkeiten, persönliche Arbeitsgewohnheiten und Einstellungen.

Es existieren nicht viele Studien über den Einfluss der Arbeitsbedingungen auf die Prüfleistung in einem KKW. Enkvist, Edland und Svenson [5] führten eine Studie

über die Effekte von Zeitdruck und Lärm auf die ZfP durch. Diese ergab jedoch einander widersprechende Ergebnisse, da die so genannte „Stress-Bedingung“ (hoher Zeitdruck und großer Lärm) mit der Reihenfolge der Ausführungen von zwei Bedingungen (Stress-Bedingung gegenüber der Bedingung ohne Stress) konfundiert war.

Die Literatur im Gebiet Arbeitspsychologie und Ergonomie bietet jedoch ein breites Wissen über die Basiseffekte von Lärm und Zeitdruck sowie der Temperatur auf das menschliche Leistungsvermögen an.

**Lärm:** In der Forschung über die Beeinträchtigung der Leistung durch Lärm gab es widersprüchliche Resultate (siehe [11]). Lärm bei zumutbaren Pegeln (bis zu ungefähr 70 dBA) hat keinen direkten Einfluss auf nicht-hörgebundene Aufgaben. Lärm stellt jedoch eine zusätzliche kognitive Belastung bei der Leistung von vielen Aufgaben dar. Irrelevante Sprache oder anderer plötzlicher Lärm kann die Konzentration stören. Ununterbrochener Lärm kann Ermüdung verursachen und die Aufmerksamkeit reduzieren. Bei komplexen Aufgaben wie der manuellen Ultraschallprüfung ist jedoch mit einem leistungsmindernden Effekt von Lärm über die gestörte Konzentration und über die Aufmerksamkeitsreduktion zu rechnen.

**Hitze:** Viele wiederkehrende Prüfungen mit Ultraschall finden in einer Umgebung mit erhöhter Temperatur und hoher Luftfeuchtigkeit statt (Spanner et.al.1986 in [37]). Beeinträchtigungen der Wachsamkeit beginnen bei Temperaturen ab 30 bis 33°C (Echeverria et.al, 1991 in [37]).

Die Prüfer müssen üblicherweise Schutzkleidung und Masken tragen, wobei diese zusätzlich zur Wärmebelastung beitragen (Spanner et.al. 1986 in [37]). Die Auswirkungen von Hitze können durch zusätzliche Faktoren wie Tragen der Schutzkleidung, Lärm oder schlechte Beleuchtung erhöht werden (Echeverria et.al, 1991 in [37]).

Wenn man den Einfluss der Hitzeexposition untersucht, sollten der Grad der physischen Aktivität und die geforderte Schutzkleidung genauso berücksichtigt werden wie Temperatur und Feuchtigkeit (NUREG-0700, Rev.1 in [37]).

**Zeitdruck:** Zeitdruck tritt auf, wenn für die Ausführung einer Aufgabe weniger Zeit zur Verfügung steht, als normalerweise für diese Aufgabe erforderlich ist. Es wird angenommen, dass eine Verkürzung der Zeit affektive Veränderungen durch einen allgemein erhöhten Erregungszustand hervorruft (Maule and Svenson, 1993 in [5]). Mit zunehmendem Zeitdruck kann eine Stressreaktion auftreten.

Es wurde gezeigt, dass Zeitdruck und damit Stress die Urteilsfähigkeit und Entscheidungsfähigkeit beeinflussen. Zeitdruck erzeugt oft eine schlechte Aufgabenerfüllung durch Anwendung unzureichender kognitiver Strategien bei Situationen der Beurteilung und der Entscheidungsfindung (Edland & Svenson, 1993; Maule and Hockey, 1993 in [43];[50]).

Im Rahmen eines Projektes [26], bei dem über 900 Beschäftigte der Metallindustrie untersucht wurden, wurde gezeigt, dass starker Zeitdruck am Arbeitsplatz zu unterschiedlichen psychischen Befindensbeeinträchtigungen führt. Bei hohem

Zeitdruck war der Anteil von Probanden mit Befindensstörungen wie erhöhter Gereiztheit oder psychosomatischen Beschwerden etwa dreimal so hoch wie in einer Vergleichsgruppe mit niedrigem Zeitdruck (Rummel et.al. 1983 in [26]).

In der ZfP kann der Prüfer den Zeitdruck dadurch steuern, dass er entweder den Denkprozess beschleunigt (so dass mehr Information in der gleichen Zeit verarbeitet werden kann) oder dass er verringerte Anforderungen an die Leistung (durch Nichtbeachtung oder Ignorieren der weniger wichtigen Information) stellt (Miller, 1960 in [5]). Es ist anzunehmen, dass dieses Verhalten entweder bei der Beschleunigung des Denkprozesses zu einem Informationsüberlauf oder zum Übersehen relevanter Informationen führen kann. Starker Zeitdruck führt oft zu qualitativ schlechten Entscheidungen, da die Entscheidung auf nur einem Teil der verfügbaren Information basiert. Zeitdruck gilt als eine der Hauptkomponenten der Arbeitsbelastung (Derrich, 1988; in [50]).

Ein für den Prüfer optimaler Prüfprozess ist ein solcher, bei dem unter anderem angemessene Zeit für die Prüfung zur Verfügung steht. Das erlaubt dem Prüfer sich auf die Ausführung seiner Prüfung zu konzentrieren. [28]

**Organisation:** Es gibt fast keine Belege für organisationale Einflüsse bei der ZfP. Kettunen und Norros [25] gehen davon aus, dass die Zuverlässigkeit der ZfP von verschiedenen menschlichen und organisationalen Faktoren abhängt, obwohl keine Studie bisher den Einfluss dieser Faktoren auf die ZfP-Leistungsschwankungen nachweisen konnte [24].

**Stress:** Die oben genannten Faktoren könnten alle einen Einfluss auf Stress haben. Empfinden von Stress ist individuell und zu einem hohen Grad von der Situation, in der sich das Individuum befindet, abhängig (umgebungsbedingt und psychosozial). Das heißt, ein Individuum kann in einer Situation Stress empfinden, in der ein anderes keinen empfindet. Auch kann das gleiche Individuum auf den gleichen Stressfaktor zu unterschiedlichen Zeitpunkten unterschiedlich reagieren (Trumbull & Apley, 1986 in [2]). Nach dem Gesetz von Yerkes & Dodson von 1908 [55], ist die Leistung am besten, wenn die Erregung (Stress) weder zu hoch, noch zu niedrig ist (Abb. 2). Die Leistung wird also als eine umgekehrte U-Funktion dargestellt.

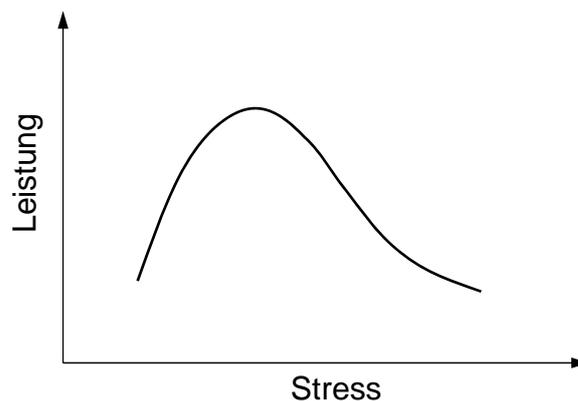


Abb. 2. Leistung in Abhängigkeit von Stress in Anlehnung an Yerkes & Dodson (1908).

### 1.3 Prozessmodell

Als Ergebnis der Literaturstudie und auf Basis des sozio-technischen Systemansatzes (STSA) wurde ein Untersuchungsmodell konzipiert (Abb. 3). Das Modell beschreibt die hypothetischen Zusammenhänge, um die Schwankungen in der Prüfleistung bei zerstörungsfreien Prüfungen – hier der Ultraschall-Handprüfung – durch die Einflüsse des menschlichen Faktors zu erklären. Der STSA wurde bereits in den 1950er Jahren vom Tavistock Institute of Human Relations (London) entwickelt. Die Grundannahme des STSA ist, dass jegliche Organisation und jedes Arbeitssystem sowohl aus einem technischen Subsystem (Technologie und Aufgabe) als auch aus einem sozialen Subsystem (Rollen, Strukturen, Mitglieder) besteht. Optimale Ergebnisse (Leistung, Produktivität, Sicherheit, Output-Qualität, etc.) sind nur bei der gemeinsamen, auf einander abgestimmten Optimierung beider Subsysteme zu erwarten. Auf der Grundlage dieser Theorie soll unser Modell Prüfleistungen erklären.

In dem Modell werden vier Sätze von Variablen unterschieden:

- Einflussvariablen,
- Ausgangsvariablen,
- Einfluss-Ausgangsvariablen<sup>1</sup> und
- Moderatorvariablen<sup>2</sup>.

Die folgenden Variablen sind die Einflussvariablen und stellen die individuellen Merkmale eines Prüfers dar. Sie bedingen die Vielfalt der Unterschiede zwischen Prüfern und beeinflussen die Prüfleistung:

- **Visuelle Wahrnehmung** (Individuelles Vorgehen, wie mithilfe zielgerichteter Aufmerksamkeit visuelle Zielgrößen vor einem ablenkenden Hintergrund identifiziert werden),
- **Stressresistenz** (Fähigkeit eines Individuums in Anwesenheit von Stressoren Leistungsstandards einzuhalten),
- **Kognitive Prozesse** (Individuelles Vorgehen bei Informationssuche, Entscheidungsfindung und Problemlösen)
- vorgängige **Erfahrung und Qualifizierung**, und
- **Sozialer Kontext** (bzw. soziales Feedback; Informationsrückkoppelung durch Vorgesetzte oder Kollegen).

---

<sup>1</sup> Dieser Typ von Variablen spielt sowohl als Einfluss- als auch als Ausgangsvariable eine Rolle

<sup>2</sup> Eine Moderator(Mittler-)variable ist eine qualitative oder quantitative Variable, die die Richtung oder die Stärke der Beziehung zwischen der unabhängigen oder Prädiktorvariablen und einer abhängigen oder Kriteriumsvariablen beeinflusst.

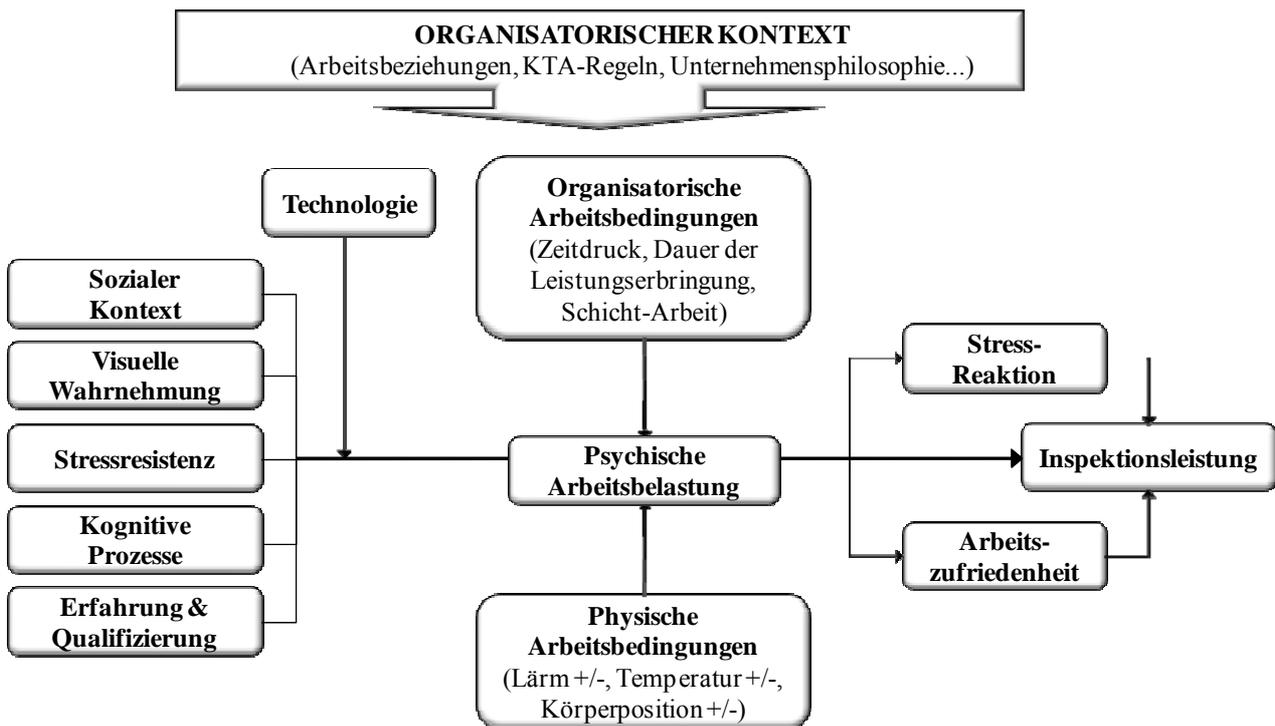


Abb. 3. Model der Einflüsse auf die Leistung der UT-Handprüfung.

Die **organisatorischen** (z.B. Zeitdruck, Dauer der Leistungserbringung, unterschiedliche Schichten (Tag/Nacht)) und die **physischen Arbeitsbedingungen** (Lärm, Temperatur, Strahlung, Körperposition, usw.) zusammen mit der **Technologie** (Einfluss der Art der angewendeten Ultraschall-Prüftechnik) werden ebenfalls als Einflussvariablen betrachtet. Diese Variablen wird ein moderierender Einfluss auf den ursächlichen Wirkfluss von Einflussvariablen (visuelle Wahrnehmung, etc.) auf die Ausgangsvariable Prüfleistung zugeschrieben. Zum Beispiel wird eine Person, die eine niedrige Stressresistenz hat, schlechtere Prüfergebnisse unter Stressbedingungen erzielen. Somit handelt es sich hier also um Moderatorvariablen. Im Gegensatz zu den persönlichen Merkmalen der Prüfer können diese moderierenden Bedingungen gezielt variiert werden. Als Ergebnis dieser Variation wird daher auch eine Veränderung in der Prüfleistung erwartet.

Die erste Einfluss-Ausgangsvariable des Modells ist die **psychische Arbeitsbelastung**. Sie wird als die Belastung definiert, die ein Arbeiter auf sich nimmt, um ein bestimmtes Niveau von Leistung zu erreichen [15]. Hierbei wird angenommen, dass die Arbeitsbedingungen bestimmte Belastungen auf die Arbeitsaufgabe erzeugen, die dann die Leistung negativ beeinflussen. Die beste Leistung tritt bei einem vernünftigen Ausmaß psychischer Arbeitsbelastung auf. Wenn die psychische Arbeitsbelastung zunimmt, kann eine Person sich unter Stress gesetzt fühlen und mit schlechter Arbeitsleistung reagieren. Bei zufriedenstellenden Bedingungen dagegen ist die psychische Arbeitsbelastung gering und die Person ist zufrieden und arbeitet optimal.

**Prüfleistung**, individuelle **Reaktionen auf Stress** (Stress als die Reaktion auf die Anforderungen der Umgebung, die höher zu sein scheinen als die Person mit den ihr zur Verfügung stehenden Ressourcen bewältigen kann [2]) und **Arbeitszufriedenheit**

sind die Ausgangsvariablen. Die beiden letzten können ebenfalls die Leistung beeinflussen.

Reaktionen auf Stress und Arbeitszufriedenheit werden sowohl als Ergebnis- als auch als Ausgangsvariablen betrachtet. Sie können als Ergebnis eines Moderatoreffekts der Arbeitsbedingungen und der Technologie auf die Beziehung von Einfluss- und Ergebnisvariablen auftreten. So können z. B. ungünstige Arbeitsbedingungen direkt die Arbeitszufriedenheit mindern und eine Stressreaktion hervorrufen. Umgekehrt können gute Arbeitsbedingungen direkt zur Arbeitszufriedenheit beitragen und Stressreaktionen mindern. Im letzteren Fall zählen Arbeitsbedingungen und Stressreaktionen zu Ausgangsvariablen.

Der Moderatoreffekt von Arbeitsbedingungen und der Technologie kann neben den beschriebenen direkten Einflüssen auch indirekte Wirkungen auf die Leistung haben, indem er diese indirekt über Stressreaktionen und Arbeitszufriedenheit beeinflusst. So können z. B. ungünstige Arbeitsbedingungen Stressreaktionen hervorrufen und die Arbeitszufriedenheit beeinträchtigen, was wiederum die Leistung beeinflusst.

Das gesamte Modell ist außerdem hochgradig vom jeweiligen **organisatorischen Kontext** eines Kernkraftwerks, den dort vorhandenen Prozeduren, seinem Management und den bestehenden Arbeitsbeziehungen abhängig.

## 1.4 Aktualisierte Zielstellung

Die eingangs aus dem Angebot zitierte übergeordnete Zielstellung, eine für Deutschland gültige Aussage zum Einfluss des Prüfers auf das Prüfergebnis zu machen und die relevanten Faktoren zu finden, die zu einer Minimierung dieses Einflusses beitragen können, wurde nach den Erkenntnissen der Literaturstudie und dem Aufstellen des Prozessmodells für die Ultraschallhandprüfung weiter konkretisiert.

Hierfür wurden außer den genannten Quellen die praktischen Erfahrungen der beiden TÜV herangezogen.

Im PISC-3-Projekt wurde eine zu große Zahl von Arbeitsbedingungen bei einer zu geringen Stichprobengröße gleichzeitig variiert. Der Versuchsplan erlaubte keine statistische Analyse. Da in diesen Untersuchungen keine konkreten Schlussfolgerungen darüber, was tatsächlich die Prüfleistung beeinflusst, gezogen werden konnten, orientierte sich das Projekt SR 2514 von vorn herein nur auf wenige äußere Arbeitsbedingungen. Im Prozessmodell gemäß Abb. 3 wurde der Zeitdruck von den organisatorischen und die Temperatur von den physischen Arbeitsbedingungen ausgewählt, wie es auch vom TÜV als vordringlich ausgewiesen wurde. Der Faktor „Technologie“ wurde dadurch kontrolliert, dass nach KTA-Regelwerk geprüft wurde und die konkrete UT-Prüftechnik für jeden Prüfbereich in der Prüfanweisung festgelegt wurde.

Weiter unten wird beschrieben wie nun die Einflussvariablen, die jedes Individuum charakterisieren und seine Reaktion auf die Stressbedingungen beschreiben, gemessen wurden.

Um das für die Experimente zur Verfügung stehende Budget im Sinne einer statistisch belastbaren Aussage optimal auszunutzen, wurde eine Gewichtung zugunsten der manuellen Ultraschallprüfung vorgenommen, da die mechanisierte doppelt so teuer

ist. Für die mechanisierte Ultraschallprüfung wurde beschlossen, nur einen Paralleltest durchzuführen, um die Methodologie für spätere Untersuchungen vorzubereiten. Dagegen wurde für die manuelle Prüfung eine profunde Versuchsplanung eingesetzt, bei der je zwei Stufen von Zeit- und Temperaturbelastung vorgesehen waren.

Es ist bekannt, dass nur bei Temperaturen höher als 33°C ein Einfluss auf die Leistung zu erwarten ist. Somit führte die MPA unterschiedliche Aufheizversuche am Großbehälter mit dieser Zielstellung durch, aber keiner ergab stabil das gewünschte Resultat. Deshalb wurde die Zahl der variierten Arbeitsbedingungen auf Zeitdruck reduziert.

Die Untersuchungsergebnisse sollten dazu dienen, Methoden zur Reduzierung des menschlichen Einflusses zu entwickeln und diese im Regelwerk zu verankern. Daher wurden der Zeitdruck, die Prüferfahrung und die organisatorischen Randbedingungen sowie weitere Variable untersucht.

Schon hier wurde klar, dass die für die Aufgabe zu entwickelnde Methodik der statistischen Versuchsplanung, der psychologischen Erhebung und der statistischen Auswertung über das Projekt hinaus von Wert sein können und dass die Zielstellung, alle relevanten Einflussgrößen statistisch belastbar zu erfassen, wegen der hohen Komplexität in mehreren Projektphasen bearbeitet werden muss.

Im folgenden Abschnitt wird die entwickelte Methode und Versuchsdurchführung eingehender erläutert, bevor die Ergebnisse vorgestellt und ihre Trendaussagen diskutiert werden.

## 2 Methode und Versuchsdurchführung

### 2.1 Probanden

Zehn erfahrene Ultraschall-Handprüfer haben an der Studie zum menschlichen Einfluss teilgenommen. Alle Prüfer waren männlich mit einem Durchschnittsalter von 47,9 Jahren (Standardabweichung 8,6). Die durchschnittliche Erfahrung der Probanden betrug:

- a) 21,4 Jahre in der zerstörungsfreien Prüfung (im Intervall von 3 bis 35);
- b) 14,3 Jahre in Ultraschallprüfung (UT) (im Intervall von 2 bis 28); und
- c) 11,5 Jahre in Ultraschallprüfung in kerntechnischen Anlagen (im Intervall von 2 bis 22).

In der mechanisierten Prüfung haben zwei Prüfteams teilgenommen: das Erste mit drei und das Zweite mit zwei Mitgliedern.

Die vollständige Liste von beteiligten Firmen ist in Tab. 2 zu finden.

**Tab. 2. Übersicht der beteiligten Firmen.**

	Zahl der Handprüfer	Zahl der Teammitglieder mechanisierte Prüfung	Aufsicht
<b>TÜV Nord</b>	4		2
<b>TÜV Süd</b>	4		1
<b>Applus</b>	1		
<b>Blohm &amp; Voss</b>	1		
<b>IZFP</b>		2	
<b>BAM</b>		3	1
<b>MPA</b>			2

### 2.2 Modell zum menschlichen Einfluss

Nach dem Erstellen des theoretischen Modells, das den menschlichen Einfluss bei der wiederkehrenden Prüfung beschreibt (siehe Kapitel 1.3), muss dieses experimentell auf seine Gültigkeit hin überprüft werden, damit es zuverlässig dazu verwendet werden kann, die in der aktuellen Zielstellung angegebenen Einflüsse aufzuzeigen. In diesem Projekt konnte nur ein Ausschnitt des Modells mit dem Fokus auf Stressfaktoren getestet werden. Abb. 4 zeigt die Variablen, die für dieses Experiment ausgewählt wurden sowie deren angenommene Beziehungen zueinander.

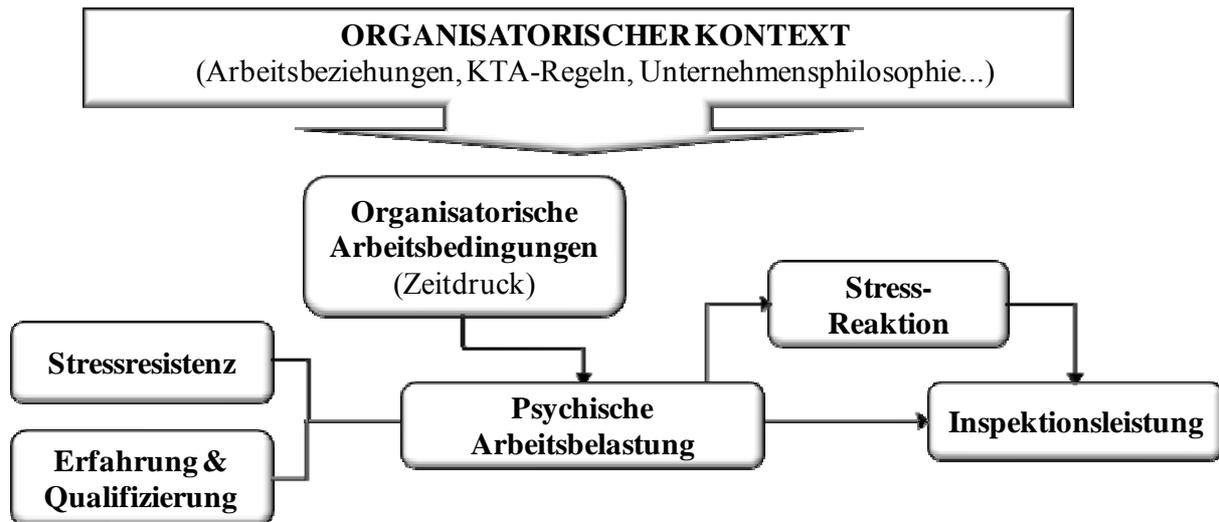


Abb. 4. Modell zum menschlichen Einfluss – untersuchte Variablen und deren Beziehungen zueinander.

### 2.3 Erhebungsinstrumente

Um die Variablen in Abb. 4 und deren Einfluss auf die Prüfleistung zu untersuchen, wurde ein Satz von psychologischen Erhebungsinstrumenten (Tests und Fragebögen) ausgewählt. Abb. 5 zeigt die graphische Darstellung der Erhebungsinstrumente, die verwendet wurden, um die Variablen in Abb. 4 zu bestimmen.

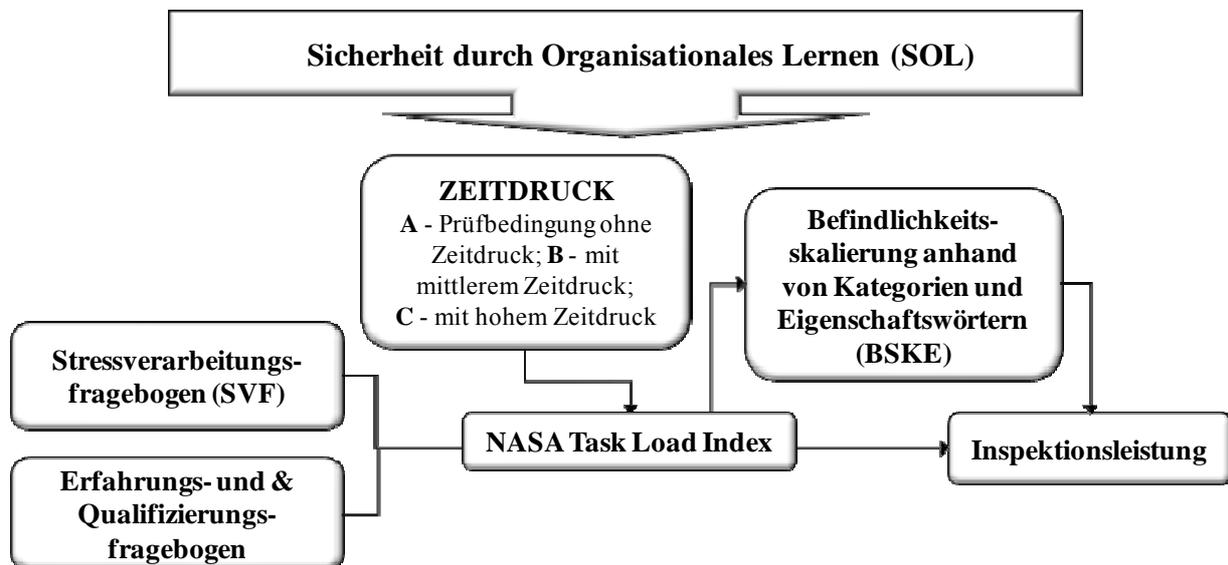


Abb. 5. Ausgewählte psychologische Erhebungsinstrumente, um die durch das Modell zum menschlichen Einfluss vorgeschlagenen Einflüsse zu untersuchen.

### 2.3.1 Erfahrung und Qualifikation

Eine Expertengruppe der Projektpartner im Bereich zerstörungsfreier Prüfung und Ultraschallprüfung hat einen Fragebogen entworfen, der Fragen zur allgemeinen Erfahrung, Qualifikation, persönlichem Hintergrund (Alter, Erziehung usw.) und spezifischer Erfahrung in verschiedenen Techniken (manuelle und mechanisierte Prüfung, andere Prüfverfahren usw.) der Prüfer enthält sowie zum Industriesektor, in dem diese beschäftigt sind.

### 2.3.2 Stressresistenz

Die Fähigkeit von Personen, Stress zu widerstehen kann durch deren Strategien mit Stress umzugehen definiert werden. Der „Stressverarbeitungsfragebogen“ (SVF) von Janke und Ermann [19] ist ein mehrdimensionales Selbstbeobachtungsinventar zur Erfassung der individuellen Tendenz, unter Belastung verschiedene Stressverarbeitungsweisen einzusetzen. Die Normalform SVF120 enthält 120 Items. Aus Zeitgründen wurde eine kürzere Version des Tests mit 78 Items verwendet (SVF78). Die Items können zwei Bereichen zugeordnet werden, dem Bereich der *Positiv-Strategien* (z.B. Herunterspielen, Schuldabwehr, Ablenkung, Situationskontrolle usw.) und dem der *Negativ-Strategien* (z.B. Vermeidung, Flucht, gedankliche Weiterbeschäftigung, Selbstbeschuldigung usw.). Der Proband soll bei jedem Item entscheiden, *„wie wahrscheinlich die darin umschriebene Reaktionsweise seiner Art zu reagieren entspricht, wenn er durch irgendetwas oder irgend jemanden beeinträchtigt, innerlich erregt oder aus dem Gleichgewicht gebracht worden ist“* ([6], Seite 83). Jedes Item wird durch Ankreuzen einer Zahl auf einer 5-stufigen Skala beantwortet, die von „0 = gar nicht“ bis „4 = sehr wahrscheinlich“ reicht. Der endgültige Skalenwert wird durch Subtraktion des Skalenwertes der negativen Strategien von dem Skalenwert der positiven Strategien ( $SVF_{\text{tot}} = SVF_{\text{pos}} - SVF_{\text{neg}}$ ) bestimmt. (Höherer Skalenwert – höhere Stressresistenz und umgekehrt).

### 2.3.3 Psychische Arbeitsbelastung

Der „NASA Task Load Index“ (TLX) ist eine mehrdimensionale Skala zur subjektiven Beurteilung der wahrgenommenen psychischen Arbeitsbelastung während der Prüfaufgabe [15]. Die Skala enthält 6 Subskalen: *geistige Anforderungen*, *körperliche Anforderungen*, *zeitliche Anforderungen*, *eigene Leistung*, *eigene Anstrengung* und *Frustration*. Die Aufgabe der Probanden ist es, alle Items einer Skala von 1 bis 20 zu bewerten .

### 2.3.4 Stress-Reaktion

Stress kann sich durch negatives und positives Befinden ausdrücken. Um dieses Befinden zu identifizieren, wurde der Fragebogen „Befindlichkeitsskalierung anhand von Kategorien und Eigenschaftswörtern“ (BSKE) [20] verwendet. Ein *positives Befinden* beinhaltet Gefühle von Entspannung, Selbstsicherheit, Freude, gehobene Stimmung, Aktivität usw.. *Negatives Befinden* beinhaltet Gefühle von Erregtheit, Ängstlichkeit, Traurigkeit, Missstimmung, Energielosigkeit, Müdigkeit usw. Die vollständige Version des Fragebogens beinhaltet 30 Items (BSKE30) und wurde in seiner situationsbezogenen Form angewendet (bezogen auf die jeweilige Situation,

zum Beispiel die Prüfung unter Zeitdruck). Die Aufgabe der Probanden ist es, anhand vorgegebener Begriffe zu entscheiden, in welchem Ausmaß diese ihr Befinden während der vorausgegangenen Prüfphase beschreiben. Jedes Befinden wird durch zwei Adjektive beschrieben, die anhand einer 7-stufigen Skala (variierend von 0  $\triangleq$  gar nicht bis 6  $\triangleq$  sehr stark) bewertet werden. Der endgültige Skalenwert ( $BSKE_{tot}$ ) wird durch Subtraktion des Skalenwertes auf der Seite des *Positiven Befindens* von dem Skalenwert auf der Seite des *Negativen Befindens* bestimmt ( $BSKE_{tot} = BSKE_{neg} - BSKE_{pos}$ ) (höherer Skalenwert – höhere Stressreaktion und umgekehrt).

### 2.3.5 Organisatorische Faktoren

“Sicherheit durch Organisatorisches Lernen” (SOL), entwickelt von Wilpert & Fahlbruch [7] wurde verwendet, um organisatorische Faktoren zu identifizieren, die während des Experiments aufgetreten sein können und einen Einfluss auf die Testresultate hatten.

Diese Ereignisanalysemethode gründet auf der Annahme, dass die Organisation durch Betriebserfahrung lernt. Hierzu sollten alle organisatorischen Schwächen und verborgenen Fehler durch ständiges Überwachen und durch die systematische Analyse von Ereignissen, die als das Auftreten von unerwarteten, unerwünschten Systemzuständen mit oder ohne negative Konsequenzen definiert sind, identifiziert werden, um später angepasste Maßnahmen zur Verhinderung vergleichbarer Ereignisse zu ergreifen.

Grundlegende Schritte von SOL sind: Beschreibung der Situation, Identifikation von beitragenden Faktoren und das Berichten des Ereignisses. Für diese Untersuchung lag der Fokus auf der Identifikation von beitragenden Faktoren.

Die ursprüngliche Version des Verfahrens besteht aus 19 möglichen beitragenden Faktoren, deren Beschreibung, Fragen und einigen Beispielen. Der Teilnehmer sollte mit ja oder nein auf die ihm gestellten Fragen antworten, abhängig davon, ob die Situation auftrat oder nicht. Eine kürzere Version, die 15 mögliche Faktoren abfragte, wurde für dieses Experiment verwendet, mit Platz für die Kommentare der Prüfer.

## 2.4 Reflektoren und Prüfaufgaben

Im Rahmen des Forschungsvorhabens SR 2514 wurden Ultraschallprüfungen an verschiedenen Prüfstellen des Großbehälters der MPA Universität Stuttgart sowie an ausgewählten austenitischen Testkörpern mit Rissen vorgenommen. Abb. 6 zeigt die Draufsicht auf den Großbehälter der MPA Stuttgart.



Abb. 6. Großbehälter der MPA Stuttgart.

Die schematische Darstellung des Großbehälteraufbaus zeigt Abb. 7.

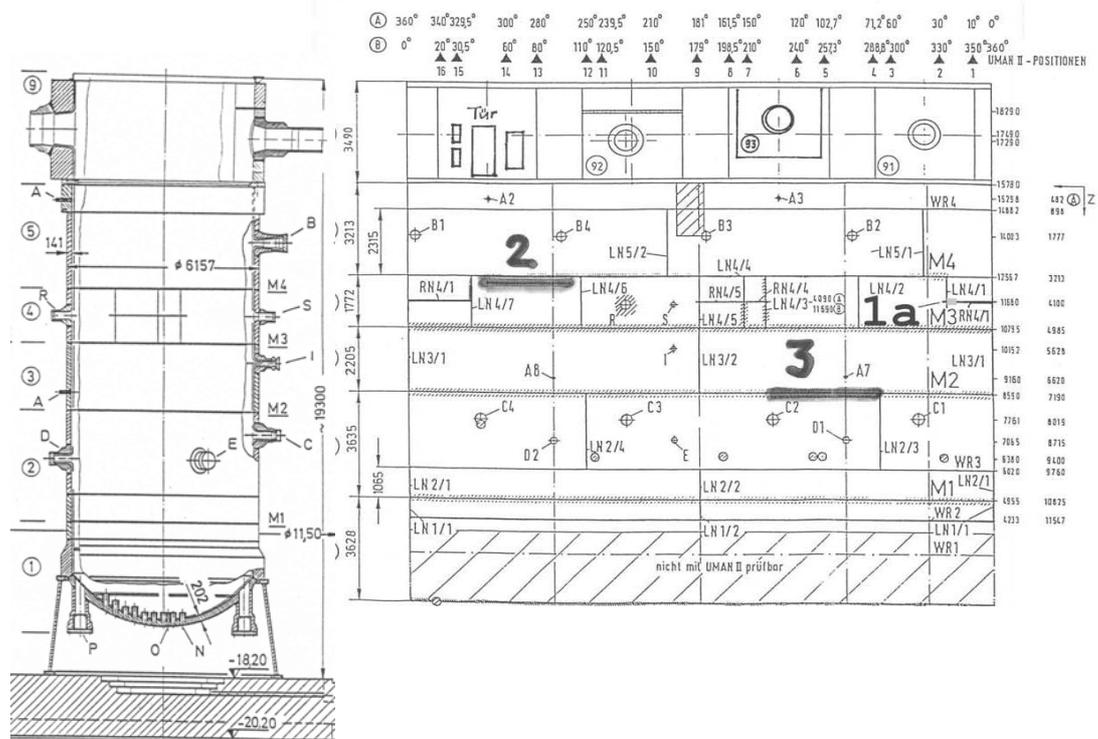


Abb. 7. Abwicklung des Großbehälters der MPA Stuttgart.

### 2.4.1 Prüfbereiche

Für die Prüfungen wurden vier verschiedene Prüfbereiche ausgewählt:

- a) Bereich 1a
- b) Bereich 2
- c) Bereich 3
- d) Austenitische Testkörper

Die Positionen der Prüfbereiche 1a, 2 und 3 sind in Abb. 7 ersichtlich. Die Prüfung der austenitischen Testkörper erfolgte ebenfalls im Bereich des Großbehälterschachts, um vergleichbare Prüfbedingungen zu erzeugen.

### 2.4.2 Reflektoren und Prüfköpfe

Bei den Reflektoren in den Bereichen 2, 3 und bei den austenitischen Testkörpern handelt es sich um Reflektoren, die von der der Prüffläche gegenüberliegenden Oberfläche ausgehen, im Bereich 1a handelt es sich um einen Reflektor im Volumen.

Als Registerschwelle im Bereich 1a wurde die Kreisschreibe 3 mm vorgegeben, als Prüfköpfe waren ein Transversalwellen-Winkelprüfkopf ET 45 Grad, 2 MHz und ein Transversalwellen-Winkelprüfkopf ET 60 Grad, ebenfalls 2 MHz, vorgegeben. Die Einschallung erfolgte vertikal von oben und unten auf einer Mantellinie (X = 336,7 Grad), es war keine Ausdehnung des Fehlers in X-Richtung zu ermitteln.

Die im Prüfbereich 2 enthaltenen Reflektoren zeigt Abb. 8.

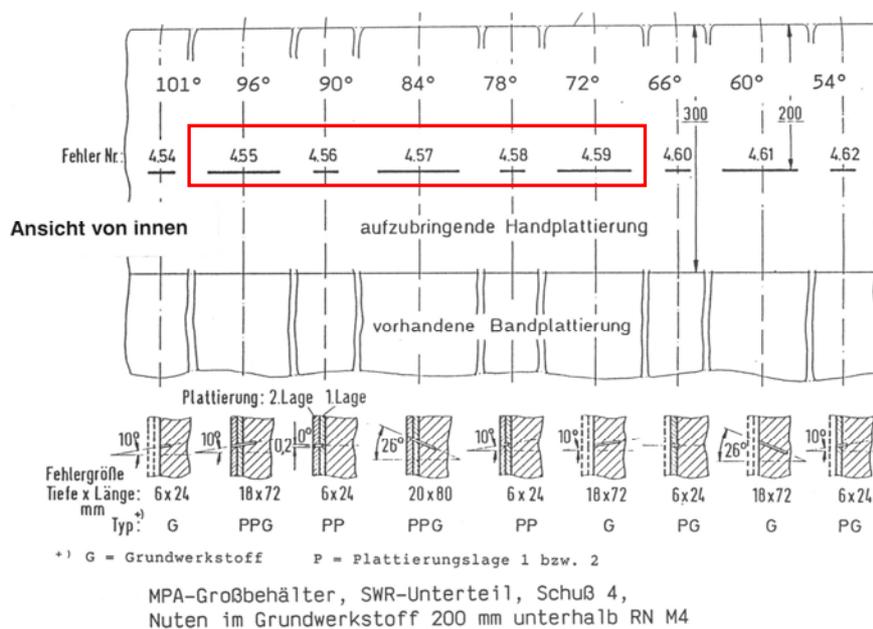


Abb. 8. Fehlerbereich 2 am MPA-Großbehälter.

Für die Prüfung im Prüfbereich 2 wurden die markierten Reflektoren 4.55, 4.56, 4.57, 4.58 und 4.59 ausgewählt. Details zu den Reflektoren im Prüfbereich 2 sind aus Tab.

3 ersichtlich. Bei den Reflektoren in Prüfbereich 2 handelt es sich jeweils um Nuten mit einer Spaltbreite von 0,2 mm.

**Tab. 3. Reflektorabmessungen und -lage in Prüfbereich 2.**

Fehler-Nr.	Umfangsposition X [Grad]	Höhenlage Y [mm]	Tiefenlage Z1 (von innen) [mm]	Tiefenlage Z2 (von innen) [mm]	Umfangslänge dX [mm]	offen	Bemerkungen
4.55	96	12.367	0	18	72	Ja	schräg 10°
4.56	90	12.367	0	6	24	Ja	
4.57	84	12.367	0	20	80	Ja	schräg 26°
4.58	78	12.367	0	6	24	Ja	schräg 10°
4.59	72	12.367	5	23	72	Nein	schräg 10° "UPR"

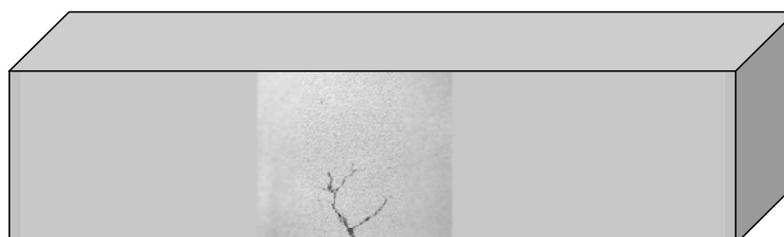
Im Prüfbereich 3 wurden die Reflektoren M 2.3, M 2.4 und M 2.8 vorgegeben, die Fehlerdetails sind aus Tab. 4 ersichtlich.

**Tab. 4. Reflektorlagen und -typen in Prüfbereich 3.**

Reflektor		Umfang X [Grad]	dX [mm]	Höhe Y [mm]	Z1 (von innen) [mm]	Z2 (von innen) [mm]
M 2.3	Heißriss	270	60	8.595	0	8
M 2.4	Schwingriss	264	46	8.595	0	20
M 2.8	Heißriss	236	60	8.595	4	8

Für die Prüfungen im Bereich 2 und 3 wurde als Registriergrenze die Nut 3 mm – 6 dB im Justierkörper JK3.8 vorgegeben. Als Prüfkopf wurde jeweils der Transversalwellen-Winkelprüfkopf ET 45 Grad, 2 MHz, vorgegeben. Die Transferkorrektur inklusive des Plattierungszuschlags musste am Großbehälter an einem vorgegebenen Bereich, siehe Anlage „Prüfanweisung“, in der Nähe des Prüfbereichs 2 ermittelt werden.

Bei den austenitischen Testkörpern handelt es sich jeweils um quaderförmige Testkörper mit einer Wanddicke von 32 mm für alle Testkörper, einer Breite von ca. 40 mm sowie einer Länge von etwa 350 mm. Der Reflektor befindet sich jeweils in Testkörpermitte. Beispielhaft zeigt Abb. 9 einen solchen Testkörper. Die Reflektoren waren bei den Prüfungen verdeckt.



**Abb. 9. Beispielhafte Abbildung eines austenitischen Testkörpers.**

Der Abbildung ist verzerrt, die Länge entspricht nicht den tatsächlichen Abmessungen von ca. 350 mm. Details zu den austenitischen Testkörpern sind Tab. 5 zu entnehmen.

Die Prüfung wurde mit 2 verschiedenen Transversalwellen-Miniaturwinkelprüfköpfen durchgeführt, mit einem 45 Grad, 2 MHz und einem 45 Grad, 4 MHz Prüfkopf.

**Tab. 5. Abmessungen der Reflektoren in den austenitischen Testkörpern.**

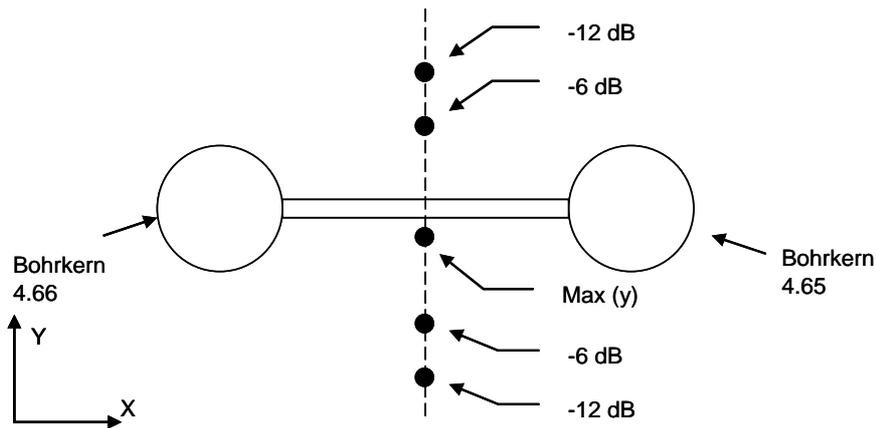
Prob e	Abmessungen		Werkstoff-Nr.	Typ	Reflektor				Y-Pos. [mm]
	Ymax Länge [mm]	Xmax Breite [mm]			Tiefe Z (von Gegenseite!)				
					(X = 0) links [mm]	(X = Xmax) rechts [mm]	Mittelwert [mm]	Toleranz [mm]	
P29	360	44	1.4305	IK-Riss	5 / 6	8 / 5	6	± 2	170
P30	360	44			6 / 7	5 / 5	5,75	± 1,25	179
P35	350	40			19	13	16	± 3	172
P36	320	40	1.4948		9 / 10	12 / 10	10,25	± 1,75	151
P37	319	40			17	10	13,5	± 3,5	150
P38	326	46			1,5	3,5	2,5	± 1	154
P39	326	41			4	3	3,5	± 0,5	155
P21	358	34	1.4401	K-Riss	24,5	23	23,75	± 0,75	168
				B-Nut	32	32	32	---	0
P28	358	38,5		S-Riss	7	8,5	7,75	± 0,75	167
P22	355	38		K-Nut	---	---	2	---	230
				B-Nut	10	10	10	---	125
P23	355	40		K-Nut	---	---	1,5	---	231
				K-Nut	---	---	3	---	125
P27	354	36		B-Nut	2	2	2	---	229
			B-Nut	4	4	4	---	125	

- Legende:**
- IK-Riss      Interkristalliner Spannungskorrosions-Riss
  - K-Riss      Kombinations-Riss (Schwingungs-Riss / Gewaltbruch)
  - S-Riss      Schwingungs-Riss (Ermüdungs-Riss)
  - B-Nut      Breite Nut (über volle Probenbreite in X-Richtung)
  - K-Nut      KTA-Nut (in Proben-Mitte, 20 mm Länge in X-Richtung)
  - 1.4305      X10CrNiS18-9
  - 1.4948      X6CrNi18-11
  - 1.4401      X5CrNiMo18-10

### 2.4.3 Prüfaufgaben

In allen Bereichen war die Aufgabe, die Position des Maximums der Amplitude des Ultraschallsignals in allen drei Richtungen (Längsrichtung, Querrichtung und Tiefe). Die Amplitude war auch dann zu protokollieren, wenn sie kleiner ist als die Registrierschwelle. Die Längenbestimmung der Anzeigen bei -6dB- und -12dB-Abfall der Amplitude wurde nur für die Signale verlangt, die größer oder gleich Registrierschwelle sind. Die Aufgaben für die einzelnen Bereiche unterschieden sich noch in einigen weiteren Einzelheiten, die auf den nächsten Seiten erläutert werden.

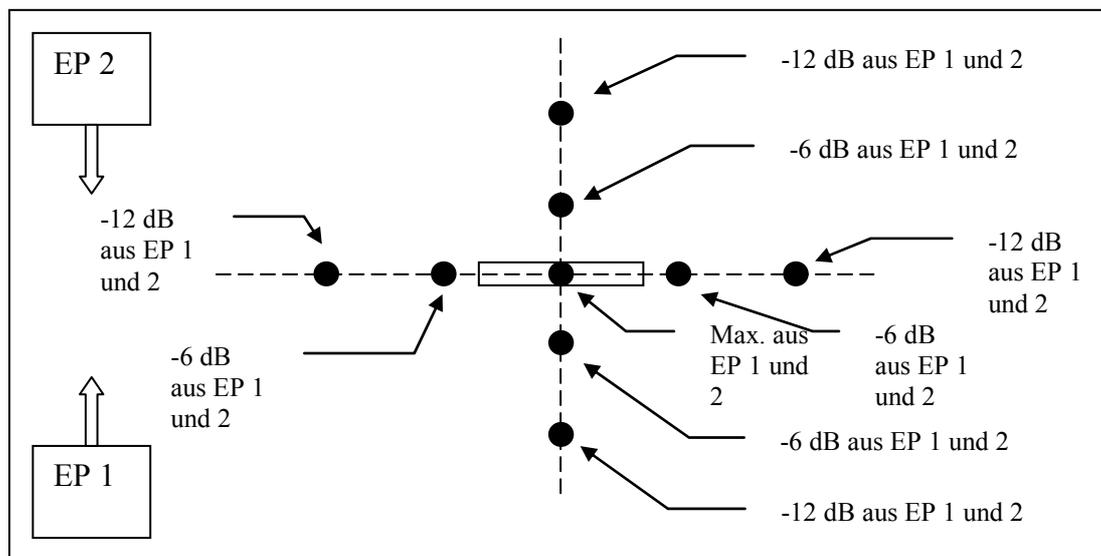
Die zu protokollierenden Werte für den Fehler in Bereich 1a sind aus Abb. 10 ersichtlich.



**Abb. 10. Zu protokollierende Werte (maximale Amplitude, Halbwertslänge und Viertelwertslänge) im Prüfbereich 1a.**

Vorgegeben war die Prüfung aus zwei Einschallpositionen, einmal in +Y- und einmal in -Y- Richtung. Es sollte zu allen Werten die Tiefenlage protokolliert werden, das heißt, der Fehler wurde in seiner Tiefenerstreckung anhand des 6-dB- und 12-dB-Abfalls vermessen.

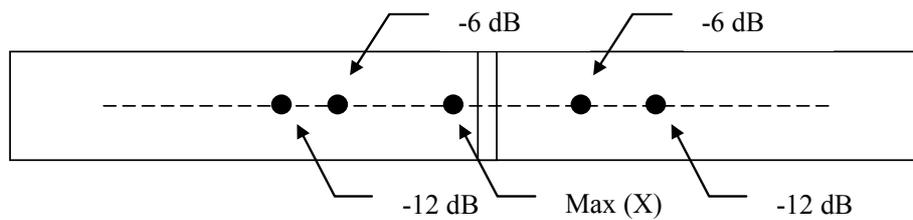
In den Fehlerbereichen 2 und 3 sollten folgende Werte gemäß Abb. 11 protokolliert werden.



**Abb. 11. Zu protokollierende Fehlerausdehnungen der Fehlerbereiche 2 und 3 (maximale Amplitude, Halbwertslänge und Viertelwertslänge).**

Für die Position des Maximums sollte die maximale Echohöhe über beziehungsweise unter der Registrierschwelle protokolliert werden, dazu die Reflektorlage (X- und Y-Koordinate gemäß vorgegebenem Koordinatensystem) sowie die Tiefenlage, gemessen von der äußeren Oberfläche (Ankoppelfläche). Bei registrierpflichtigen Anzeigen war die Fehlerausdehnung in X- und Y-Richtung mit Angabe des 6-dB und 12-dB-Abfalls (Halbwerts- und Viertelwertslänge) zu ermitteln.

Die zu protokollierenden Werte der austenitischen Testkörper sind Abb. 12 zu entnehmen. Die Amplitude war auch zu protokollieren.



**Abb. 12 . Zu protokollierende Werte der austenitischen Testkörper (maximale Amplitude, Halbwertslänge und Viertelwertslänge).**

### 2.4.4 Demonstrationsübung

Vor Beginn der Prüfung wurde eine einführende Übung durchgeführt, hier Demonstrationsübung genannt, um die Prüfer mit der Art der Prüfaufgabe sowie der Protokollierung vertraut zu machen.

Als Prüfstück diente ein Testkörper (TK2) mit einer 3 mm tiefen und 20 mm breiten Nut der MPA Stuttgart. Die Demonstrationsübung wurde jeweils unter Anleitung der Prüfaufsicht durchgeführt. Die Ergebnisse der Übung finden keinen Eingang in die Prüfstatistik.

## 2.5 Ultraschall-Handprüfung

### 2.5.1 Versuchsplan und Durchführung

Das Ziel des Versuchs war, den Einfluss von neun untersuchten Faktoren auf die Qualität der Prüfung auszuwerten. Die Qualität der Prüfung wurde mittels der Amplitude, der Halbwertslänge und deren Streuung sowie mittels der Streuung der weiteren drei Ausgangsvariablen erhoben, die die Position der Anzeige beschreiben. Kapitel 2.5.1 stellt den Versuchsplan und seine Durchführung vor. Eine Übersicht der untersuchten Ausgangsvariablen wird im Kapitel 2.5.2 in Tab. 9 vorgelegt, und die neun untersuchten Faktoren sind im Kapitel 2.5.3 Tab. 10 zu finden. Danach wird das Modell für die statistische Auswertung vorgestellt.

Das Hauptziel des Versuchsplans in diesem Projekt war, den Einfluss des Zeitdrucks auf mehrere Variablen zu ermitteln. Deswegen wurde die für die Prüfung vorgegebene Zeit variiert. Diese Variable wurde in diesem Bericht Prüfbedingung genannt:

- Prüfbedingung A – viel Zeit,
- Prüfbedingung B – mittlere Zeit,
- Prüfbedingung C – wenig Zeit.

Die Größen, die einen Einfluss auf die Testergebnisse haben, werden Einflussvariablen genannt, während diejenigen, die im Versuch kontrolliert und variiert werden, als Faktoren bezeichnet werden. „Prüfbedingung“ ist also ein Faktor in diesem Versuch.

Die Prüfungen konnten aus organisatorischen Gründen nicht gleichzeitig durchgeführt werden. Deswegen wurden die Handprüfer (im weiteren Text Prüfer) in mehrere

Prüfkampagnen eingeteilt. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht der fünf Prüfkampagnen für die Handprüfung, die im Rahmen des Projektes stattgefunden haben.

**Tab. 6. Übersicht der Prüfkampagnen mit Handprüfung.**

Prüfkampagne (2008)	Reihenfolge			Prüfer
	1	2	3	
März	A	B	C	d, e, s
April	C	B	A	m, p, z
Mai-Juni	A	C	B	r
August	B	C	A	g, i
September	C	A	B	k

Die mittlere Spalte „Reihenfolge“ zeigt, in welcher Reihenfolge die Prüfungen in welchen Prüfbedingungen (A, B oder C) durchgeführt wurden. Diese Randomisierung und die Variation in der Reihenfolge waren notwendig, weil zu erwarten war, dass die Prüfer mehr Schwierigkeiten zu Beginn der Prüfung haben. Wenn die Reihenfolge nicht variiert worden wäre, könnte man die Einflüsse der Prüfbedingung und des Lernens nicht voneinander trennen und folglich den Einfluss der Prüfbedingung nicht auswerten, was das wichtigste Projektziel war. Um die Auswertung der Einflüsse des Zeitdrucks zu ermöglichen, wurde der Faktor „Reihenfolge“ mit drei Kategorien definiert: 1, 2 und 3. Dieser Faktor entspricht dem Einfluss des Lernens. Die letzte Spalte der oben genannten Tabelle zeigt die Codes der Handprüfer. Die Protokolle sind anonymisiert worden.

In jeder Prüfkampagne mussten bis zu drei Prüfer die Prüfung gleichzeitig durchführen. Deswegen wurden die Prüfbereiche in drei Einheiten zusammengefasst:

- a) Bereich 1a und Bereich 3 am Großbehälter
- b) Bereich 2 am Großbehälter
- c) Austenitische Testkörper.

Die benötigte Zeit pro Einheit war ungefähr gleich groß. Diese Zeit wurde Zyklus genannt. Durch die Einteilung in 3 Prüfbereichseinheiten konnten die Prüfungen mit drei Prüfern gleichzeitig durchgeführt werden. Die Länge der Zyklen war:

- 8 Stunden für Prüfbedingung A,
- 6,5 Stunden für Prüfbedingung B,
- 4,5 Stunden für Prüfbedingung C.

Insgesamt dauerte jede Prüfkampagne zwei Wochen. Die folgende Tabelle (Tab. 7) zeigt ein Beispiel der Einteilung von Prüfern in diese Einheiten (aus Prüfkampagne August, mit zwei Prüfern). Die Einteilung war quasi-zufällig und in wechselnder Reihenfolge der Einheiten für jeden Prüfer.

**Tab. 7. Zeitliche Reihenfolge innerhalb einer Prüfkampagne.**

Prüfbedingung: B		1a und 3	2	Austenit
Zyklus 1	Di 10:00-17:30	Prüfer y		Prüfer x
Zyklus 2	Mi 8:30-16:00		Prüfer x	Prüfer y
Zyklus 3	Mi 16:00-17:30 Do 8:30-14:30	Prüfer x	Prüfer y	
Prüfbedingung: C		1a und 3	2	Austenit
Zyklus 1	Do 14:30-17:30 Fr 8:30-10:00		Prüfer x	Prüfer y
Zyklus 2	Fr 10:00-12:30 Mo 10:30-12:30	Prüfer x	Prüfer y	
Zyklus 3	Mo 13:30-15:00 Di 8:30-11:30	Prüfer y		Prüfer x
Prüfbedingung: A		1a und 3	2	Austenit
Zyklus 1	Di 11:30-17:30 Mi 8:30-11:30	Prüfer x	Prüfer y	
Zyklus 2	Mi 11:30-17:30 Do 8:30-11:30	Prüfer y		Prüfer x
Zyklus 3	Do 11:30-17:30 Fr 8:30-11:30		Prüfer x	Prüfer y

### 2.5.1.1 Änderung des Versuchsplans

Tab. 8 gibt eine Übersicht der Bereiche und Reflektoren, die geprüft wurden. Nach der zweiten Prüfkampagne (April 2008) hatte es sich gezeigt, dass der Prüfumfang zu klein war und folglich auch der subjektiv empfundene Zeitdruck. Deswegen wurde der Prüfumfang ab der dritten Prüfkampagnen vergrößert. In Tab. 8 sind die ab der dritten Prüfkampagne eingeführten Reflektoren/Aufgaben in Klammern aufgelistet. Die Abkürzungen für die Prüfköpfe ergeben sich wie folgt: 45-2 ist ein 45°-Winkelprüfkopf mit einer Frequenz von 2 MHz.

**Tab. 8. Übersicht der Bereiche und Reflektoren. Die Aufgaben in Klammern wurden ab der dritten Prüfkampagne eingeführt.**

		Bereich 1a		Bereich 3	
Prüfkopf	45-2	4.65/66	(M2.3)	M2.4	M2.8
	60-2	4.65/66			

		Bereich 2				
Prüfkopf	45-2	(4.55)	(4.56)	4.57	4.58	4.59

		austenitische Testkörper								
Prüfkopf	45-2	21	28	29	30	35	36	37	38	39
	45-4	(21)	(28)	(29)	(30)	(35)	(36)	(37)	(38)	(39)

### 2.5.1.2 Durchführung der psychologischen Erhebungen

Vor Beginn der Prüfungen wurden den Prüfern die Ziele der Studie, einschließlich der psychologischen Untersuchungen, erläutert. Den Prüfern wurde zugesichert, dass ihre Prüfergebnisse anonym behandelt würden. Weiterhin wurde vor Beginn der Prüfaufgaben der *Erfahrungs- und Qualifizierungsfragebogen* und der *Stressverarbeitungs-Fragbogen (SVF)* ausgefüllt. Nach der Prüfung jeden Bereichs (Prüfbereiche, siehe Kapitel 2.4) unter allen Bedingungen wurde der *NASA TXL-Fragebogen* bearbeitet (viermal in jeder Versuchsbedingung, d.h. insgesamt zwölfmal). Am Ende jeder Versuchsbedingung füllten die Probanden den *BSKE* aus und am Ende des Versuchs die *SOL-Fragen*.

### 2.5.2 Ausgangsvariablen

Von allen gemessenen Werten, deren ausführliche Beschreibung im Kapitel 2.4 zu finden ist, wurden die folgenden Ausgangsvariablen untersucht (Tab. 9):

**Tab. 9. Ausgangsvariablen.**

Nr.	Ausgangsvariablen	Erklärung
1	Amplitude [dB]	Der Unterschied zwischen der gemessenen Amplitude und der Registrierschwelle
2	y_max [mm]	Die Position in der Querrichtung (Position des Maximums in y-Richtung)
3	z_max [mm]	Die Tiefenlage (Position des Maximums in z-Richtung)
4	x1_6dB [°]	Die Position des kleineren -6dB-Wertes in x-Richtung. Dieser Wert zusammen mit der Halbwertslänge bestimmt die Position in der Längsrichtung.
5	log L	$L = x2\_6dB - x1\_6dB$ , der Unterschied zwischen zwei -6dB-Werten, ist die Halbwertslänge der Anzeige. L wurde in Graden gemessen, wobei $L = 1^\circ$ einer Länge von 53,7 mm entspricht.

Der Logarithmus der Halbwertslänge wurde untersucht, weil die Datenanalyse gezeigt hat, dass nur der Logarithmus der Halbwertslänge und nicht die Halbwertslänge selbst normal und homogen verteilt ist. (Bei einer größeren Halbwertslänge ist auch ihre Streuung größer.)

Die anderen gemessenen Werte wurden nicht analysiert, weil sie keine neuen Erkenntnisse liefern würden, oder weil die Stichprobe zu klein ist. Der Wert y\_max, die -6dB- und die -12dB-Werte für y sind hoch korreliert, weil sie alle sehr dicht beieinander liegen und kurz nacheinander gemessen wurden. In den ersten zwei Prüfkampagnen schrieben die Prüfer die z-Ausdehnung sehr selten auf, obwohl das von ihnen verlangt wurde. Aus diesem Grund wurde von den Prüfern in weiteren Prüfkampagnen auf die Angabe der z-Ausdehnung verzichtet. Die -12dB-Werte für die x-Koordinate haben eine viel geringere Relevanz als die -6dB-Werte und es ist zu erwarten, dass sie mit den -6dB-Werten korreliert sind. Die Stichprobe für die -6dB-Werte und die -12dB-Werte in der x-Richtung ist aus zwei Gründen deutlich kleiner,

als für die Maxima: die Halbwertslänge wurde nur an acht Reflektoren in den Bereichen 2 und 3 gemessen. Ferner wurde die Halbwertslänge nur in den Fällen aufgeschrieben, bei denen die Amplitude gleich oder größer als die Registrierschwelle war.

### 2.5.3 Faktoren

Die Größen, die einen Einfluss auf die Testergebnisse haben, werden Einflussvariablen genannt, während diejenigen, die im Versuch kontrolliert und variiert werden, als Faktoren bezeichnet werden. Die Faktoren „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“, „Prüfbedingung“ und „Reihenfolge“ wurden im Kapitel 2.5.1 definiert. Weitere Faktoren beschreiben den Prüfer und seine Reaktion auf die Arbeitsbedingungen. Die Prüfer haben verschiedene psychologische Testbatterien beantwortet, die im Kapitel 2.3 ausführlich beschrieben wurden. Aus den Ergebnissen dieser Fragebögen wurden sechs weitere Faktoren definiert. Alle Faktoren werden in Tab. 10 dargestellt.

**Tab. 10. Faktoren.**

Nr.	Faktoren	kategorial/kontinuierlich
1	Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf	kategorial: 32 Ebenen in Prüfkampagnen 1 und 2 und 56 Ebenen in Prüfkampagnen 3, 4 und 5
2	Prüfbedingung	kategorial, mit 3 Ebenen
3	Reihenfolge	
4	UT-Erfahrung	
5	UT-Erfahrung in Kernkraftwerken	kontinuierlich
6	Stressresistenz	
7	Stress-Reaktion	
8	Psychische Arbeitsbelastung	
9	Zeitliche Anforderungen	

Eine wichtige Einflussvariable im Experiment war der Reflektor, weil jeder Reflektor (Riss, Nut oder Volumenfehler) unterschiedlich reflektiert. Jeder Reflektor wurde mit zwei Einschallrichtungen untersucht. Deswegen ist die Einschallrichtung ebenfalls eine Einflussvariable. Manche Reflektoren wurden mit zwei verschiedenen Prüfköpfen untersucht. In solchen Fällen ist der Prüfkopf auch eine Einflussvariable. Diese drei Einflussvariablen – der Reflektor, die Einschallrichtung und der Prüfkopf – machen einen Faktor aus. Dieser Faktor wurde „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“ genannt. Die Anzahl der Kategorien für diesen Faktor berechnet sich aus der Anzahl, wie viele Reflektoren in der oben genannten Tabelle vorkommen, multipliziert mit 2 (für 2 Einschallrichtungen). In der ersten und der zweiten Prüfkampagne sind es folglich 16 Kategorien und in der dritten, vierten und fünften Prüfkampagne 28 Kategorien.

Die Faktoren haben eine Bedeutung für die spätere Datenauswertung. Die Messergebnisse von zwei unterschiedlichen Einschallrichtungen oder von zwei unterschiedlichen Prüfköpfen werden durch die Definition des Faktors „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“ statistisch genauso behandelt wie Messergebnisse von zwei unterschiedlichen Reflektoren. Dadurch wird die Stichprobe vergrößert, was den Versuchsfehler kleiner macht.

Die Einflussvariable „Prüfer“ ist in diesem Modell nicht enthalten, sie beschreibt die interindividuellen Unterschiede der Prüfer, die u. a. durch die unterschiedlichen Ausprägungen der Faktoren 4 bis 9 aus Tab. 10 resultieren. Diese Faktoren beschreiben Merkmale der Prüfer, die unabhängig von diesem Versuch sind (Faktoren 4, 5 und 6), sowie die Reaktion der Prüfer auf die Arbeitsbelastung in diesem Versuch (Faktoren 7, 8 und 9). Diese sechs Faktoren sind kontinuierlich. Eine Variable wird kontinuierlich genannt, wenn sie in einem bestimmten Intervall jeden beliebigen Wert annehmen kann. Kategoriale Variable sind Variable mit nominalen Werten, die man Kategorien nennt (z.B. „Prüfbedingung“ hat mögliche Werte A, B oder C). Die Kategorien von Faktoren werden auch Ausprägungen genannt.

Der Faktor „Zeitliche Anforderungen“ spiegelt ein Item aus einem Fragebogen für die psychische Arbeitsbelastung wider und beschreibt den subjektiv wahrgenommenen Zeitdruck in der jeweiligen Prüfbedingung, welche die objektiv verfügbare Zeit darstellt.

## 2.5.4 Einfluss der Organisation auf die Prüfergebnisse

Um die Einflüsse der Organisation auf die Prüfergebnisse zu identifizieren, wurden die Prüfer über den organisatorischen Kontext befragt. Dazu wurden die Ergebnisse eines Fragebogens, der in Anlehnung an die Methode „Sicherheit durch Organisatorisches Lernen – SOL“ [7] entwickelt wurde, qualitativ analysiert.

## 2.5.5 Methode der Datenauswertung

### 2.5.5.1 Statistisches Modell

Um die Verbindung zwischen den Faktoren und Ausgangsvariablen zu beschreiben, wird ein Modell benötigt. Das allgemeine lineare Modell ist eines der am häufigsten untersuchten Modelle in der Statistik [18]. Grundvoraussetzung für die Anwendung solcher Modelle in der statistischen Praxis ist die Annahme, dass ein linearer Zusammenhang zwischen den beobachteten Daten und den Einflussfaktoren besteht. Für die Datenauswertung der Versuche im Projekt SR 2514 wurde ein lineares Modell angewandt:

$$A_{ijk} = \eta + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \sum_{l=1}^6 \psi_l p_l + \varepsilon_{ijk} .$$

$A_{ijk}$  ist ein Messergebnis, z.B. die Amplitude am Reflektor 4.57 mit Einschallrichtung von unten, vom Prüfer  $k$  unter Prüfbedingung  $B$ . Parameter  $\eta$  heißt Intercept. Die griechischen Buchstaben  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  sind die Effekte von drei kategorialen Faktoren, wobei die Indizes  $i$ ,  $j$  und  $k$  die Faktorebene bezeichnen.  $\psi_l$  für  $l = 1, 2, \dots, 6$  sind die Parameter, die die Effekte der sechs kontinuierlichen Faktoren beschreiben.  $p_l$  sind die Werte der Faktoren, die diese kontinuierlichen Variablen haben.  $\varepsilon_{ijk}$  ist das Residuum.

Es wird angenommen, dass die Faktoren unkorreliert sind, dieselbe Varianz besitzen und dass die Residuen normal verteilt sind. Die Berechnung von Modellparametern erfolgt durch die Maximum-Likelihood-Methode.

Wegen der großen Zahl von Faktoren wurde die so genannte „schrittweise Modellselektion“ angewandt. Ausgangspunkt ist das einfachste plausible Modell. Schrittweise werden Variablen in das Modell aufgenommen, bis sich keine Verbesserungen des Modells mehr ergeben. In jedem Schritt wird diejenige Variable gewählt, die die größte Verbesserung bewirkt, die anhand eines F-Test-Vergleichs bestimmt wird. Faktoren, die zu keiner Modellverbesserung führen, werden aus dem endgültigen Modell ausgelassen. Daher resultieren unterschiedliche endgültige Modelle für unterschiedliche Ausgangsvariablen. Das Kriterium für eine Verbesserung des Modells sind die p-Werte. Wenn der p-Wert eines Faktors kleiner als das Signifikanzniveau  $\alpha$  ist, dann hat der jeweilige Faktor einen signifikanten Effekt und er verbessert das Modell. Für diesen Bericht wurde  $\alpha = 0,1$  gewählt. Die Ausreißer wurden nach dem Quartilabstand (IQR) identifiziert und von dem Datensatz entfernt, mit 5 IQR als Akzeptanzkriterium.

### 2.5.5.2 Einfluss auf die Amplitude und die Halbwertslänge

Der Einfluss der Faktoren auf die Amplitude und die Halbwertslänge wird mit Hilfe des allgemeinen linearen Modells ausgewertet. Die Ergebnisse der Auswertung mit dem linearen Modell werden in diesem Bericht in der bekannten Form der ANOVA-Tabelle dargestellt (Tab. 15 und Tab. 16 im Kapitel 3.1.2 und 0), mit der üblichen Bedeutung der p-Werte.

### 2.5.5.3 Einfluss auf die Streuung der Amplitude, der Halbwertslänge und der Position

Der Einfluss der Faktoren auf die Streuung von allen fünf Ausgangsvariablen wird ebenfalls mit Hilfe des allgemeinen linearen Modells ausgerechnet. Ein Zwischenergebnis des Modells ist der quadratische Mittelwert und seine übliche Abkürzung ist MS (mean square). Diese Größe ist die Varianz der Residuen. Sie wird in diesem Bericht Streuung genannt.

Der Einfluss der kategorialen Faktoren auf die Streuung wurde so ausgewertet, dass die Daten für jede Ebene getrennt analysiert wurden. Beispielsweise wurde für die Analyse des Faktors „Prüfbedingung“ der Datensatz in drei Teile geteilt, da der Faktor „Prüfbedingung“ drei mögliche Ausprägungen (Kategorien) hatte (genannt A, B und C). Danach wurde die Streuung für jede Kategorie einzeln ausgerechnet.

Für die kontinuierlichen Faktoren wurde ein Kriterium zur Aufspaltung der Daten eingeführt, um die Daten in zwei oder drei Kategorien einzuteilen. Durch den anschließenden Vergleich der beiden Datensätze sollten so eindeutige Aussagen ermöglicht werden. Beispielsweise wurde der Faktor „UT-Erfahrung“, der kontinuierlich erhoben wurde, in zwei Gruppen eingeteilt: kleiner 8 Jahre oder größer 8 Jahre. Die Wahl des Kriteriums wurde in diesem Fall anhand empirischer Belege der Expertiseforschung gewählt. Dann wurden die Daten für jede Kategorie getrennt ausgewertet. Die so gebildeten Kategorien und die Kriterien sind in Tab. 11 dargestellt.

**Tab. 11. Kategorien für die kontinuierlichen Faktoren.**

Kontinuierliche Faktoren	Erklärung	Kategorien	Kriterium
UT-Erfahrung	Gesamterfahrung in UT (in Jahren)	2	<i>8 Jahre</i> 1: weniger Erfahrung (< 8 Jahre) 2: mehr Erfahrung (≥ 8 Jahre)
UT-Erfahrung in Kernkraftwerken	Gesamterfahrung in UT in KKW (in Jahren)	2	<i>8 Jahre</i> 1: weniger Erfahrung (< 8 Jahre) 2: mehr Erfahrung (≥ 8 Jahre)
Stressresistenz	Die Fähigkeit, stressige Situationen zu beherrschen	2	<i>Median</i> 1: weniger Stressresistenz 2: mehr Stressresistenz
Stress-Reaktion	Reaktion auf Stress, gemessen als Befinden	2	<i>Median</i> 1: kleinere Stress-Reaktion 2: größere Stress-Reaktion
Psychische Arbeitsbelastung	wahrgenommener Anspruch der Aufgabe	2	<i>Median</i> 1: kleinere psych. Arbeitsbelastung 2: größere psych. Arbeitsbelastung
Zeitliche Anforderungen	wahrgenommener Zeitdruck	3	<i>Dreiteilung</i> A: kein Zeitdruck B: mittlerer Zeitdruck C: viel Zeitdruck (Die möglichen Werte für diese Variable liegen von 1 bis 100. Die drei Kategorien wurden so definiert: A: 1-30; B: 31-70; C: 71-100)

Nach Ergebnissen der Expertiseforschung gilt eine Person mit mindestens acht Jahren Berufserfahrung in einem Fach als Experte. Anhand des Kriteriums „acht Jahre“ wurden die Faktoren „UT-Erfahrung“ und „UT-Erfahrung in KKW“ in jeweils zwei Gruppen (viel und wenig Erfahrung) geteilt. Die Faktoren „Stressresistenz“, „Stress-Reaktion“ und „Psychische Arbeitsbelastung“ wurden am Medianwert geteilt, der die Stichprobe in zwei gleich große Teilstichproben unterteilt. Die Variable „Zeitliche Anforderungen“ wurde in drei Kategorien mit gleich großen Skalenanteilen geteilt, aufgrund der analogen Teilung der objektiv verfügbaren Zeit.

Mit dem ganzen Datensatz wurde das Modell für jede von fünf Ausgangsvariablen berechnet. Zwei Beispiele, für die Amplitude und für die Halbwertslänge, sind im Kapitel 3.1.2 und 3.1.3 zu finden. Danach wurde die Analyse für alle in der Tab. 11 dargestellten Kategorien durchgeführt, sowie für die Kategorien der kategorialen Faktoren „Prüfbedingung“ und „Reihenfolge“. Als Ergebnis dieses Vorgehens resultiert die Streuung für jede Kategorie.

Im nächsten Analyseschritt sollte bestimmt werden, ob die Unterschiede zwischen den Kategorien signifikant sind. Dafür wurde die Unsicherheit der Streuung geschätzt. Die Konfidenzbereiche der Streuung werden durch Quantile der  $\chi^2$ -Verteilung bestimmt:

$$\frac{(n-1)MS}{\chi^2_{\alpha/2, n-1}} \leq \sigma^2 \leq \frac{(n-1)MS}{\chi^2_{1-\alpha/2, n-1}}$$

wobei  $n$  die Anzahl der Freiheitsgrade,  $MS$  der quadratische Mitterwert,  $\alpha$  Signifikanzniveau und  $\sigma^2$  die Streuung ist. Ein approximativer Test der Signifikanz ist einfach: überlappen sich die Konfidenzbereiche von zwei Streuungen nicht, ist der Unterschied zwischen diesen Streuungen signifikant. Für die Konfidenzbereiche wurde der übliche Wert von  $\alpha = 0,05$  gewählt, d.h. 95%-Konfidenzbereiche wurden verwendet. Im Kapitel 3.1.4 wird die Interpretation der Ergebnisse an Beispielen erläutert.

## 2.6 Mechanisierte Ultraschallprüfung

Die mechanisierte Prüfung wurde von zwei Teams durchgeführt: einem Team der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und einem vom Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP). Die Prüfungen erfolgten an den gleichen Reflektoren wie die manuelle Prüfung. Das Team der BAM prüfte einige zusätzliche Reflektoren und hatte demzufolge einen größeren Prüfumfang. Die Prüfaufgaben waren die gleichen wie für die manuelle Prüfung. Die zwei Teams benutzten unterschiedliche Geräte und Software.

Das BAM-Team prüfte im Februar 2008 zwei Wochen lang und wertete anschließend sieben Arbeitstage lang die Daten aus (siehe Tab. 6 und Tab. 12). Der Prüfumfang war drei bis viermal größer als der Prüfumfang für Handprüfer. Der angemessene Prüfumfang konnte zu dieser Zeit noch nicht genau abgeschätzt werden. Deshalb wurde der Faktor „Zeitliche Anforderung“ nicht variiert.

Das IZFP-Team prüfte im Mai und Juni 2008 während der dritten Prüfkampagne der Handprüfung (siehe Tab. 12). Dieses Team hatte den gleichen Prüfumfang wie die Handprüfer in den Prüfkampagnen 3, 4 und 5: der Faktor „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“ hatte 28 Kategorien. Es wurde angestrebt, dass dieses Team mit den gleichen Zeitbeschränkungen arbeitet wie die Handprüfer. Wegen technischer Schwierigkeiten beim Geräteaufbau war es nicht möglich, die Prüfungen mit allen drei Kategorien der Prüfbedingung durchzuführen. Deshalb wurde die Prüfung mit zwei Kategorien der Prüfbedingung durchgeführt: mit viel und mit weniger Zeit. Die tatsächlich gebrauchten Zeiten waren gleich wie die Zeiten für die A- und B-Kategorien des Zeitdrucks bei der Handprüfung: 8 bzw. 6,5 Stunden/Zyklus.

**Tab. 12. Übersicht der Prüfkampagnen mit mechanisierter Prüfung.**

Prüfkampagne (2008)	Reihenfolge		Team
	1	2	
Februar	A	X	BAM
Mai-Juni	A	B	IZFP

Wegen der äußerst kleinen Stichprobe ist es nicht möglich, den Einfluss des Zeitdrucks auf die mechanisierte Prüfung auszuwerten. Der eventuelle Unterschied zwischen zwei Durchläufen des IZFP-Teams könnte durch das Lernen entstanden sein

oder durch irgendwelche anderen Ursachen, die im Versuchsplan nicht berücksichtigt wurden und letztendlich nicht berücksichtigt werden können. Mit einer viel größeren Stichprobe hätten solche Einflüsse weniger Auswirkungen auf die Auswertung des Effekts des Zeitdrucks.

Aus oben genannten Gründen wurden nur zwei Faktoren definiert. Der erste ist „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“, genauso definiert wie für die Handprüfung. Der zweite Faktor wurde „Team-Wiederholung“ genannt. Dieser Faktor hat drei Ebenen: BAM, IZFP-1 und IZFP-2 – für die Prüfung des BAM-Teams, die langsamere Prüfung des IZFP-Teams und die schnellere Prüfung des IZFP-Teams.

Die Datenanalyse erfolgte wie für die Handprüfung, nur mit weniger Faktoren.

## 2.7 Postulierte Erwartungen

Das Ziel der Analyse der Amplitude und Halbwertslänge war, die Effekte von allen untersuchten Faktoren auszuwerten.

Die postulierten Erwartungen in Tab. 13 wurden für die möglichen Effekte von acht Faktoren (alle außer “Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“) auf die Streuung von allen fünf untersuchten Ausgangsvariablen formuliert.

**Tab. 13. Postulierte Erwartungen für die Streuung der Ausgangsvariablen.**

Faktoren	Postulierte Erwartungen
Prüfbedingung	Streuung wächst von A bis C
Reihenfolge	Streuung fällt von 1 bis 3
UT-Erfahrung	Mehr UT-Erfahrung – kleinere Streuung
UT-Erfahrung in KKW	Mehr UT-Erfahrung in KKW – kleinere Streuung
Stressresistenz	Mehr Stressresistenz – kleinere Streuung
Stress-Reaktion	Größere Stress-Reaktion – größere Streuung
Psychische Arbeitsbelastung	Größere psychische Arbeitsbelastung – größere Streuung
Zeitliche Anforderungen	Größere zeitliche Anforderungen – größere Streuung

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Ergebnisse der Handprüfung

#### 3.1.1 Allgemeine Anmerkungen

Wie schon im Kapitel 2.5.1 beschrieben wurde, war der Versuchsplan unausgeglichen. Ein Versuchsplan gilt als ausgeglichen (balanced), wenn die Anzahl der gemessenen Werte sowohl für alle Kategorien als auch für alle Kombinationen von Kategorien gleich ist. Der Prüfumfang wurde nach der zweiten Prüfkampagne vergrößert. Zusätzliche Schwierigkeiten werden durch fehlende Werte verursacht, die den Datensatz noch unausgeglichener machen. Die Prüfer haben nicht immer alle Aufgaben vollendet. Sie wurden angewiesen, dass sie die Halbwertslänge nur bei Amplituden größer als 0 (also die gemessenen Werte größer als die Registrierschwelle) aufschreiben. Die Stichprobe für die -6dB-Werte und die -12dB-Werte in der x-Richtung ist aus noch einem Grund besonders klein: die Halbwertslänge konnte nur an acht Reflektoren in den Bereichen 2 und 3 gemessen werden, so dass der Faktor „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“ bei der Auswertung von  $x1_{6dB}$  selbst wenn die Prüfer alle Werte aufgeschrieben haben nicht mehr als 16 Kategorien hat. Die fehlenden Werte sind leider nicht zufällig über den ganzen Datensatz verteilt, so dass besonders die Analyse der  $x1$ -Werte und  $\log L$  wohl einem systematischen Fehler unterliegt. Wegen der kleinen Stichprobe und der fehlenden Werte sind die Ergebnisse für  $x1_{6dB}$  und  $\log L$  nicht so verlässlich wie die Ergebnisse für die Amplitude,  $y_{max}$  und  $z_{max}$ .

Eine andere Einschränkung der Untersuchung ergibt sich aus der kleinen Anzahl der Prüfer. Erst bei einem Stichprobenumfang ab 30 Personen kann von normal verteilten Werten ausgegangen werden. Bei kleineren Stichproben wird der  $\beta$ -Fehler (die falsche Akzeptanz der Nullhypothese) größer. Ferner können viele Verfahren, die normal verteilte Werte voraussetzen, nicht oder nur bedingt angewandt werden.

Bereits ein Screening der Ergebnisse ließ vermuten, dass die Werte des Prüfers z kaum Varianz aufwiesen, mit der Ausnahme im Bereich 2, wo seine Ergebnisse ähnlich gestreut sind, wie bei den anderen Prüfern. Eine strengere Datenanalyse hat den Verdacht bestätigt. Der Prüfer hat die Ergebnisse seines ersten Durchgangs entweder gelernt oder aufgeschrieben und hat sie minimal modifiziert, statt neu zu prüfen, was das Aufsichtspersonal übersah. Deswegen wurden seine Ergebnisse von den Bereichen 1a, 3 und von den austenitischen Testkörpern aus dem Datensatz gelöscht und aus der Datenanalyse ausgenommen.

Im Kapitel 2.5.5.1 wurde die Methode für die Entfernung der Ausreißer beschrieben. Die Anzahl von Ausreißern ist aus Tab. 14 ersichtlich. Diese Tabelle zeigt auch den Unterschied zwischen dem geplanten Prüfumfang und den tatsächlich aufgeschriebenen Messergebnissen. Die Tabelle ist folgendermaßen zu deuten: für die Amplitude wurden insgesamt 1248 Messwerte von den Prüfern gefordert, davon wurden 1125 tatsächlich aufgeschrieben, und davon wurden 2 Messwerte als Ausreißer aus dem Datensatz ausgenommen. Der Grund warum viele Werte nicht aufgeschrieben wurden ist, dass manche Prüfer die Aufgabe nicht vollendeten. Die geplante Anzahl der aufgeschriebenen Werte für  $x1_{6dB}$  und  $\log L$  ist  $\leq 372$  und

nicht 372, weil die Prüfer die Einweisung bekommen haben, die Ausdehnung bei einer Amplitude unter der Registrierschwelle nicht auszuwerten.

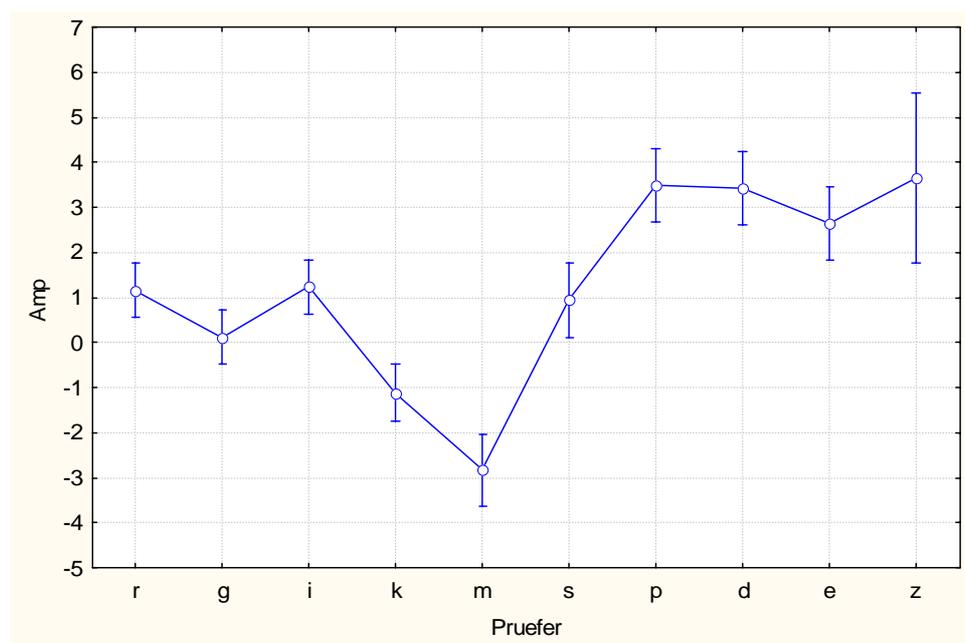
**Tab. 14. Die Datensatzgröße und die Ausreißer.**

Ausgangsvariable	Geplante Anzahl der aufgeschriebenen Werte	Tatsächliche Anzahl der aufgeschriebenen Werte	Davon Ausreißer
Amplitude [dB]	1248	1125	2
y_max [mm]	1248	1124	68
z_max [mm]	1248	1128	keine
x1_6dB [°]	≤ 372	224	2
log L	≤ 372	224	keine

Die Daten der Handprüfung wurden mit dem Programm *R 2.4.0* [38] ausgewertet.

### 3.1.2 Ergebnisse für die Amplitude

Als ein Zwischenschritt in der Datenanalyse wurde die Amplitude mittels eines linearen Modells mit den Faktoren „Prüfer“, „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“, „Prüfbedingung“ und „Reihenfolge“ durchgeführt. Die kontinuierlichen Faktoren (siehe Tab. 10) wurden in dieser Analyse weggelassen. Das Ergebnis dieser Analyse zeigt die Unterschiede zwischen den Prüfern. Die Werte in der Abb. 13 sind die mit dem linearen Modell geschätzten Parameter, die sich auf den ganzen Datensatz beziehen. Bedeutsam sind hier die Unterschiede und nicht die Ausprägung der Werte an sich.



**Abb. 13. Amplitude in der Abhängigkeit von dem Prüfer, mit 95%-Konfidenzbereichen.**

Ob die Unterschiede zwischen den Prüfern durch andere Einflussvariablen erklärt werden können, zeigt die Analyse mit einem Modell, in dem der Faktor „Prüfer“ durch andere Faktoren ersetzt wurde, und zwar durch Faktoren aus Tab. 10, Kapitel 2.5.3, wie das im Kapitel 2.5.1 beschrieben wurde. Die Ergebnisse dieser Datenanalyse sind in Tab. 15 dargestellt. Einen signifikanten Einfluss auf die Amplitude haben die Faktoren Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf, UT-Erfahrung, Stress-Resistenz und Reihenfolge. Für die übrigen Faktoren konnte kein signifikanter Einfluss auf die Amplitude nachgewiesen werden, daher wurden sie im Modell nicht berücksichtigt.

**Tab. 15. Ergebnisse des linearen Modells für die Amplitude. In den Spalten werden die für die Varianzanalyse üblichen Werte dargestellt. DF – Freiheitsgrade; SS – Summe von Quadraten; MS – quadratischer Mittelwert. Die Faktoren sind (von oben): Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf, UT-Erfahrung, Stressresistenz und Reihenfolge.**

	DF	SS	MS	F-Wert	p-Wert
<b>Refl_ER_PK</b>	55	30216.92436	549.3986247	40.22783397	8.41E-220
<b>UT</b>	1	1337.248696	1337.248696	97.91545899	3.82E-22
<b>SResist.</b>	1	86.46777145	86.46777145	6.331306628	0.012008869
<b>Reihenf.</b>	2	118.2009656	59.10048282	4.327430582	0.013434774
Residuen	1063	14517.57851	13.6571764		

Die Amplitude wächst mit wachsender UT-Erfahrung, mit sinkender Stressresistenz und mit wachsender Ausprägung des Faktors „Reihenfolge“. Diese Trends sollten aber vorsichtig interpretiert werden. Die Effekte der Faktoren „UT-Erfahrung“ und „Stress-Resistenz“ könnten zufällig entstanden sein, weil diese Faktoren in diesem Versuch nur 10 Werte haben ( $\alpha$ -Fehler-Kumulation). Der Effekt der Reihenfolge ist nur im Unterschied zwischen Kategorien 3 und den anderen zwei Kategorien zu sehen und er beträgt nur 0,7 dB, was keine praktische Relevanz hat.

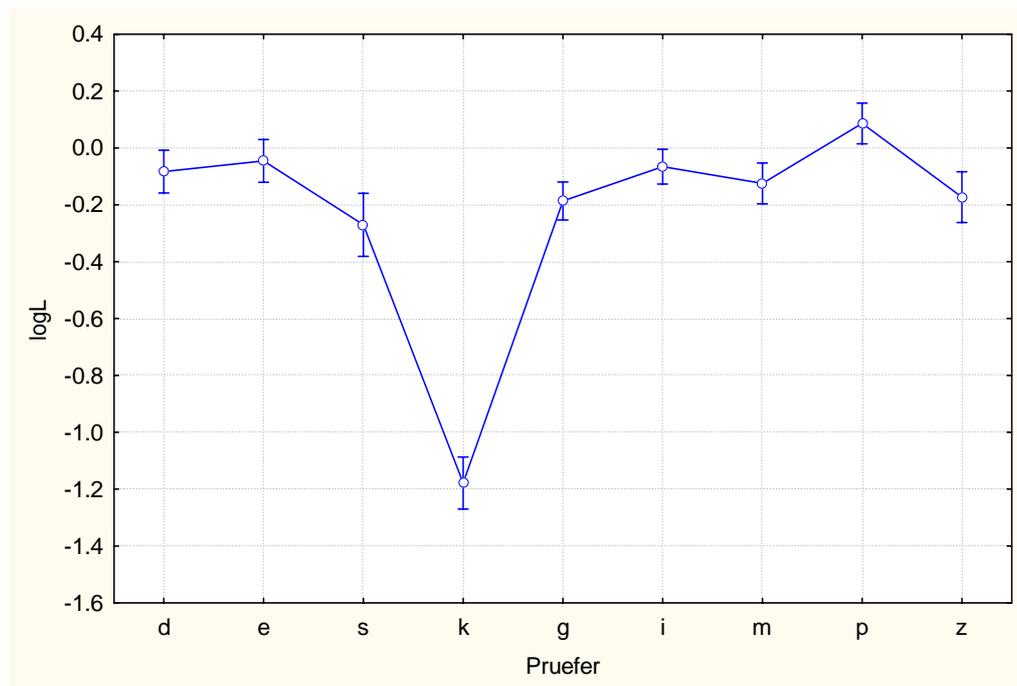
Es ist wohl möglich, dass andere Einflussvariablen, die in diesem Versuch nicht kontrolliert wurden, einen Einfluss auf die Amplitude hatten. Beispielsweise sind systematische Unterschiede bezüglich der Empfindlichkeitsjustierung, einschließlich Ermittlung des Plattierungszuschlags, möglich. Da diese Vorgänge nicht völlig kontrolliert werden konnten und der Plattierungszuschlag nicht immer protokolliert wurde, können ihre Einflüsse nicht ausgewertet werden.

Alle Faktoren mit einem Bezug zum Zeitdruck (Prüfbedingung, Stress-Reaktion, Psychische Arbeitsbelastung und Zeitliche Anforderungen) haben keinen signifikanten Effekt auf die Amplitude (siehe Tab. 15).

Aus der Tab. 15 ist erkennbar, dass der Faktor „UT-Erfahrung in KKW“ keinen signifikanten Einfluss hat. Dennoch sollte man nicht zum Fehlschluss kommen, dass die UT-Erfahrung in Kernkraftwerken (KKW) keinen Einfluss auf die Amplitude hat. Die Variablen „UT-Erfahrung“ und „UT-Erfahrung in KKW“ sind hoch korreliert mit  $r=0,874$ ,  $p<0,01$ . Das bedeutet, dass nur einer dieser beiden Faktoren einen Teil der Gesamtvariabilität erklärt, während der andere kaum zu dieser beiträgt und daher für das Modell nicht wichtig ist. Tatsächlich hat die UT-Erfahrung in KKW einen fast ebenso großen Effekt wie die UT-Erfahrung, was deutlich wird, wenn der Faktor „UT-Erfahrung“ aus dem Model ausgelassen wird.

### 3.1.3 Ergebnisse für die Halbwertslänge

Die Ergebnisse einer Datenanalyse mit dem Logarithmus der Halbwertslänge als Ausgangsvariable und mit dem Prüfer als Faktor werden in Abb. 14 dargestellt. Der Prüfer k hat deutlich kleinere Halbwertslängen als die anderen Prüfer (4 mm, während die anderen im Bereich 29 bis 65 mm liegen) protokolliert. Auch zwischen den anderen Prüfern gibt es signifikante Unterschiede. Ähnlich wie bei der Amplitude sind diese Werte an sich nicht informativ, sondern nur ihre Unterschiede.



**Abb. 14. Logarithmus der Halbwertslänge in der Abhängigkeit von dem Prüfer, mit 95%-Konfidenzbereichen.**

Wie bei der Amplitude zeigt sich, dass die Prüfer unterschiedliche Halbwertslängen protokollieren (Abb. 14). Ein Prüfer produziert eindeutig Ausreißerwerte, nämlich Prüfer k, mit ungefähr 10-mal kleineren Halbwertslängen als die anderen Prüfer. Seine Ergebnisse für die Amplitude und Ortung weichen allerdings nicht von den Ergebnissen der anderen Prüfer ab.

Welche anderen Einflussvariablen diese Unterschiede ausmachen, wird in Tab. 16 dargestellt. Sie stellt eine Zusammenfassung der Analyse mit allen Faktoren aus Tab. 10, Kapitel 2.5.3, dar. Die folgenden Faktoren haben einen signifikanten Einfluss auf die Halbwertslänge:

- Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf,
- UT-Erfahrung in KKW,
- Stress-Resistenz,
- Psychische Arbeitsbelastung,
- Stress-Reaktion und
- Prüfbedingung.

Tab. 16. Ergebnisse des linearen Modells für log L. In den Spalten werden die für die Varianzanalyse üblichen Werte dargestellt. DF – Freiheitsgrade; SS – Summe von Quadraten; MS – quadratischer Mittelwert. Die Faktoren sind (von oben): Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf, UT-Erfahrung in KKW, Stressresistenz, Psychische Arbeitsbelastung, Stress-Reaktion und Prüfbedingung.

	DF	SS	MS	F-Wert	p-Wert
<b>Refl_ER_PK</b>	14	32.59827014	2.328447867	6.330267325	1.81E-10
<b>UTKern</b>	1	9.819821367	9.819821367	26.69679455	5.67E-07
<b>SResist.</b>	1	15.62666024	15.62666024	42.48363817	5.53E-10
<b>PARbeitsb.</b>	1	6.073795828	6.073795828	16.51260989	6.91E-05
<b>SReakt.</b>	1	5.168354653	5.168354653	14.05101958	0.000231941
<b>Pruefb.</b>	2	4.297332924	2.148666462	5.841502097	0.003414955
<b>Residuen</b>	203	74.66902941	0.367827731		

Die Halbwertslänge wächst mit wachsender UT-Erfahrung in KKW, mit sinkender Stressresistenz, mit sinkender psychischer Arbeitsbelastung, mit wachsender Stress-Reaktion und sie wächst mit Ebenen der Prüfbedingung von A bis C. Wie bei der Amplitude sind diese Ergebnisse vorsichtig zu interpretieren. Die Faktoren „UT-Erfahrung in KKW“ und „Stressresistenz“ haben nur zehn Werte (für die zehn Prüfer), wobei die Werte für Prüfer k Ausreißer sind. Wegen der kleinen Anzahl der Prüfer und wegen der Ausreißer sind die Ergebnisse für diese Faktoren mit hoher Unsicherheit belastet. Der Effekt der Faktoren „UT-Erfahrung in KKW“ und „Stress-Resistenz“ könnte zufällig entstanden sein ( $\alpha$ -Fehler-Kumulation). Aus den gleichen Gründen sind die Ergebnisse für die psychische Arbeitsbelastung, die Stress-Reaktion und die Prüfbedingung inkonsistent.

Die vier Faktoren, die nach dem Faktor „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“ den stärksten Effekt auf die Halbwertslänge haben (siehe Tab. 16), beziehen sich alle auf den Prüfer und seine Reaktion auf die Arbeitsbedingungen. Sie haben alle einen stärkeren Effekt als der Faktor Prüfbedingung. Dies bestätigt, dass der subjektiv empfundene Zeitdruck einen größeren Einfluss hat, als die real zu Verfügung stehende Zeit.

Auch für die Halbwertslänge gilt, dass sowohl die UT-Erfahrung als auch die UT-Erfahrung in KKW einen signifikanten Einfluss auf die Halbwertslänge haben, da sie hoch korreliert sind.

### 3.1.4 Ergebnisse für die Streuung der Amplitude, der Halbwertslänge und der Position

Der Einfluss von acht Faktoren auf die Streuung der fünf Ausgangsvariablen wurde untersucht. Die untersuchten Einflussfaktoren sind:

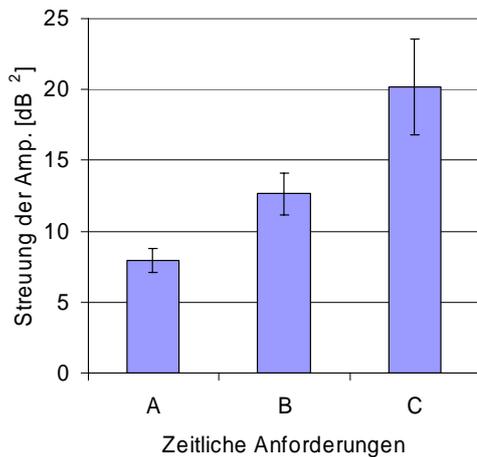
- Prüfbedingung,
- Zeitliche Anforderungen,
- Psychische Arbeitsbelastung,
- Stress-Reaktion,
- Stressresistenz,
- UT-Erfahrung,
- UT-Erfahrung in KKW,
- Reihenfolge.

Die Ergebnisse werden in Diagrammen von Abb. 15 bis Abb. 26 dargestellt.

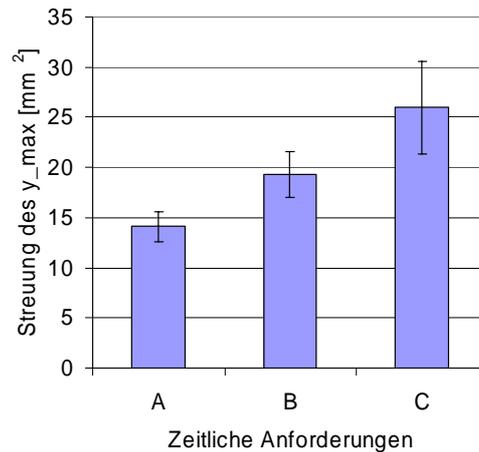
Im Kapitel 3.1.1 wurde erläutert, dass die Stichprobe für die -6dB-Werte und die -12dB-Werte in der x-Richtung ( $x1_{-6dB}$  und  $\log L$ ) viel kleiner war als für die anderen Ausgangsvariablen. Es gab viel mehr fehlende Werte (siehe Tab. 14, Kapitel 3.1) und der Datensatz war sehr unausgeglichen. Deswegen sind die Ergebnisse der Datenanalyse für diese zwei Ausgangsvariablen mit hoher Unsicherheit belastet. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse von diesen Ausgangsvariablen nicht dargestellt.

Die Faktoren **Stressresistenz** und **Stress-Reaktion** haben keinen signifikanten Einfluss auf die untersuchten Ausgangsvariablen. Die **Prüfbedingung** und die **Reihenfolge** haben einen signifikanten Einfluss, aber keine Regelmäßigkeit ist zu erkennen. Die Ergebnisse für diese zwei Ausgangsvariablen sind inkonsistent.

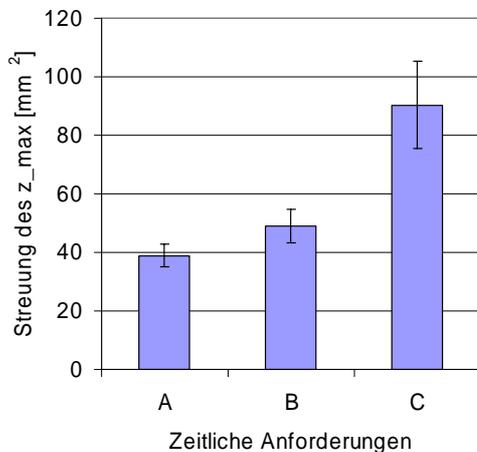
Den Einfluss der Variable „Zeitliche Anforderungen“ auf die Streuung zeigen die Diagramme auf den Abb. 15 bis Abb. 17. Die Streuung aller fünf untersuchten Variablen wächst mit den wachsenden zeitlichen Anforderungen (Kategorie C entspricht den höchsten zeitlichen Anforderungen, d.h. subjektiv am höchsten wahrgenommener Zeitdruck), was den postulierten Erwartungen entspricht. Signifikant sind die Unterschiede zwischen allen drei Ausprägungen dieser Variable für die Ausgangsvariablen Amplitude,  $x_{max}$  und  $y_{max}$ .



**Abb. 15. Streuung der Amplitude über Zeitliche Anforderungen.**



**Abb. 16. Streuung des  $y_{max}$  über Zeitliche Anforderungen.**

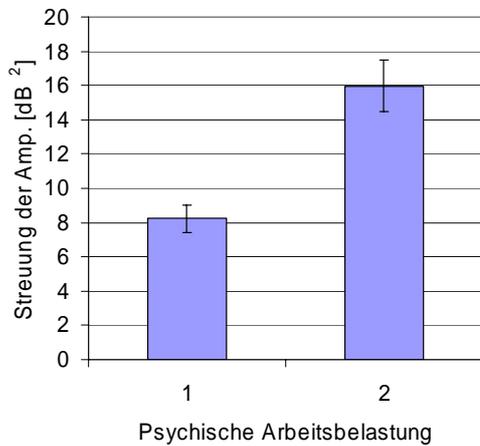


**Abb. 17. Streuung des  $z_{max}$  über Zeitliche Anforderungen.**

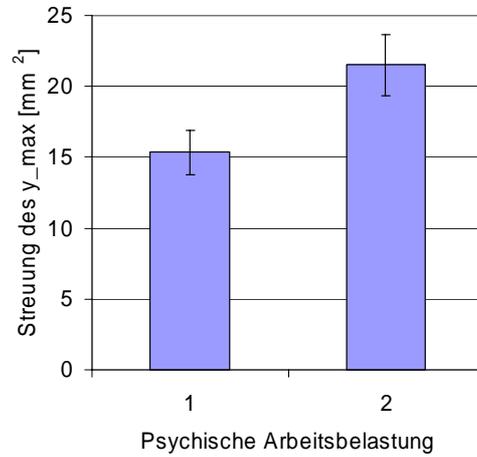
Legende:

- |                                      |
|--------------------------------------|
| A – wenig zeitliche Anforderungen    |
| B – mittlere zeitliche Anforderungen |
| C – hohe zeitliche Anforderungen     |

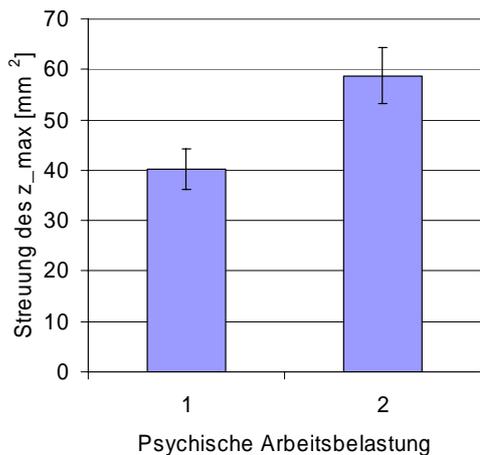
Der Einfluss des Faktors „**Psychische Arbeitsbelastung**“ (Abb. 18 bis Abb. 20) ist sehr deutlich bei der Amplitude, beim  $y_{max}$ , und beim  $z_{max}$ . Unter einer höheren psychischen Arbeitsbelastung sind die Streuungen größer, was den Erwartungen entspricht.



**Abb. 18. Streuung der Amplitude über Psychische Arbeitsbelastung.**



**Abb. 19. Streuung des  $y_{max}$  über Psychische Arbeitsbelastung.**



**Abb. 20. Streuung des  $z_{max}$  über Psychische Arbeitsbelastung.**

Legende:

- |  |
|--|
| 1 – niedrige psychische Arbeitsbelastung |
| 2 – hohe psychische Arbeitsbelastung     |

Die „UT-Erfahrung“ (Abb. 21 bis Abb. 23) und die „UT-Erfahrung in Kernkraftwerken“ (Abb. 24 bis Abb. 26) haben einen signifikanten Einfluss auf die Streuung der Amplitude und des  $z_{\max}$ , wobei eine längere Erfahrung mit kleinerer Streuung verbunden ist. Für die Ausgangsvariable  $y_{\max}$  konnte kein signifikanter Einfluss festgestellt werden.

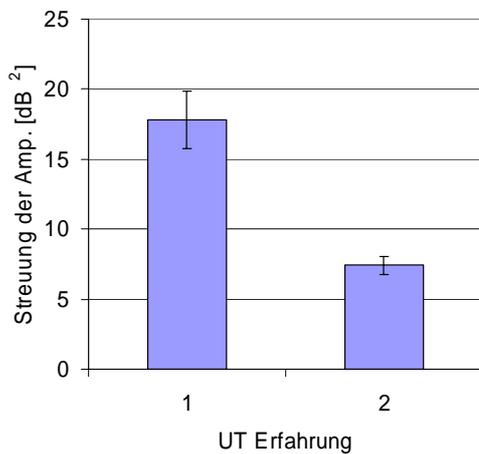


Abb. 21. Streuung der Amplitude über UT-Erfahrung.

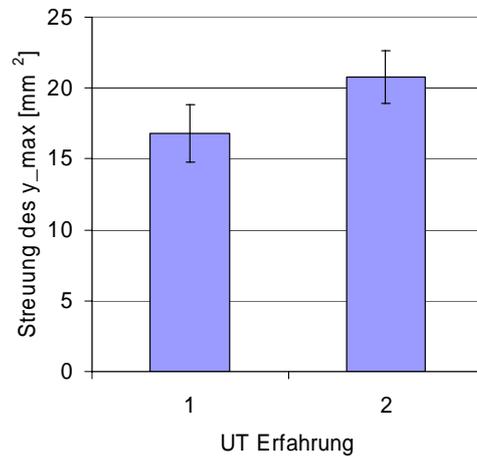


Abb. 22. Streuung des  $y_{\max}$  über UT-Erfahrung.

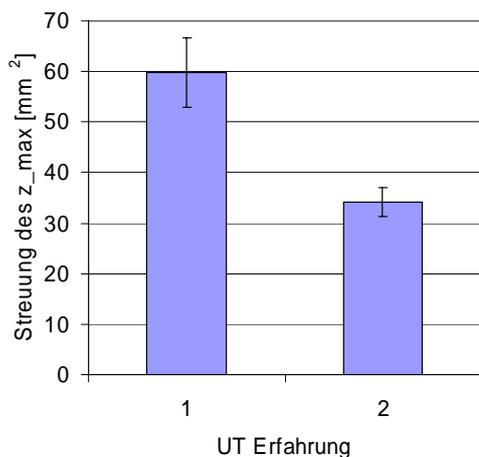
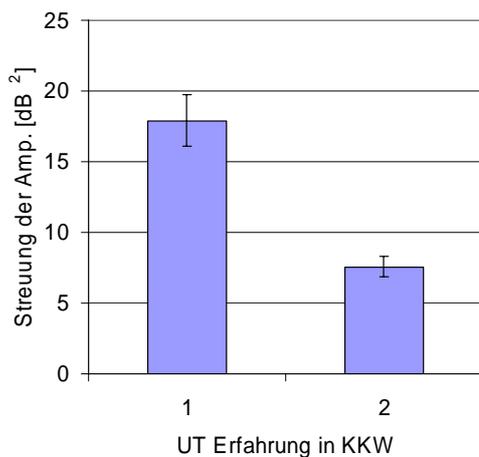


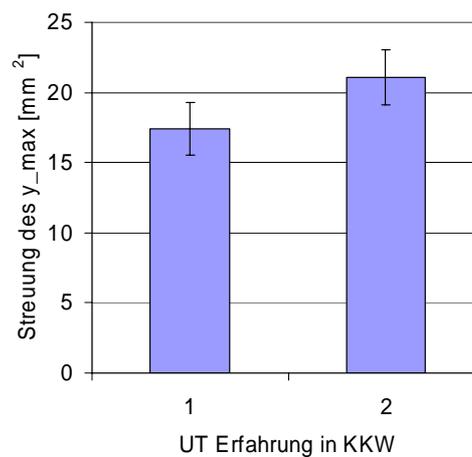
Abb. 23. Streuung des  $z_{\max}$  über UT-Erfahrung.

Legende:

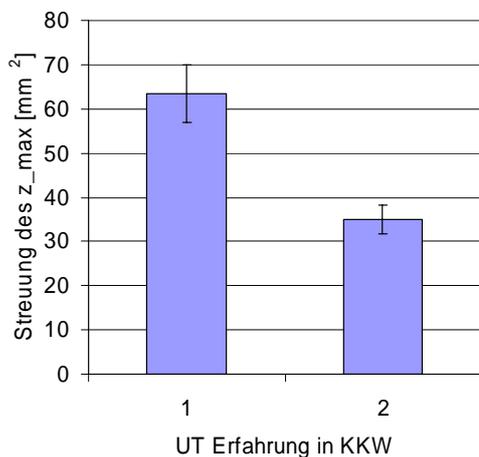
1 – weniger UT-Erfahrung
2 – mehr UT-Erfahrung



**Abb. 24. Streuung der Amplitude über UT-Erfahrung in Kernkraftwerken.**



**Abb. 25. Streuung des y\_max über UT-Erfahrung in Kernkraftwerken.**



**Abb. 26. Streuung des z\_max über UT-Erfahrung in Kernkraftwerken.**

Legende:

- |                                 |
|---------------------------------|
| 1 – weniger UT-Erfahrung in KKW |
| 2 – mehr UT-Erfahrung in KKW    |

Die Ergebnisse für die Streuung der anderen drei Ausgangsvariablen, nämlich Amplitude, y\_max und z\_max, lassen sich in einer Tabelle zusammenfassen. In Tab. 17 werden die Ergebnisse für diese drei Ausgangsvariablen mit den postulierten Erwartungen verglichen, die im Kapitel 2.7 dargestellt wurden.

Die Ergebnisse für diese drei Ausgangsvariablen lassen eindeutig einen Trend erkennen: die Streuung der Amplitude und der Positionsangaben wurden vom subjektiv empfundenen Zeitdruck und von der Arbeitsbelastung beeinflusst. Die für die Prüfung zur Verfügung stehende Zeit hatte in diesem Versuch weniger Einfluss auf die Prüfergebnisse als der subjektiv wahrgenommene Zeitdruck.

Die Ergebnisse für die Faktoren „Stressresistenz“, „UT-Erfahrung“ und „UT-Erfahrung in KKW“ sind vorsichtig zu interpretieren. Diese Faktoren beschreiben Merkmale der Prüfer unabhängig von diesem Versuch. Mit nur zehn Prüfern haben wir nur zehn Werte und dadurch eine äußerst kleine Stichprobe. Deswegen können keine generalisierten Schlussfolgerungen über den Einfluss der UT-Erfahrung aus diesen Ergebnissen gezogen werden.

Die große Ähnlichkeit zwischen den Ergebnissen für die UT-Erfahrung und die UT-Erfahrung in KKW ist zumindest für diese Stichprobe nicht überraschend, weil diese Variablen hoch korreliert sind.

**Tab. 17. Die Ergebnisse verglichen mit postulierten Erwartungen.**

Faktoren	Postulierte Erwartungen	Ergebnis
Prüfbedingung	Streuung wächst von A bis C	nicht bestätigt
Reihenfolge	Streuung fällt von 1 bis 3	nicht bestätigt
UT-Erfahrung	Mehr UT-Erfahrung – kleinere Streuung	überwiegend bestätigt
UT-Erfahrung in KKW	Mehr UT-Erfahrung in KKW – kleinere Streuung	überwiegend bestätigt
Stressresistenz	Mehr Stressresistenz – kleinere Streuung	nicht bestätigt
Stress-Reaktion	Größere Stress-Reaktion – größere Streuung	nicht bestätigt
Psychische Arbeitsbelastung	Größere psychische Arbeitsbelastung – größere Streuung	eindeutig bestätigt
Zeitliche Anforderungen	Größere zeitliche Anforderungen – größere Streuung	eindeutig bestätigt

### 3.1.5 Ergebnisse für den Einfluss der Organisation

Um die Einflüsse der Organisation auf die Prüfergebnisse zu identifizieren, wurden die Prüfer über den organisatorischen Kontext befragt. Die Ergebnisse der Befragung in Anlehnung an das Verfahren „Sicherheit durch Organisatorisches Lernen-SOL“ [7] wurden qualitativ ausgewertet. Die Ergebnisse sind in der nächsten Tabelle dargestellt. Alle zehn Prüfer haben die Fragen in der Tab. 18 beantwortet. Die Spalten auf der rechten Seite der Tabelle („Häufigkeit“) zeigen die Anzahl der Prüfer, die die jeweilige Frage bejaht haben.

Wegen der Änderungen des Prüfumfangs und damit einhergehenden Änderungen des Zeitdrucks sowie der Einführung in den Versuch (Anonymität, Übung, klare Einweisungen) unterscheiden wir zwischen zwei Versuchsplänen. Versuchsplan 1 bezeichnet den Versuchsplan der ersten zwei Prüfkampagnen (sechs Prüfer) und Versuchsplan zwei die nächsten drei Prüfkampagnen (vier Prüfer). In den späteren Kampagnen hatten die Prüfer eine bessere Vorbereitung, mit klareren Anweisungen. Außerdem wurde ihnen eine anonymisierte Datenerhebung und –auswertung zugesagt. Die Ergebnisse aus diesen beiden Versuchsplänen in Hinblick auf den Einfluss der Organisation werden in Tab. 18 getrennt dargestellt.

Aus der Tab. 18 ist es klar zu sehen, dass die erste Gruppe von Prüfern (Versuchsplan 1) viel mehr Probleme genannt hat als die zweite Gruppe (Versuchsplan 2).

**Tab. 18. Häufigkeit der Antworten über die möglichen organisatorischen Einflüsse.**

Fragen		Häufigkeit	
		Ver- suchs- plan 1	Ver- suchs- plan 2
1	Gab es Probleme durch die Informationsdarstellung?	3	0
2	Gab es Schwierigkeiten oder Störungen bei der Kommunikation?	2	0
3	Gab es einen negativen Einfluss der Arbeitsbedingungen?	3	3
4	War die Planung der Aufgaben unzureichend?	2	1
5	Waren die Zusändigkeiten nicht eindeutig geregelt oder unbekannt?	0	0
6	Wurde die Arbeitsausführung unzureichend kontrolliert?	0	0
7	Spielten Gruppeneinflüsse eine Rolle?	1	0
8	Gab es Probleme mit Regeln, Prozeduren oder Arbeitsunterlagen?	2	0
9	Gab es Hinweise auf unzureichende Qualifikation?	0	0
10	Könnte unzureichendes Training einen Einfluss gehabt haben?	3	0
11	Könnten die Organisation oder das Management einen Einfluss gehabt haben?	1	0
12	Gab es eine unzureichende Nutzung von Betriebserfahrung?	0	0
13	Spielten fehlende Sicherheitsprinzipien eine Rolle?	0	0
14	Gab es Probleme in der Qualitätssicherung / im Qualitätsmanagement?	0	0
15	Gab es einen Einfluss aufgrund der Instandhaltung?	0	0
<b>Insgesamt</b>		<b>17</b>	<b>4</b>

Außerdem wurden die Prüfer gebeten, die Probleme genauer zu beschreiben. Ihre Antworten sind aus der Tab. 19 ersichtlich. Wieder findet man einen deutlichen Unterschied zwischen zwei Versuchsplänen: die erste Gruppe hatte viel mehr Probleme aufgelistet als die zweite.

**Tab. 19. Kommentare der Prüfer über die möglichen Einfüsse der Organisation.**

1. Versuchsplan:	2. Versuchsplan:
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Unklare Anweisungen</li> <li>- Prüfanweisung zu spät erhalten</li> <li>- Keine Einweisung in Prüfanweisung</li> <li>- Arbeitslauf und Prüfanweisung sollten vorher bekannt sein</li> <li>- Teilweise Beleuchtung &amp; Gerüst in Bereich 1a</li> <li>- nicht eindeutig formulierte Aufgaben</li> <li>- Unangemessene Zeitvorgaben</li> <li>- Sich widersprechende Aufgaben</li> <li>- wichtige Zusatzinformationen fehlten</li> <li>- Arbeitsunterlagen sind unangemessen entwickelt, schlecht handhabbar und widersprüchlich</li> <li>- Fehlende Überprüfung der Trainingsergebnisse</li> <li>- Fehlendes oder ungenügendes Trainingsangebot</li> <li>- Prüfvorgaben nicht genau definiert</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ausrüstung nicht optimal</li> <li>- schlechte Beleuchtung</li> <li>- Prüfung auf der Mantellinie (Bereich 1a) war völlig sinnlos</li> </ul>

Die Antworten deuten darauf hin, dass neben bekannten Einflussvariablen wie Reflektoren, Prüftechnik, Zeit usw., die in der Regel in den Versuchsplänen berücksichtigt werden, auch organisatorische Bedingungen wichtig für die Prüfergebnisse sind. Eine sorgfältige Planung, verständliche Anweisungen sowie eine gute Vorbereitung für die Aufgaben spielen nach Meinung der Prüfer eine wichtige Rolle. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die organisatorischen Bedingungen auch für die Prüfung in Kernkraftwerken von großer Bedeutung sind.

### 3.2 Ergebnisse der mechanisierten Prüfung

Die Durchführung der Mechanisierten Prüfung wurde im Kapitel 2.6 beschrieben. Dort wurde auch die Datenanalyse angedeutet. Die psychologischen Instrumente und der Erfahrungsfragebogen wurden bei der mechanisierten Prüfung nicht eingesetzt. Deswegen wurden nur zwei Faktoren für die Datenauswertung der mechanisierten Prüfung berücksichtigt. Der erste ist „Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf“, genauso definiert wie für die Handprüfung. Der zweite Faktor wurde „Team-Wiederholung“ genannt. Dieser Faktor hat drei Ebenen: BAM, IZFP-1 und IZFP-2 – für die Prüfung des BAM-Teams, die langsamere Prüfung des IZFP-Teams und die schnellere Prüfung des IZFP-Teams. Da dieses Modell anders ist als das Modell für die Handprüfung, wäre ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht informativ. Die Stichprobe für die mechanisierte Prüfung ist sehr klein, was die Belastbarkeit der Schlussfolgerungen sehr beschränkt.

Für die Ausgangsvariable  $z_{\max}$  gab es sieben Ausreißer, von 115 aufgeschriebenen Werten. Für die anderen Ausgangsvariablen gab es keine Ausreißer. Die Ergebnisse der Analyse mit Amplitude als Ausgangsvariable sind aus der Tab. 20 ersichtlich.

**Tab. 20. Ergebnisse des linearen Modells für die Amplitude bei der mechanisierten Prüfung. In den Spalten werden die für die Varianzanalyse üblichen Werte dargestellt: DF – Freiheitsgrade; SS – Summe von Quadraten; MS – quadratischer Mittelwert. Die Faktoren sind (von oben): Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf und Team-Wiederholung.**

	DF	SS	MS	F-Wert	p-Wert
<b>Refl_ER_PK</b>	49	913.3897	18.6406	3.2902	0.000189
<b>Team_W</b>	2	99.2053	49.6026	8.7551	0.000826
<b>Residuen</b>	35	198.2947	5.6656		

Das nächste Diagramm zeigt die Amplituden-Unterschiede zwischen drei Team-Wiederholungen (Abb. 27).

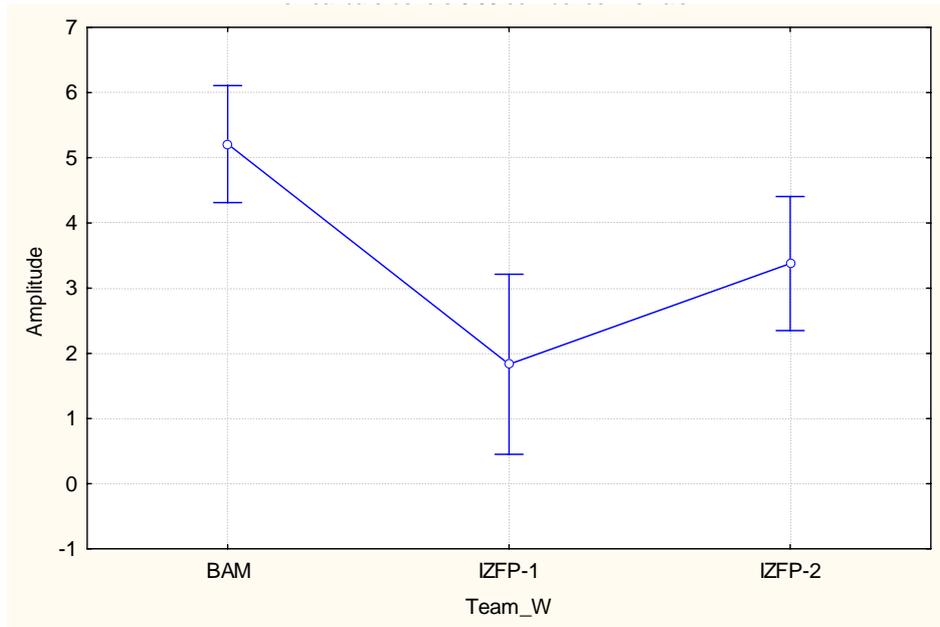


Abb. 27. Amplitude in der Abhängigkeit vom Faktor Team-Wiederholung.

Die Ergebnisse der Analyse mit log L als Ausgangsvariable werden in der Tab. 21 und in der Abb. 28 dargestellt.

	DF	SS	MS	F-Wert	p-Wert
<b>Refl_ER_PK</b>	13	1.397595	0.107507	7.04313	0.000306
<b>Team_W</b>	2	0.320384	0.160192	10.49465	0.001411
<b>Residuen</b>	15	0.228962	0.015264		

Tab. 21. Ergebnisse des linearen Modells für log L bei der mechanisierten Prüfung. In den Spalten werden die für die Varianzanalyse üblichen Werte dargestellt: DF – Freiheitsgrade; SS – Summe von Quadraten; MS – quadratischer Mittelwert. Die Faktoren sind (von oben): Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf und Team-Wiederholung.

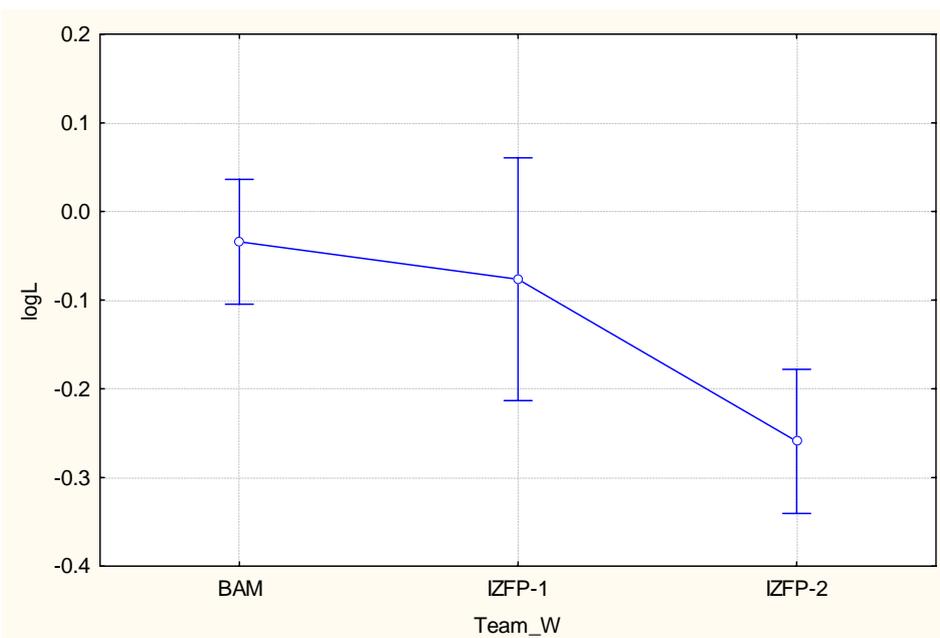


Abb. 28. Logarithmus der Halbwertslänge in der Abhängigkeit vom Faktor Team-Wiederholung

Wie bei der Handprüfung zeigt sich, dass es Unterschiede zwischen verschiedenen Teams hinsichtlich Amplitude und Halbwertslänge geben kann. Allerdings ist es nicht möglich generelle Schlussfolgerungen aus so einer kleinen Stichprobe zu ziehen. Die Hypothese, dass die Ergebnisse von mehreren Teams mit mechanisierter Prüfung eine kleinere Variabilität haben als die Ergebnisse der Handprüfer konnte nicht bestätigt werden. Wegen der kleinen Datensatzgröße für die mechanisierte Prüfung konnte dieser Unterschied nicht genauer untersucht werden.

Ein Vergleich der Streuung von drei Team-Wiederholungen ist nicht möglich. Wenn der Datensatz in drei Kategorien nach drei Ebenen des Faktors Team-Wiederholung geteilt wird, wird die ganze Variabilität in jedem von diesen drei neuen Datensätzen durch den Faktor Reflektor-Einschallrichtung-Prüfkopf erklärt, so dass die Varianz null ist.

Ein Vergleich der Streuungen der mechanisierten Prüfung und der Handprüfung wäre wegen der vielen Unterschieden zwischen diesen zwei Prüfungen nicht informativ. Das größte Problem ist, neben der kleinen Stichprobe für die mechanisierte Prüfung, dass die beiden Datensätze sehr unausgeglichen sind. Außerdem waren die Prüfbedingungen so viel anders, dass selbst mit einem kompletten Datensatz ein Vergleich wenig informativ wäre.

Die Daten der mechanisierten Prüfung wurden mit dem Programm *Statistica 7.1* [48] ausgewertet.

## 4 Diskussion

Die Ergebnisse der statistischen Analysen konnten die Effekte verschiedener Faktoren auf die Amplitude und die Halbwertslänge zeigen. Wenige Effekte entsprachen den postulierten Erwartungen, wie beispielsweise, dass die Amplitude mit der Erfahrung in UT größer wird – hier sollte die Messung aufgrund der größeren Erfahrung präziser sein – dies trifft jedoch nicht auf die Ergebnisse für die Halbwertslänge zu. Da der Human Factor-Einfluss auf die Amplitude und die Halbwertslänge nicht bekannt ist und es auch keine Referenzuntersuchungen gab, war es nahezu unmöglich Hypothesen zu bilden, wodurch dann auch die Interpretation der Ergebnisse erheblich erschwert wird. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse der Streuungen von größerer Bedeutung für die Untersuchung, da sie als ein Maß der Präzision oder Qualität für die Messung gelten können.

In den folgenden Abschnitten wird der Einfluss der erhobenen Faktoren auf die Präzision / Qualität der Messung diskutiert. Wie bereits im Ergebniskapitel dargestellt wurde, basieren die Ergebnisse für die Streuung der Halbwertslänge und der Position in der Längsrichtung auf zu wenig Werten und sind daher nicht belastbar und somit nicht interpretierbar. Daher werden im Folgenden nur die Ergebnisse für die Streuung der Amplitude, der Position in der Querrichtung und der Tiefenlage diskutiert.

### 4.1 Zeitdruck

Das Hauptziel der Untersuchung war, den Einfluss der zur Verfügung stehenden Zeit auf die Qualität der Messung zu quantifizieren. Mit abnehmender Zeit bzw. Erhöhung des Zeitdrucks sollte die Präzision und Zuverlässigkeit der Inspektion sinken. Da im Laufe der Untersuchung der Prüfumfang und die Behandlung der Prüfer (Anonymität, detaillierte schriftliche Einweisung) geändert werden musste, war der reale Zeitdruck nicht mehr vergleichbar: In der ersten Prüfkampagne war er höher, da der Prüfumfang größer war, in der folgenden zweiten Kampagne war er aufgrund des kleineren Prüfumfanges niedriger, außerdem waren die Prüfer über die Ziele der Untersuchung aufgeklärt. Allerdings wurde neben dem real vorgegebenen Zeitdruck (Prüfbedingung) auch der subjektiv wahrgenommene Zeitdruck – hier zeitliche Anforderungen genannt - erhoben. In den statistischen Analysen konnte ein signifikanter Einfluss der zeitlichen Anforderungen auf die Streuung aller drei relevanten Variablen, die ein Indikator für die Präzision und Zuverlässigkeit der Messung darstellen, gezeigt werden: der wahrgenommene Zeitdruck beeinflusst die Inspektionsqualität, indem er ihre Präzision vermindert. Dieses Ergebnis bestätigt unsere Erwartungen und unterstreicht empirische Belege aus der Arbeitspsychologie zum Einfluss von Zeitdruck auf die Prüfleistung [44].

Die Subskala für zeitliche Anforderungen des NASA tlx [15] gilt als guter Indikator für wahrgenommenen Zeitdruck und als Kontrollvariable für den tatsächlichen Zeitdruck in experimentellen Situationen wie bei unserer Untersuchung. Nach Skånberg (1994; in [2]) wird die Leistung des Prüfers stark durch Umweltfaktoren beeinflusst. Dieser Einfluss hängt auch von der Interpretation bzw. Reaktion des Prüfers auf die Umweltfaktoren ab.

Die Schwierigkeiten bei der Definition der Bedingungen / Zeitintervalle für den Zeitdruck spiegeln die Komplexität des Konzepts Zeitdruck wider. Der Zeitdruck, den wir im Experiment simulieren wollten, sollte die realen Situationen repräsentieren, unter denen die Prüfer bei ihren Inspektionen im Kernkraftwerk arbeiten. Jedoch wurde sehr bald offensichtlich, dass Zeitdruck viel mehr ist, als das verringerte Zeitbudget für eine Aufgabe. Tatsächlich hängt bei der Inspektion im Kernkraftwerk der Zeitdruck eng mit anderen Variablen zusammen bzw. bildet eine Kombination aus Variablen wie der Strahlenbelastung, der Temperatur des Prüfobjekts und der Umgebung, des Geräuschpegels, des Tragens der Schutzausrüstung, von impliziten Zeitvorgaben (Vorgesetztererwartungen über den Inspektionsabschluss), der Prüfaufsicht, des Verantwortungsgefühls für eine korrekte und effektive Aufgabendurchführung, usw. In zukünftigen Untersuchungen sollten zumindest ein Teil dieser Einflüsse oder eine teilweise Kombination induziert werden, um eine höhere ökologische Validität zu erreichen, d.h. die experimentelle Situation sollte so realistischer und repräsentativer für die realen Aufgabenbedingungen im Kernkraftwerk sein. Günstige Kombinationen wären Zeitdruck und Temperatur, die wahrscheinlich die Haupteinflussfaktoren neben Strahlung darstellen. Strahlung ist allerdings experimentell schlecht darzustellen. So könnten Empfehlungen zur Reduzierung des Zeitdrucks abgegeben werden. In unserem Fall ist es jedoch schwierig, Vorschläge zur Behandlung von Zeitdruck zu machen, da keine Daten über die anderen Variablen vorliegen.

## 4.2 Psychische Arbeitsbelastung

Die Skala „Psychische Arbeitsbelastung“ hat ähnliche Effekte wie die Subskala „zeitliche Anforderungen“. Mit steigender psychischer Arbeitsbelastung wächst die Streuung und sinkt somit die Präzision der Messung. Neben zeitlichen Anforderungen werden fünf weitere Skalen subsummiert:

- geistige Anforderungen,
- physische Anforderungen,
- eigene Leistung,
- eigene Anstrengung und
- Frustrationslevel [15].

Zusammen mit den zeitlichen Anforderungen bilden sie ein in der Human Factor-Forschung häufig verwendetes Instrument. Mit der wachsenden Bedeutung der Technik einhergehend mit immer komplexeren Prozeduren steigen auch die Anforderungen an den Operateur, was letztlich zu einem Absinken der Leistung führt [47]. Unsere Ergebnisse sind hypothesenkonform und konsistent mit der Forschungsliteratur. Der NASA tlx ergibt auch eine Aufteilung der einzelnen Ressourcen, die für die Aufgabendurchführung benötigt werden, und liefert so Information über verschiedene Aspekte der Arbeitsbelastung [47]. Allerdings wurde aufgrund der Stichprobengröße in dieser Untersuchung davon abgesehen, jedoch könnte er verwendet werden, um Schwachpunkte im Inspektionsdesign unter realen Bedingungen zu erheben.

## 4.3 Reihenfolge

Die Reihenfolge beeinflusste die Streuung der Amplitude, der Position in der Querrichtung und der Tiefenlage nicht konsistent und entsprach nicht den postulierten

Erwartungen. Die Ursache könnte in dem unausgewogenen Versuchsplan, in der kleinen Stichprobe und der Konfundierung<sup>3</sup> mit den Prüfbedingungen liegen, die aus dem unausgewogenen Versuchsplan resultierte.

Die Reihenfolge sollte ursprünglich nicht Teil der Untersuchung sein, musste aber aufgrund der Konfundierung mit der Prüfbedingung in die Analysen einbezogen werden, um den Einfluss auf die Ergebnisse zu kontrollieren.

Im experimentellen Design wurde die Reihenfolge der Prüfbedingungen variiert, um Lerneffekte zu verhindern (Prüfer bilden effektive Verhaltensmuster am Anfang und übertragen diese dann auf andere Bedingungen [5]). Jedoch konnte der geplante Versuchsplan nicht vollständig realisiert werden aufgrund der kleinen Anzahl verfügbarer Prüfer und der begrenzten Möglichkeit verschiedene Prüfer parallel in unterschiedlichen Prüfbedingungen arbeiten zu lassen. Weiterhin war die Zahl der Prüfer zu klein und variierte von Kampagne zu Kampagne (vergl. Tab. 6, Seite 30), so dass beispielsweise drei Prüfer in der Reihenfolge A-B-C prüften, aber nur einer in der Reihenfolge C-A-B. Die Faktoren Reihenfolge und Prüfbedingung sind also konfundiert. Daher müssen die Ergebnisse der statistischen Analysen mit Vorsicht interpretiert werden.

Um diese Schwierigkeiten zukünftig zu überwinden und Lerneffekte zu vermeiden, sollten einerseits der Versuchsplan ausgeglichen werden und andererseits die Anzahl der Prüfer drastisch erhöht werden, so dass sich in allen möglichen Kombinationen von Reihenfolge und Prüfbedingung eine gleichgroße Anzahl Prüfer befindet.

#### 4.4 Stress

Eine weitere Erwartung in dieser Untersuchung war, dass Zeitdruck Stress induziert und damit die Leistung beeinflusst. Weiterhin sollte die Leistung bei Personen mit höherer Stressresistenz weniger beeinflusst werden. Unsere Analysen ergaben keine signifikanten Effekte für Stressresistenz (Fähigkeit, Stress zu verarbeiten) und Stressreaktion (Reaktion auf Zeitdruck) auf die Streuung der abhängigen Variablen.

Der fehlende Effekt von Stressresistenz kann durch die geringe Stichprobengröße (nur zehn Prüfer) erklärt werden, bei der nicht von einer Normalverteilung der erhobenen Werte ausgegangen werden kann, die eine Voraussetzung für die Analyse darstellt.

Ergebnisse psychologischer Erhebungsinstrumente werden häufig an Normwerten gespiegelt, die Populationswerte (gleiches Alter und Geschlecht) repräsentieren. So können die individuellen Werte entweder dem Normalbereich, der 68% der Population repräsentiert, zugeordnet werden oder einem Extrembereich (z.B. niedrige Stressresistenz vs. hohe Stressresistenz im Vergleich zur Bevölkerung). In dieser Untersuchung gehörten die meisten Prüfer zum Normalbereich, d.h. es gab keine große Unterschiedlichkeit der erhobenen Werte. Daher kann auch nicht von einem Einfluss dieser Variable auf die Qualität der Prüfung ausgegangen werden.

Die Stressreaktion, die mit dem BSKE [20] erhoben wurde, war an die Prüfbedingungen geknüpft, d.h. sie wurde nach jeder Prüfbedingung erhoben. Da der

---

<sup>3</sup> Mit Konfundierungseffekt bezeichnen experimentell arbeitende Wissenschaftler die unerwünschte Tatsache, dass das untersuchte Phänomen von zwei oder mehr Bedingungen gleichzeitig beeinflusst wird. In diesem Zusammenhang sind die Faktoren „Reihenfolge“ und „Prüfbedingung“ konfundiert. Der Konfundierungseffekt ist manchmal die Ursache für Fehldeutungen von Versuchsergebnissen.

Einfluss der Prüfbedingung auf die Qualität der Prüfung fragwürdig ist, kann auch ein möglicher Einfluss der Stressreaktion nicht abschließend geklärt werden.

In zukünftigen Untersuchungen sollte daher der Einfluss von Stress auf die Prüfqualität untersucht werden sowie die Beziehung zwischen Zeitdruck, Stressreaktion und Prüfqualität.

#### 4.5 Erfahrung

Die Erfahrung in UT sowie spezifische Erfahrung in UT in Kernkraftwerken zeigten vergleichbare Einflüsse auf die Prüfqualität und Präzision. Unsere Erwartungen konnten zumindest für die Streuung der Amplitude und der Tiefenlage bestätigt werden, d.h. mit zunehmender Erfahrung nahm die Streuung ab. Auch diese Ergebnisse sind mit dem Forschungsstand konsistent. Sie verweisen darauf, dass gut ausgebildete und erfahrene Prüfer notwendig für verlässliche Prüfungen sind. Obwohl in dieser Untersuchung das Kriterium größer / kleiner 8 Jahre gewählt wurde, bedeutet das nicht, dass nur Prüfer mit mehr als 8 Jahren Berufserfahrung für die Inspektionen geeignet sind. Allerdings verweisen die Ergebnisse auf die Bedeutung von Berufsausbildung und Training in Bedingungen, die repräsentativ für Kernkraftwerke sind, für die Qualität der Prüfungen und gut vorbereitete Prüfer.

Die Ergebnisse für die Faktoren UT-Erfahrung und UT-Erfahrung in KKW (sowie für die Stressresistenz) sind vorsichtig zu interpretieren. Diese Faktoren beschreiben Merkmale der Prüfer unabhängig von diesem Versuch. Mit nur zehn Prüfern haben wir nur zehn Werte und dadurch eine äußerst kleine Stichprobe. Die Effekte dieser Faktoren könnten zufällig entstanden sein, weil diese Faktoren in diesem Versuch nur zehn Werte haben ( $\alpha$ -Fehler-Kumulation).

#### 4.6 Organisatorischer Kontext

Der organisatorische Kontext beeinflusst nach dem Human-Factors-Modell für die manuelle Ultraschallprüfung (s. Abb. 3, Kapitel 1.3) wie die einzelnen Faktoren interagieren. Ein Einfluss der Organisation entsteht aufgrund des Rahmens, der durch die Aufbau- und Ablauforganisation festgeschrieben ist. Hier werden die Regeln, Verfahrensanweisungen und Normen für die Arbeit festgelegt, das Arbeitsumfeld, die Arbeitsaufgabe und die Art der Zusammenarbeit geregelt sowie die Steuerung und die Kontrolle der Abläufe bestimmt und die Art der Interaktion mit Aufsichtsbehörden und anderen Organisationen vorgegeben. Für Kernkraftwerke können dies beispielsweise die atomrechtliche Aufsichtsbehörde, die Betreiberorganisation und Prüforganisationen sein. Aus der Analyse von Ereignissen in Industrien hohen Gefährdungspotenzials wie der Kerntechnik zeigte sich, dass der organisationale Einfluss vielfältig ist. So trugen beispielsweise Regeln, Prozeduren und Arbeitsunterlagen, Arbeitsbedingungen, Arbeitsplanung, Qualitätssicherung und Qualitätsmanagement, Informationsdarstellung, Kontrolle und Training zu der Entstehung von Ereignissen bei, d.h. in der Vergangenheit zeigte sich ein Einfluss der Organisation.

In unserer Untersuchung stellte das Forschungsteam die "Organisation" dar und dadurch wurde auch schnell klar, wie groß deren Einfluss war. Der ursprünglich geplante Prüfumfang war deutlich größer, als der Prüfumfang, der in Tab. 8, Kapitel 2.5.1.1, dargestellt ist. Jedoch wurden den Prüfern anfangs die Ziele und der Zweck

der Untersuchung nicht deutlich vermittelt. Aufgrund dieser unklaren Situation vermuteten die Prüfer, dass die Untersuchung dazu diene, sie zu testen und zu bewerten. Die Folge dieser Vermutung war, dass sie ihre Prüfaufgaben extrem langsam und sorgfältig ausführten und hohen Zeitdruck wahrnahmen. Als Reaktion auf dieses Verhalten wurde für die folgenden Kampagnen der Prüfumfang gesenkt (siehe Tab. 8, Kapitel 2.5.1.1). Ferner wurden in den folgenden Kampagnen vor Beginn der Untersuchung Ziele und Zweck den Prüfern klar vermittelt sowie die Anonymität der Daten zugesichert, die Fragebögen wurden ebenfalls anonymisiert, genau wie die schriftlichen Protokolle. Nach der Änderung unseres Vorgehens verhielten sich die Prüfer, wie wir es erwarteten – annähernd so, als ob sie ihre Prüfung in einem Kernkraftwerk durchführten. Daraus resultierte auch ein Einfluss auf die zur Verfügung gestellte Zeit (Prüfbedingung), plötzlich gab es keinen Zeitdruck mehr und die Prüfer beendeten ihre Inspektionen meist vor dem Ablauf der vorgegebenen Zeit sogar in der Bedingung mit hohem Zeitdruck (C). Nach den ersten beiden Kampagnen wurde dann der endgültige Prüfumfang bestimmt und die Bedingungen mit Zeitdruck entsprechend angepasst.

Aus dem oben genannten wurde deutlich, dass die Daten im Grunde genommen mit zwei unterschiedlichen Versuchsplänen erhoben wurden. Die ersten 6 Prüfer aus den ersten beiden Kampagnen prüften unter dem ersten Versuchsplan, während die folgenden 4 Prüfer (Kampagnen 3-5) unter dem zweiten Versuchsplan prüften. Die Unterschiede der Versuchsbedingungen spiegeln sich deutlich in den Kommentaren der Prüfer zu den organisationalen Faktoren wider (siehe Tab. 19). Die Kommentare zeigen wie wichtig ausreichende Vorbereitung (Regeln, Prozeduren und Arbeitsunterlagen, Informationsdarstellung) und Kommunikation zwischen Organisation und Prüfern ist.

#### **4.7 Prozeduren und die Demonstrationsübung**

In dieser Untersuchung und in den meisten anderen Untersuchungen mit kontrollierten Bedingungen sind die Arbeitsweisen anders als in der Praxis, selbst wenn sie den realen Arbeitsbedingungen möglichst nah kommen. Das liegt unter anderem in der Reduktion durch die Untersuchung selbst, die immer nur einen Ausschnitt aus der realen Welt abbildet und dementsprechend nicht beliebig viele Variablen variieren und kontrollieren kann. Deswegen können selbst die erfahrenen Prüfer ihre Aufgaben in einer Untersuchung nicht routinemäßig erledigen. Daher ist es wichtig, dass sich die Prüfer sehr gut für die Prüfung vorbereiten, einschließlich der Protokollierung. Deswegen wurde für diesen Versuch eine Demonstrationsübung für alle Prüfer geplant (beschrieben im Kapitel 2.4 und ausführlicher in [56]). Das Ziel der Demonstrationsübung war, dass die Prüfer eine Routine in der Bewältigung der Aufgaben erwerben, damit sich ihre Leistung während des Versuchs möglichst wenig ändert. Diese Demonstrationsübung haben die Prüfer als hilfreich erkannt.

#### **4.8 Aufsicht**

Das Aufsichtspersonal hatte auch einen Einfluss auf die Arbeitsweisen der Prüfer, und dadurch auf die Prüfergebnisse. Die Aufsicht wurde von TÜV-, BAM- oder MPA-Mitarbeitern gemacht. Sie waren dafür zuständig, dass die Prüfer ihre Arbeit in der vorgegebenen Zeit und nach der Prüfanweisung erledigen und dass sie die korrekt ausgefüllten Protokolle abgeben. Vollständig und korrekt ausgefüllte Protokolle sind

wichtig, weil jede Unvollständigkeit der Protokolle den Datensatz unausgeglichen macht und dadurch die Ergebnisse der Datenanalyse beeinflusst. Deswegen war die Rolle des Aufsichtspersonals wichtig in diesem Versuch.

Die Arbeitsweisen von Aufsichtspersonen hatten einen Einfluss auf die Anzahl von Arbeitsfehlern der Prüfer. Als Arbeitsfehler wird hier eine fehlerhafte Durchführung zu den Vorgaben der Prüfanweisung bezeichnet. Deswegen empfehlen wir für die nächste Untersuchung dieser Art, dass die Aufgaben der Aufsichtspersonen so genau bestimmt werden, wie die Aufgaben der Prüfer.

#### **4.9 Zusammenfassung der Diskussion**

Schlussfolgernd kann festgestellt werden, dass die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die Wichtigkeit des menschlichen Faktors bei der wiederkehrenden Prüfung in KKWs gezeigt haben. Im speziellen zeigte sich, dass der Zeitdruck tatsächlich die Prüfleistung in solch einer Weise beeinträchtigt, dass ihre Genauigkeit abnimmt. Der Zeitdruck wirkt jedoch in Kombination mit vielen anderen Faktoren so wie die physikalische Umgebung, die Organisationsumgebung und die Wahrnehmung der Prüfer ihrer Umgebung. Es erwies sich, dass ungünstige Arbeitsbedingungen eine zusätzliche Belastung zur Prüfaufgabe darstellen, die die Leistung in negativer Weise beeinflussen.

Um zu zeigen wie all diese Faktoren miteinander wechselwirken, welche weiteren menschlichen Faktoren einfließen und wie ihr negativer Einfluss auf die Inspektionsleistung minimiert werden kann, werden weitere Forschungsarbeiten vorgeschlagen.

Obwohl es nicht bestätigt werden konnte, dass die betrachteten Stressindikatoren die Mittler zwischen Zeitdruck und Prüfleistung bei dieser Untersuchung sind (hauptsächlich wegen des zu geringen Versuchsumfangs), erscheint es sinnvoll auch hier weitere Forschungsarbeit zu investieren. Weitere mögliche Faktoren, die auf die Prüfleistung Einfluss nehmen, könnten von der Organisation, der Arbeitszufriedenheit, der Motivation, den Entscheidungsprozessen usw. herrühren.

Die vorliegende Untersuchung hat ebenfalls die Wichtigkeit der Organisation, der Aufsicht, der Vorbereitung und der Prüfanweisung gezeigt. Es erwies sich, dass die individuelle Wahrnehmung des Zeitdruckes zum großen Teil durch diese Faktoren beeinflusst war. Dies weist darauf hin, dass zur Reduzierung des Zeitdrucks auch die Organisationsstrukturen noch umfassender untersucht werden sollten.

#### **4.10 Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen**

In diesem Kapitel werden Empfehlungen für mögliche anschließende Untersuchungen des menschlichen Faktors in der ZfP gegeben.

An erster Stelle steht der Versuchsplan und die Stichprobe. Bei einer folgenden Untersuchung sollte von Beginn an sichergestellt sein, dass

- genügend Prüfer zur Verfügung stehen
- die Anzahl der Prüfer unter jeder Prüfbedingung gleich groß ist,

- alle Prüfer die gleichen Aufgaben (Art und Anzahl) haben und die gleichen vorgegebenen Größen protokollieren,
- die Prüfaufsicht gewährleistet, dass die Prüfer ihre Aufgaben vollständig erfüllen, und
- der Versuchsplan während der Untersuchung nicht geändert wird.

Weiterhin sollen die Prüfer für ihre Aufgaben sehr gut vorbereitet sein, d.h., dass sie ihre Aufgaben von Anfang an sehr gut kennen und durch Übungen eine routinemäßige Durchführung gewährleistet ist, auch wenn diese von ihrer alltäglichen Arbeit (Protokollierung etc.) abweicht.

Die Kontrolle des Zeitdrucks stellt einen wichtiger Bestandteil des Experiments dar: Daher soll die Aufsicht sicherstellen, dass die Prüfer alle ihre Aufgaben erledigen. Das ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Prüfer Zeitdruck fühlen.

Voruntersuchungen mit dem ausgewählten Material werden empfohlen, um die angemessene Zeitspanne für die Durchführung zu identifizieren, da nur anhand dieser der Zeitdruck bestimmt werden kann. Diese Voruntersuchung sollte mindestens mit drei verschiedenen erfahrenen Prüfern durchgeführt werden, um den Einfluss individueller Unterschiede bei der Arbeitsausführung gering zu halten. Hoher Zeitdruck sollte dann aufgrund der Voruntersuchung mit 50% der Durchschnittszeit berechnet werden, zur Kontrolle kann die NASA TLX Skala „Wahrgenommener Zeitdruck“ verwendet werden.

Zusätzlich zum Zeitdruck sollten weitere Variablen erhoben werden, um deren Einfluss zu bestimmen: organisationale Faktoren (Aufsicht, Management, Aufsichtsbehörden), sozialer Kontext (Teamarbeit, soziales Feedback), Stress, Kommunikation, Motivation und Arbeitszufriedenheit.

Statt realistische, aber unhandliche Testkörper für den Versuch auszuwählen, empfehlen wir, mehrere kleinere Testkörper mit möglichst repräsentativen Fehlern zu verwenden. Kleinere Testkörper können schneller ausgetauscht werden, wodurch die Stichprobe viel größer werden kann. Ein weiterer Vorteil der kleineren Testkörper ist, dass sie transportiert werden können, so dass eine Nachbildung von realen Prüfbedingungen (z.B. Hitze, Lärm usw.) in speziell dafür konstruierten Räumen möglich ist.

Für eine Untersuchung der Auffindwahrscheinlichkeit dürften die Reflektorpositionen nicht vorher bekannt gegeben werden. Es müsste auch zu prüfende Bereiche ohne Reflektoren geben, um die Falschanzeigen-Wahrscheinlichkeit bewerten zu können.

Die Aufgaben und die gemessenen Werte sollten den realen Prüfvorgängen möglichst ähnlich sein. Andererseits sind die Ergebnisse eines Versuchs nur dann belastbar, wenn die Versuchsbedingungen kontrolliert sind, ohne Konfundierung im Versuchsplan und mit einer genügend großen Stichprobe. Deswegen ist eine gewisse Abweichung von realen Prüfbedingungen in jedem Versuch notwendig.

Um generalisierbare Aussagen aus Folgeuntersuchungen zu ermöglichen, empfehlen wir die Stichprobe drastisch zu vergrößern und die Anzahl der Variablen, die Gegenstand der Untersuchung sind, zu verringern. Hier schlagen wir vor, nicht mehr mit Amplituden zu arbeiten, sondern die Auffindwahrscheinlichkeit zu berechnen.

## 5 Stellungnahme der TÜV <sup>4</sup>

### 5.1 Vorbemerkungen

Wie in der RSK-Stellungnahme vom 11.04.2002 [39] dargestellt, wurden Anfang der 90-er Jahre in Rohrleitungen aus stabilisierten austenitischen Stählen von SWR-Anlagen (KWU Baureihe 69 und 72) in großem Ausmaße Risse nachgewiesen. Ereignisse, bei denen in den deutschen Kernkraftwerken in austenitischen Rohrleitungen Risse "mehr oder weniger zufällig" gefunden wurden, bzw. bei denen durch Nach- oder Neubewertung Befunde festgestellt wurden, waren vermehrt aufgetreten.

Dem RSK-Ausschuss **Druckführende Komponenten und Werkstoffe** waren vor Erscheinen der RSK-Stellungnahme in den unten aufgeführten Sitzungen Ergebnisse von Forschungsvorhaben zu der Thematik „Anpassung und Optimierung von zerstörungsfreien Prüfungen an den sicherheitstechnisch bedeutsamen Systemen und Komponenten“ dargestellt worden:

**Tab. 22. Behandlung der Thematik „Anpassung und Optimierung von zerstörungsfreien Prüfungen an den sicherheitstechnisch bedeutsamen Systemen und Komponenten“ im RSK-Ausschuss „Druckführende Komponenten und Werkstoffe“**

Sitzung	Thema
2. Sitzung 06.10.1999	Qualifizierung und Bewertung von Konzepten zur Betriebsüberwachung von Rohrleitungen und Behältern in Kernkraftwerken; Untersuchungsvorhaben SR 2218 des BMU (TÜV Rheinland)  Stand der Arbeiten des Arbeitskreises SEL-Prüftechnik; Vorstellung der DGZfP-Richtlinie US 3 "Ultraschallprüfung des prüfkopfnahe Oberflächenbereiches", Mai 1999
3. Sitzung 01.12.1999	Kenntnisstand zur interkristallinen Rissbildungen an den austenitischen Rohrleitungen; Abschlussbericht zu den Untersuchungen an den Rohrleitungen der Siedewasseranlagen KKI-1, KKP-1, KRB-II, Block B und C
4. Sitzung 12.01.2000	Betriebsbegleitendes Austenitprogramm aufgrund der Rissbildungen in Rohrleitungen > NW 80 aus stabilisierten austenitischen Stählen X 10 CrNiTi 18 9 (W.-Nr. 1.4541) und X 10 CrNiNb 18 9 (W.-Nr. 1.4550) in deutschen Leichtwasserreaktoren, Untersuchungsvorhaben SR 2235 des BMU (MPA- Stuttgart)
8. Sitzung 07.06.2000	Befund an einer Rohrleitung der Druckführenden Umschließung aus dem austenitischen Werkstoff 1.4541 im Kernkraftwerk Stade (KKS)
10. Sitzung 05./06.09.2000	Fortgang der ENIQ-Aktivitäten der Betreiber (VGB)

<sup>4</sup> Die Autoren dieses Kapitels sind: Dipl.- Ing. D. Schombach und Dr.- Ing. T. Just, TÜV NORD SysTec GmbH & Co. KG und Dipl.- Ing. H.-J. Cramer, TÜV Süd Industrieservice GmbH.

12. Sitzung 31.10.2000	Risse in einer Schweißnaht einer Anschlussleitung (TH System) an die Hauptkühlmittelleitung des Kernkraftwerks Biblis, Block A (KWB-A)
13. Sitzung 08.11.2000	Ergebnisse der wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen an den erneuerten austenitischen Rohrleitungen der SWR in der Jahresrevision 2000
17. Sitzung 04.04.2001	Durchführung zerstörungsfreier Prüfungen bei Fertigungsprüfungen und wiederkehrenden Prüfungen, Erforderliche Änderungen im KTA- Regelwerk (TÜV Nord)  Rissbefund am Austrittstutzen der Nachkühl- Saugarmatur TH 002 S001 (Erstabspernung) und an der anschließenden Rohrleitung im Kernkraftwerk Stade (KKS)

In der der RSK- Stellungnahme vom 11. April 2002 [39] wurden folgende Empfehlungen zur Weiterentwicklung und Optimierung zerstörungsfreier Prüfungen formuliert. Die Punkte a), b), d) und h), die das BfS- Projekt SR 2514 betreffen, sind im Folgenden kursiv geschrieben.

- a) *Eine fundierte Ausbildung der Prüfer ist erforderlich. Außer einer Qualifizierung und Zertifizierung entsprechend DIN EN 473[34] soll der Prüfer insbesondere mit den charakteristischen Erscheinungsformen betrieblich bedingter Fehler vertraut sein und ausreichende Kenntnisse über den Prüfgegenstand in Bezug auf Werkstoff, Geometrie und den baulichen Zustand besitzen. Die Schulung der Prüfer an den zum Einsatz kommenden Gerätesystemen ist nachzuweisen.*
- b) *Gute Arbeitsbedingungen der Prüfer sind erforderlich. Z. B. Zeitdruck, Arbeiten unter Atemschutz, hohe Umgebungstemperaturen, Lärm und Strahlenexposition können negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfungen haben. In den Kernkraftwerksrevisionen sind Zeitrahmen und Abfolge der Prüfungen an den Komponenten der Druckführenden Umschließung (DFU) entsprechend dem verfügbaren Personal (mit fundierter Ausbildung, s. o.!) so einzuplanen, dass eine Überlastung der Prüfer vermieden wird.*
- c) Die gemäß dem Stand von Wissenschaft und Technik erforderliche Aussagesicherheit ist mit einer entsprechenden Gerätetechnik sicherzustellen. Bei der Ultraschallprüfung z. B.: Gruppenstrahlerprüfköpfe; Gerätesysteme mit der Fähigkeit, sog. HF-Daten aufzunehmen und zu verarbeiten, Auswerterechenprogramme mit Analysefähigkeiten (SAFT, TOFD oder Rissspitzen-Signaltechnik). Bei der Durchstrahlungsprüfung z. B.: Röntgenfilmdigitalisierung in Verbindung mit Bildverarbeitungsalgorithmen, mechanisierte Durchstrahlungsprüfung. Bei der Wirbelstromprüfung z. B.: weiterentwickelte Spezialsonden; Niederfrequenz-, Fernfeld- und Impulswirbelstromverfahren für Schweißnähte und für Plattierungen; spezielle Rechenalgorithmen zur Störsignalunterdrückung. Bei der Sichtprüfung z. B.: Unterwasserinspektionsgeräte mit Zoomtechniken und mit Endoskopen für die Inspektion von engen Spalten z. B. am Kernmantel und am Speisewasserverteiler von RDB-Stutzen (RDB = Reaktordruckbehälter) in

Kernkraftwerken mit Siedewasserreaktor. Die Eignung der weiterentwickelten Prüftechniken ist unter Berücksichtigung der Vorgehensweise nach ENIQ nachzuweisen.

- d) *Mechanisierte Prüfungen zur Reduktion menschlicher Faktoren sind zu bevorzugen. Mechanisierte Prüfungen mit Aufzeichnung und Darstellung der Messdaten sind in Bereichen mit starker Strahlenexposition anzuwenden oder wenn, Stör und Formanzeigen vorliegen wie*
- *bei grobkörnigen Werkstoffen (z. B. austenitische Schweißnähte)*
  - *bei komplizierten Geometrien (z. B. Stützeinschweißnähte)*
  - *bei vorhandenen formbedingten Anzeigen (z. B. bei Wurzelkerben) oder wenn die Prüfaufgabe es erfordert (z. B. Nachweis verästelter Rissbildungen, Wanddickenmessungen bei Korrosions- und Erosionsmulden, ferritische Komponenten).*
- e) Bei schwierig zu prüfenden Schweißnähten mit komplizierter Geometrie ist die Prüftechnik an Vergleichskörpern zu optimieren und zu kalibrieren. Vergleichskörper mit künstlichen oder natürlichen Fehlern haben in den prüftechnisch relevanten Parametern (Werkstoff, Form, Wanddicke, evtl. vorhandene Plattierung oder Pufferung, evtl. grobkristallines Schweißgut) dem Prüfgegenstand zu entsprechen, damit die Aussagekraft des einzusetzenden Prüfverfahrens beurteilt werden kann.
- f) Bei mehrdeutigen Ergebnissen der Aus- und Bewertung von Ultraschallmessdaten sind weitergehende Analysen zur Charakterisierung der Fehler vorzunehmen, jedoch bei Befunden an Komponenten der DFU generell (Fehlerposition und -größenbestimmung). Für eine sicherheitstechnische Bewertung von Befundanzeigen sind Analyseverfahren anzuwenden. In Frage kommen z. B. die Anwendung von Rechenalgorithmen zur Fehlerabbildung und die Auswertung von Beugungssignalen am Fehlerrand.
- g) Bei eingeschränkter Prüfaussage sind kombinierte Techniken einzusetzen. Beispielhaft seien genannt:
- Ultraschall- und Durchstrahlungsprüfung von Rohrschweißnähten
  - Prüfung der RDB-Plattierung und ggf. von austenitischen Schweißnähten
  - mit Ultraschall und Wirbelstrom.
- h) *Das Qualitätssicherungsmanagement hat sicherzustellen, dass alle Bewertungen im erforderlichen Umfang vorgenommen und dokumentiert sowie Folgerungen aus den Ergebnissen gezogen werden. Zur Vermeidung von Fehlbewertungen ist insbesondere sicherzustellen, dass Auffälligkeiten und Besonderheiten, die Einfluss auf das Prüfergebnis haben, stets protokolliert und bewertet werden. Prüfaufsichten der Prüffirmen, des Betreibers und des Sachverständigen haben sich zu vergewissern, dass die Prüfungen entsprechend den Vorgaben vollständig ausgeführt und nachvollziehbar korrekt bewertet worden sind.*

Die RSK hielt es für erforderlich, dass die KTA-Regeln 3201 [41] und 3211 unter Berücksichtigung dieser Empfehlungen kurzfristig überarbeitet werden.

## 5.2 Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen

### 5.2.1 Zweck und Ziel des Vorhabens

Die das Ergebnis zerstörungsfreier Prüfungen beeinflussenden Faktoren sind im Grundsatz bekannt, quantifizierbare Aussagen über die Auswirkungen auf die Qualität der Prüfungen können jedoch nicht gemacht werden. In dem internationalen Forschungsprogramm PISC 3 (Program for the Inspection of Steel Components) wurden die Faktoren Ermüdung und Stress als diejenigen erkannt, die die größte Auswirkung auf das Ergebnis zerstörungsfreier Prüfungen haben. Die Bedingungen dieses Untersuchungsprogramms sind jedoch nicht auf kerntechnische Anlagen in Deutschland übertragbar (Unterschiede z. B. in der Organisation der Prüfungen, in der Prüftechnik, in den technischen Regelwerken und gesetzlichen Bestimmungen).

Die übergeordnete Zielsetzung des Vorhabens SR 2514 bestand darin, für die bei Fertigungsprüfungen und bei wiederkehrenden Prüfungen mit Ultraschall in Deutschland vorliegenden Randbedingungen eine belastbare Aussage zum Einfluss der Arbeitsbedingungen des Prüfers auf die Qualität der Ergebnisse von zerstörungsfreien Prüfungen zu machen und Möglichkeiten zur Minimierung ungünstiger Einflussfaktoren aufzuzeigen.

Die Einbindung der Technischen Überwachungsvereine TÜV Nord und Süd in das Vorhaben hatte zum Ziel, dass die Ergebnisse des Vorhabens schnell in die Praxis umgesetzt werden können.

### 5.2.2 Prüfbedingungen und Untersuchungsparameter

In den Kernkraftwerken finden wiederkehrende zerstörungsfreie Prüfungen an Behältern und Rohrleitungen sowie auch Fertigungsprüfungen auch an reparierten Bauteilen in Bereichen mit radioaktiver Strahlung statt. Weitere wesentliche Arbeitsbedingungen für das Prüfpersonal sind Arbeiten unter Atemschutz, hohe Umgebungstemperaturen, Zeitdruck und Lärm.

Wesentlich ist, dass die Aufenthaltsdauer des Prüfpersonals im strahlenden Bereich so kurz wie möglich gehalten wird. Prüfungen im strahlenden Umfeld konnten im Rahmen dieses Untersuchungsvorhabens verständlicherweise nicht vorgenommen werden. Für die Ultraschallprüfungen wurde daher als variable Messgröße die unterschiedlich zur Verfügung stehende Zeit für Prüfdurchführung, Bewertung und Protokollierung gewählt. Die Prüfungen sollten ursprünglich auch bei unterschiedlichen Temperaturen erfolgen. Da dies am Großbehälter nicht realisierbar war, konnte der Einflussparameter „erhöhte Arbeitstemperatur“ nicht untersucht werden. Die Einflussparameter Lärm und Arbeiten unter Atemschutz wurden im Projekt ebenfalls nicht untersucht werden.

Die Ultraschallprüfungen erfolgten am Großbehälter der MPA Stuttgart und an Vergleichskörpern an dort eingebrachten Testfehlern (Nuten, Risse). Sie wurden nach einer unter unserer Mitwirkung erarbeiteten Prüfanweisung mit manuellen und mechanisierten Prüftechniken durchgeführt. Als Prüfgegenstände wurden austenitische und plattierte ferritische Schweißnähte ausgewählt. Die ausgewählten Fehler (Reflektoren) sollten typisch für Prüfaufgaben sein, die bei wiederkehrenden

Ultraschallprüfungen in Kernkraftwerken von den Prüfern zu lösen sind. An dieser Stelle sei vermerkt, dass solche Schweißnähte in der Prüfpraxis vorrangig mechanisiert geprüft werden.

Die Prüfaufgabe bestand darin, die in den vorgegebenen Prüfabschnitten vorhandenen Reflektoren aufzufinden und deren Amplituden, Ortskoordinaten und Längenerstreckungen zu ermitteln. Als Bewertungsmaßstab für die Qualität der Prüfaussage dienten die Fehlerauffindwahrscheinlichkeit und die Genauigkeit der Messwerte.

### 5.2.3 Prüfpersonal

Die Prüfungen in Stuttgart erfolgten in fünf Prüfkampagnen. Als Prüfer kamen zehn manuelle Ultraschallprüfer (je vier vom TÜV NORD und vom TÜV Süd, je einer von den Prüffirmen Applus und Blohm & Voss) zum Einsatz. Für die mechanisierten Prüfungen kamen je ein Team des IZfP (zwei Prüfer) und der BAM (drei Prüfer) zum Einsatz. Alle Prüfer hatten mindestens eine Zertifizierung der Stufe 2 gemäß DIN EN 473 [34] in dem Verfahren Ultraschall. Als Prüfaufsicht wirkten je zwei Mitarbeiter des TÜV NORD und der MPA sowie je ein Mitarbeiter des TÜV Süd und der BAM mit. Diese Prüfer waren in der Stufe 3 gemäß DIN EN 473 zertifiziert.

### 5.2.4 Untersuchungsergebnisse

Für die Auswertung der Messergebnisse wurde von der BAM das allgemeine lineare Modell, welches die Verbindung zwischen Faktoren und Ausgangsvariablen beschreibt, verwendet. Die Größen, die einen Einfluss auf die Testergebnisse haben, werden Ausgangsvariable (Messgrößen der Ultraschallprüfungen) genannt, während diejenigen, die im Versuch kontrolliert und variiert werden, als Faktoren bezeichnet werden. Es wurden acht Faktoren definiert und vorab die postulierten Erwartungen hinsichtlich der Qualität der Prüfergebnisse (hohe Streuung entspricht minderer Qualität) formuliert. Nach ihrer Auswertung mit dem statistischen Modell kommt die BAM zu folgenden Ergebnissen:

Im Kapitel 3.1.1 (Seite 39) hat die BAM dargestellt, dass der Versuchsplan in den einzelnen Prüfkampagnen uneinheitlich (unbalanced) war. In der Prüfdurchführung seien Schwierigkeiten (ungleiche Prüfumfänge, fehlende Messwerte bei einzelnen Prüfern, zu kleine Stichprobe der Messungen) aufgetreten, die die Ergebnisse beeinflussten.

Die BAM kommt zu dem Ergebnis, dass der menschliche Faktor bei zerstörungsfreien Prüfungen in Kernkraftwerken von großer Bedeutung sei. Im speziellen habe sich gezeigt, dass mit steigendem Zeitdruck die Qualität der Prüfaussage beeinträchtigt war. Die vorliegende Untersuchung habe ebenfalls die Wichtigkeit der Organisation der Prüfungen, der Aufsicht und der Vorbereitung sowie die Exaktheit der Prüfanweisung gezeigt. Es habe sich erwiesen, dass die individuelle Wahrnehmung des Zeitdruckes zum großen Teil durch diese Faktoren beeinflusst war.

Klare Anweisungen und eine gute Vorbereitung hätten einen positiven Einfluss auf die Arbeitsweise der Prüfer und damit auch auf die Qualität der Prüfergebnisse. Ein Vergleich zwischen der mechanisierten Prüfung und der Handprüfung sei wegen der

kleinen Stichprobe und der unterschiedlichen Versuchsbedingungen kaum möglich gewesen.

**Tab. 23. Gegenüberstellung der postulierten Erwartungen an die Streuung der Ausgangsvariablen zu den im Untersuchungsvorhaben erzielten Ergebnisse**

Faktoren	Postulierte Erwartungen	Ergebnis
Prüfbedingung	Streuung wächst von A bis C	nicht bestätigt
Reihenfolge	Streuung fällt von 1 bis 3	nicht bestätigt
UT-Erfahrung	Mehr UT-Erfahrung – kleinere Streuung	überwiegend bestätigt
UT-Erfahrung in KKW	Mehr UT-Erfahrung in KKW – kleinere Streuung	überwiegend bestätigt
Stressresistenz	Mehr Stressresistenz – kleinere Streuung	nicht bestätigt
Stress-Reaktion	Größere Stress-Reaktion – größere Streuung	nicht bestätigt
Psychische Arbeitsbelastung	Größere psychische Arbeitsbelastung – größere Streuung	eindeutig bestätigt
Zeitliche Anforderungen	Größere zeitliche Anforderungen – größere Streuung	eindeutig bestätigt

Die Methode der Datenauswertung mit dem allgemeinen linearen Modell habe sich als geeignet gezeigt. Trotz fehlender Messwerte und nicht optimaler Versuchsplanung seien die Ergebnisse der Datenanalyse wertvoll und informativ.

### 5.3 Bewertungsmaßstäbe

Maßstab unserer Bewertung der Ergebnisse des Untersuchungsvorhabens sind unsere Kenntnisse und langjährigen Erfahrungen bei wiederkehrenden zerstörungsfreien Prüfungen in Kernkraftwerken und bei Fertigungsprüfungen von kerntechnischen Komponenten sowie unsere Erfahrungen bei der Mitwirkung bei der Anpassung des kerntechnischen Regelwerks (KTA 3201, KTA 3211) an den weiterentwickelten Stand von Wissenschaft und Technik. Hervorzuheben sind hier die folgenden Punkte:

In der kürzlich herausgegebenen Regel KTA 3201.3, Fassung 11/07 „Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren; Teil 3: Herstellung“ [41] wurden folgende, zum Teil neue Festlegungen für das Prüfpersonal bei Fertigungsprüfungen getroffen:

#### „3.3.5 Prüfaufsicht und Prüfer für zerstörungsfreie Prüfungen

##### 1. Die Prüfaufsicht muss

- a) über das für ihre Aufgaben erforderliche Wissen verfügen sowie die Anwendungsmöglichkeiten und -grenzen der Prüfverfahren kennen,

- b) Grundkenntnisse über die angewandten Fertigungsverfahren und charakteristischen Erscheinungsformen herstellungsbedingter Unregelmäßigkeiten besitzen. Sie soll von der Fertigung unabhängig sein und muss dem Sachverständigen benannt werden. Die Prüfaufsicht ist für die Anwendung des Prüfverfahrens und für die Einzelheiten der Prüfdurchführung gemäß den hierfür maßgebenden Regelungen verantwortlich. Sie ist für den Einsatz qualifizierter und zertifizierter Prüfer verantwortlich. Dies gilt auch bei Einsatz von betriebsfremdem Personal. Die Prüfaufsicht hat den Prüfbericht zu unterzeichnen.
2. Die Prüfaufsicht muss für die zur Anwendung kommenden Prüfverfahren in den zutreffenden Produkt- oder Industriesektoren entsprechend DIN EN 473 mindestens in Stufe 2 qualifiziert und zertifiziert sein. Für die Prüfverfahren RT und UT ist eine Qualifizierung und Zertifizierung in Stufe 3 erforderlich.
  3. Die Prüfer müssen in der Lage sein, die in den Abschnitten 10.3.7 und 12 beschriebenen Prüfungen durchzuführen. Sie müssen für das zur Anwendung kommende Prüfverfahren im zutreffenden Produkt- oder Industriesektor entsprechend DIN EN 473 qualifiziert und zertifiziert sein. Für die Prüfverfahren RT und UT ist eine Qualifizierung und Zertifizierung mindestens in Stufe 2 erforderlich.
  4. Die Prüfaufsicht und die Prüfer müssen den Nachweis zufriedenstellender Sehfähigkeit, die durch einen Augenarzt, Augenoptiker oder eine sonstige medizinisch anerkannte Person ermittelt wurde, in Übereinstimmung mit DIN EN 473 erbringen. Die Sehfähigkeit muss jährlich überprüft werden.“

In der sich zurzeit in Überarbeitung befindlichen Regel KTA 3201.4 (Entwurfsvorschlag 02/2009) [42] sind folgende Formulierungen bezüglich der Arbeitsbedingungen bei zerstörungsfreien wiederkehrenden Prüfungen im Abschnitt 7 (Vorbereitung und Durchführung der Prüfungen) enthalten:

„Die Arbeitsbedingungen bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Prüfungen (z. B. Zeitdruck, Umgebungstemperatur, Lärm, Strahlung) sollen so gestaltet sein, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden. In den Kernkraftwerksrevisionen sind Zeitrahmen und Abfolge der Prüfungen an den Komponenten der Druckführenden Umschließung dementsprechend einzuplanen.“

## 5.4 Stellungnahme

### 5.4.1 Untersuchungsergebnisse

Die Prüfaufgaben, die den Prüfern gestellt wurden – Auffinden von Reflektoren und Ermittlung der Amplituden, Ortskoordinaten und Längenerstreckungen – waren typisch für Prüfaufgaben bei wiederkehrenden Ultraschallprüfungen in Kernkraftwerken. Eingesetzt wurden erfahrene Prüfer, die mit diesen Aufgaben vertraut waren.

Der Einfluss des menschlichen Faktors auf die Qualität der zerstörungsfreien Prüfung (Maßstab ist die Streuung der Messwerte der Ultraschallprüfung, wobei eine hohe Streuung einer verminderten Qualität entspricht) wurde anhand von acht Faktoren (siehe Tab. 10, Seite 33) mit dem allgemeinen linearen Modell ausgewertet und quantifiziert. Einschränkungen der Aussagekraft der Ergebnisse liegen in der zu kleinen Anzahl der Prüfer und in z. T. unvollständigen Datensätzen. Der Faktor „Zeitdruck“ war nach unserer Einschätzung leider nicht scharf genug differenziert; die zur Verfügung stehende kürzeste Prüfzeit hat bei den erfahrenen Prüfern zu keinen gravierenden Qualitätseinbußen der Prüfergebnisse geführt. Die durchgeführten mechanisierten Ultraschallprüfungen lassen wegen unterschiedlicher Versuchsbedingungen und der geringen Anzahl einen Leistungsvergleich mit den manuellen Ultraschallprüfungen nicht zu.

Relevant und für die Prüfpraxis aufschlussreich ist der erhebliche Einfluss einer nicht optimalen Organisation der Prüfungen und dessen Ablaufs. Wenn nach der subjektiven Einschätzung der Teilnehmer die Prüfaufgaben nicht genau definiert, die Arbeitsunterlagen widersprüchlich und nicht handhabbar sowie die Arbeitsbedingungen (Beleuchtung, Gerüste) unzulänglich sind und vor allem, wenn die Prüfer nicht ausreichend in die Aufgabenstellung eingewiesen worden sind, nimmt die Qualität der Prüfergebnisse deutlich messbar ab. In den ersten beiden Prüfkampagnen waren nach der Einschätzung der Teilnehmer die Prüfaufgaben nicht genau definiert, die Arbeitsunterlagen widersprüchlich und nicht handhabbar sowie die Arbeitsbedingungen (Beleuchtung, Gerüste) unzulänglich. Vor allem waren die Prüfer nicht in die Aufgabenstellung speziell eingewiesen worden. In den nachfolgenden Prüfkampagnen wurden diese Unzulänglichkeiten abgestellt. Ein wichtiges Ergebnis ist, dass die Streuung der Ultraschallmesswerte (Amplitude und Positionsangaben der Reflektoren) vom subjektiv empfundenen Zeitdruck und der Arbeitsbelastung beeinflusst wird. Der Faktor „Psychische Arbeitsbelastung“ – subjektiv so empfunden – hat einen eindeutig negativen Einfluss auf die Qualität der Prüfungen. Wie im Kapitel 3 dargestellt, haben daher die umfassende Vorbereitung der Prüfungen und die Kommunikation zwischen der „Organisation“ (Prüfaufsichten des Betreiber, der Prüffirmen und der Sachverständigenorganisation) und den Prüfern eine hohe Bedeutung für die Qualität der Prüfergebnisse.

Das im Rahmen des Vorhabens angewendete allgemeine lineare Modell und die Erkenntnisse aus den psychologischen Betrachtungen sehen wir als geeignete Grundlage für weitere Untersuchungen des Einflusses von Faktoren auf die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen an. Da der Aufwand für Prüfkampagnen am MPA-Großbehälter sehr hoch ist, schlagen wir vor, derartige Untersuchungen auch an transportablen Rohren mit einfachen Schweißnahtgeometrien durchzuführen. Die Prüfgegenstände könnten dann zu unterschiedlichen Einsatzorten gebracht

werden. Dort könnten zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten verschiedene Einflussfaktoren (z. B. Wärme, Kälte, Dunkelheit, beengte Räume, Prüfen unter Atemmasken) simuliert werden. Der Einfluss verschiedener Faktoren aus solchen Untersuchungen kann mit den aus dem Vorhaben SR 2514 erzielten Auswertemethoden ermittelt werden.

### 5.4.2 Prüfpraxis in Kernkraftwerken

Um aus den Ergebnissen des Untersuchungsvorhabens SR 2514 entsprechend unserer Aufgabenstellung Empfehlungen für die Prüfpraxis und für das kerntechnische Regelwerk abgeben zu können, soll zunächst die bestehende Prüfpraxis an den entsprechenden Anforderungen der KTA-Regeln (KTA 3201.3 (11/07) [41] und KTA 3201.4 (RAEV 2/09)) [42] (siehe Kapitel 5.3) gespiegelt werden.

Im Rahmen der **Herstellung** erfolgen zerstörungsfreie Prüfungen nach den Vorgaben der KTA-Regeln 3201.3 (Druckführende Umschließung) [41], und 3211.3 (Äußere Systeme).

Die KTA-Regel 3201.3, Fassung 11/07 [41], liegt mit dem jüngsten Ausgabedatum vor (siehe auch Kapitel 5.3).

Die Prüfer des Herstellers, der Prüffirma und des Sachverständigen müssen für das zur Anwendung kommende Prüfverfahren entsprechend DIN EN 473 [34] qualifiziert und zertifiziert sein. Die jeweiligen Prüfaufsichten sind für die Anwendung des Prüfverfahrens und für die Einzelheiten der Prüfdurchführung sowie für den Einsatz qualifizierter und zertifizierter Prüfer verantwortlich und müssen ebenfalls entsprechend DIN EN 473 qualifiziert und zertifiziert sein. Für die Prüfverfahren RT und UT ist eine Qualifizierung und Zertifizierung in Stufe 3 erforderlich. Die einzelnen Fertigungs- und Prüfschritte erfolgen gemäß einem Bauprüfplan. Die Durchführung der Prüfungen ist für die speziellen Bauteilkonstruktionen in Prüfspezifikationen festgelegt. Für die Erprobung und Überprüfung der Eignung der eingesetzten Ultraschallprüftechnik stehen in der Regel Vergleichskörper, hergestellt aus Arbeitsproben, zur Verfügung. Die zerstörungsfreien Prüfungen, insbesondere auch die manuellen Ultraschallprüfungen, erfolgen unabhängig durch Prüfer des Herstellers und des Sachverständigen nach §20 AtG (Zweifachprüfung). Mechanisierte Ultraschallprüfungen werden durchgeführt, wenn eine Basisprüfung für spätere wiederkehrende Prüfungen erforderlich ist. In diesem Fall führt eine Prüffirma im Auftrag des Betreibers die Prüfung und Auswertung der Ergebnisse durch. Der Sachverständige kontrolliert die Durchführung der Prüfung und nimmt eine eigenständige Auswertung der Ergebnisdokumentation vor.

Bei **wiederkehrenden Prüfungen** erfolgen zerstörungsfreie Prüfungen nach den Vorgaben der KTA-Regeln 3201.4 (Druckführende Umschließung), und 3211.4 (Äußere Systeme). Die KTA 3201.4 wird derzeit überarbeitet und liegt als Regeländerungsentwurfsvorschlag 02/2009 vor. Darin ist festgelegt, dass die zerstörungsfreien Prüfungen entsprechend den DIN-Normen der Reihe DIN 25435 [33] durchzuführen sind; dort sind Anforderungen an die Prüfdurchführung und an die Qualifikation des Prüfpersonals festgelegt, die mit den Anforderungen der Fertigungsprüfungen gemäß KTA 3201.3 [41] weitgehend übereinstimmen.

Der Betreiber ist für die termingerechte Durchführung gemäß kraftwerksspezifischem Prüfhandbuch verantwortlich und beauftragt damit in der Regel eine Prüffirma. Bei

manuellen Prüfungen darf die Prüfung durch den Betreiber entfallen, wenn es im Rahmen seiner Sachverständigentätigkeit zur Bewertung der Prüfergebnisse erforderlich ist, dass der Sachverständige diese Prüfung selbst durchführt (siehe Abschnitt 10 der KTA Regel). Eine zweifach unabhängige Prüfung ist bei manuellen Ultraschallprüfungen nicht zwingend gefordert, obwohl insbesondere hier gilt, dass der Prüfer auf sich allein gestellt eine Augenblicksentscheidung über die Relevanz von Anzeigen treffen muss, die mangels Datenaufzeichnung von anderen nicht nachgeprüft werden kann, es sei denn, dass eine erneute Ultraschallprüfung erfolgt.

In Abschnitt 7 des Regelentwurfs (siehe Kapitel 5.3) wird der Betreiber aufgefordert, die Arbeitsbedingungen bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Prüfungen (z. B. Zeitdruck, Umgebungstemperatur, Lärm, Strahlung) so zu gestalten, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden, und in den Kernkraftwerksrevisionen den Zeitrahmen und die Abfolge der Prüfungen dementsprechend einzuplanen. Diese Formulierung stellt eher einen Appell an die Verantwortlichen dar und ist keine verbindliche Festlegung.

Kernkraftwerksrevisionen sind gekennzeichnet durch enge Terminvorgaben für die einzelnen Arbeiten. Die Abläufe der zerstörungsfreien Prüfungen müssen sich diesen Gegebenheiten anpassen, allerdings darf die Qualität der Prüfergebnisse nicht beeinträchtigt werden. In dem Untersuchungsvorhabens SR 2514 wurde ein nicht unerheblicher Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen bei nicht optimaler Organisation der Prüfungen aufgezeigt. Möglichkeiten zur Minimierung eines negativen Einflusses sehen wir in einer verbesserten Planung des Prüfablaufs und einer verbesserten Kommunikation zwischen der „Organisation“ (Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirmen und der Sachverständigenorganisation) und den Prüfern. Speziell bei Ultraschallprüfungen schlagen wir folgenden Maßnahmen vor:

- Umfassende Vorbereitung und Einweisung der Prüfer in die spezielle Prüfaufgabe (z. B. Nachweis von Korrosionsrissen mit spezieller Rissmorphologie) und Prüfrandbedingungen (z. B. erschwerte Zugänglichkeit, Arbeiten unter Atemschutz und Dosisbelastung). Die Prüfer sollen vor dem Prüfeinsatz an Vergleichskörpern trainieren können und die Fähigkeit, die Prüfaufgabe erfüllen zu können, anhand von Testmessungen nachweisen.
- Stärkung der Verantwortung der Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirma und der Sachverständigenorganisation. Sie sollen gegenüber den Verantwortlichen für die Revisionsplanung die Belange einer ordnungsgemäßen Prüfdurchführung durchsetzen, die sicherstellen, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden. Nach Abschluss der Prüfungen sollen die Prüfaufsichten mit ihrer Unterschrift auf dem Prüfbericht bestätigen, dass die hier genannten Bedingungen eingehalten wurden.
- Bei wiederkehrenden Prüfungen im Geltungsbereich der KTA 3201.4 sind manuelle Prüfungen als Zweifachprüfung durchzuführen, d.h. es hat eine eigenständige Prüfung und Bewertung durch Prüfer der Prüffirma bzw. des Betreibers und durch Prüfer des Sachverständigen nach §20 AtG zu erfolgen.

## 5.5 Empfehlungen

Zur Umsetzung der vorgenannten Maßnahmen im Regelwerk, speziell in der Regel KTA 3201.4 [42], schlagen wir folgende Formulierungen vor:

Abschnitt 7	Vorbereitung und Durchführung von Prüfungen
<b>7.1</b>	<b>Allgemeines</b>
teilweise neu	Die Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirmen und des Sachverständigen haben eine ordnungsgemäße Prüfdurchführung sicherzustellen, damit die Arbeitsbedingungen bei Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Prüfungen (z. B. Zeitdruck, Umgebungstemperatur, Lärm, Strahlung) so gestaltet sind, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden. In den Kernkraftwerksrevisionen sind Zeitrahmen und Abfolge der Prüfungen an den Komponenten der Druckführenden Umschließung dementsprechend einzuplanen. Nach Abschluss der Prüfungen haben die Prüfaufsichten mit ihrer Unterschrift auf dem Prüfbericht zu bestätigen, dass die hier genannten Bedingungen eingehalten wurden.
<b>7.2</b>	<b>Vorbereitung</b>
neu (4)	Das Prüfpersonal der zerstörungsfreien Prüfungen ist in die spezielle Prüfaufgabe, in die Erscheinungsformen betrieblicher Fehler und in die vorliegenden Prüfrandbedingungen (z. B. Bauteilgeometrie, erschwerte Zugänglichkeit, Arbeiten unter Atemschutz und Dosisbelastung) einzuweisen. Die Prüfer sollen vor dem Prüfeinsatz an Vergleichskörpern trainieren und die Fähigkeit, die Prüfaufgabe erfüllen zu können, anhand von Testmessungen nachweisen.
Abschnitt 10	Beteiligung bei wiederkehrenden Prüfungen und der Betriebsüberwachung
neu (3) anstelle alt (3):	Manuelle Prüfungen (UT, MT, PT, VT, ET) haben als Zweifachprüfungen zu erfolgen. Von den Prüfern der Prüffirma (oder des Betreibers) und von den Prüfern des Sachverständigen nach §20 AtG sind die Prüfungen und Bewertungen eigenständig vorzunehmen.

In die KTA-Regel 3211.4, deren Überarbeitung bevorsteht, sollten vergleichbare Regelungen aufgenommen werden.

## 6 Schlussfolgerungen

Kernkraftwerksrevisionen sind gekennzeichnet durch enge Terminvorgaben für die einzelnen Arbeiten. Die Abläufe der zerstörungsfreien Prüfungen müssen sich diesen Gegebenheiten anpassen, allerdings darf die Qualität der Prüfergebnisse nicht beeinträchtigt werden. In dem Untersuchungsvorhabens SR 2514 wurde ein großer Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen bei nicht optimaler Organisation der Prüfungen aufgezeigt.

Die Untersuchungsmethode war geeignet, um die Bedingungen der Prüfpraxis nachzubilden, d.h. die Prüfaufgaben waren typisch für Prüfaufgaben bei wiederkehrenden Ultraschallprüfungen in Kernkraftwerken. Bei der Untersuchung wurden nur erfahrene Prüfer eingesetzt. Das allgemeine lineare Modell ermöglichte eine differenzierte Auswertung des Einflusses des menschlichen Faktors auf die Qualität der zerstörungsfreien Prüfung.

Relevant und für die Prüfpraxis aufschlussreich ist der erhebliche Einfluss einer nicht optimalen Organisation auf die Prüfung und deren Ablauf. Besonders wichtig ist der leistungsmindernde Einfluss des subjektiv empfundenen Zeitdrucks und der Arbeitsbelastung auf die Prüfung. Wenn nach der subjektiven Einschätzung der Teilnehmer die Prüfaufgaben nicht genau definiert, die Arbeitsunterlagen widersprüchlich und nicht handhabbar sowie die Arbeitsbedingungen unzulänglich sind und vor allem, wenn die Prüfer nicht ausreichend in die Aufgabenstellung eingewiesen worden sind, nimmt die Qualität der Prüfergebnisse deutlich ab.

Möglichkeiten zur Minimierung eines negativen Einflusses sehen wir in einer verbesserten Planung des Prüfablaufs und einer verbesserten Kommunikation zwischen der „Organisation“ (Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirmen und der Sachverständigenorganisation) und den Prüfern. Speziell bei Ultraschallprüfungen schlagen wir folgenden Maßnahmen vor:

- Umfassende Vorbereitung und Einweisung der Prüfer in die spezielle Prüfaufgabe (z. B. Nachweis von Korrosionsrissen mit spezieller Rissmorphologie) und Prüfrandbedingungen (z. B. erschwerte Zugänglichkeit, Arbeiten unter Atemschutz und Dosisbelastung). Die Prüfer sollen vor dem Prüfeinsatz an Vergleichskörpern trainieren können und die Fähigkeit, die Prüfaufgabe erfüllen zu können, anhand von Testmessungen nachweisen.
- Stärkung der Verantwortung der Prüfaufsichten des Betreibers, der Prüffirma und der Sachverständigenorganisation. Sie sollen gegenüber den Verantwortlichen für die Revisionsplanung die Belange einer ordnungsgemäßen Prüfdurchführung durchsetzen, die sicherstellen, dass negative Auswirkungen auf die Qualität der Prüfung vermieden werden. Nach Abschluss der Prüfungen sollen die Prüfaufsichten mit ihrer Unterschrift auf dem Prüfbericht bestätigen, dass die hier genannten Bedingungen eingehalten wurden.
- Bei wiederkehrenden Prüfungen im Geltungsbereich der KTA 3201.4 sind manuelle Prüfungen als Zweifachprüfung durchzuführen, d.h. es hat eine eigenständige Prüfung und Bewertung durch Prüfer der Prüffirma bzw. des Betreibers und durch Prüfer des Sachverständigen nach §20 AtG zu erfolgen.

Das im Rahmen des Vorhabens angewendete allgemeine lineare Modell und die Erkenntnisse aus den psychologischen Betrachtungen sehen wir als geeignete

Grundlage für weitere Untersuchungen des Einflusses von Faktoren auf die Zuverlässigkeit zerstörungsfreier Prüfungen an.

Da der Aufwand für Prüfkampagnen am MPA-Großbehälter sehr hoch ist, schlagen wir vor, derartige Untersuchungen auch an transportablen Rohren mit einfachen Schweißnahtgeometrien durchzuführen. Die Prüfgegenstände könnten dann zu unterschiedlichen Einsatzorten gebracht werden. Dort könnten zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten verschiedene Einflussfaktoren (z. B. Wärme, Kälte, Dunkelheit, beengte Räume, Prüfen unter Atemmasken) simuliert werden. Der Einfluss verschiedener Faktoren aus solchen Untersuchungen kann mit den aus dem Vorhaben SR 2514 erzielten Auswertemethoden ermittelt werden.

## Danksagung

Wir möchten an dieser Stelle unseren herzlichen Dank an Herrn Dr. Mletzko (MPA), der vor Beendigung des Projektes in den Ruhestand getreten ist, für seinen langjährigen Einsatz für das Projekt gemeinsam mit Professor Erhard (BAM), zum Ausdruck bringen.

Herrn Prof. Wilpert† danken wir für die wertvollen theoretischen Beiträge bei der Entwicklung des Untersuchungsmodells. Herrn Prof. Manzey, TU Berlin, sei für seine methodischen Hinweise auf dem Gebiet der Arbeitspsychologie gedankt.

Unser besonderer Dank gilt Q Techna, dem “Institute of Quality Assurance and Quality Control Ltd”, Slowenien, für die kostenlose Teilnahme unserer Mitarbeiter am Ultraschallkurs Stufe 2. Ebenso möchten wir uns herzlich beim Kernkraftwerk Krško (NEK), Slowenien, für seine Kooperationsbereitschaft in diesem Kontext bedanken.

Dem KKW Brokdorf danken wir für die außerordentliche Möglichkeit, Vor-Ort-Arbeitsbedingungen kennen zu lernen, und Herrn Mohr von der Fa. IntelligeNDT für seine hilfreichen Hinweise.

Herrn Dr. Gersinska (BfS) danken wir für die unterstützende Begleitung des Projekts.

## Referenzen

- [1] Bertovic, M., Gaal, M., Mletzko, U., Zickler, S., Müller, C., Schombach, D., Strodl, G., Brekow, G. & Rosenthal, C. (2008). *Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse; Bericht zum Arbeitspaket 1*. Unveröffentlicht.
- [2] Enkvist, J. (2003). *A Human Factors Perspective on Non-Destructive Testing (NDT): Detection and Identification of Cracks*. Doctoral dissertation submitted at the Stockholm University, Department of Psychology.
- [3] Enkvist, J., Edland, A., & Svenson, O. (1999). *Human factors aspects of non-destructive testing in the nuclear power context*. A review of research in the field. Stockholm: SKI Report No. 99:8.
- [4] Enkvist, J., Edland, A., & Svenson, O. (2000). *Operator Performance in Non-Destructive Testing: A Study of Operator Performance in a Performance Test*. Stockholm: SKI-Report 00:26.
- [5] Enkvist, J., Edland, A., & Svenson, O. (2001). *Effects of operator time pressure and noise on manual ultrasonic testing*. Stockholm: SKI Report No. 01:48.
- [6] Erdmann, G. & Janke, W. (2007). *Handbuch zum Stressverarbeitungsfragebogen (SVF): Stress, Stressverarbeitung und ihre Erfassung durch ein mehrdimensionales Testsystem*. Göttingen: Hogrefe.
- [7] Fahlbruch, B. & Wilpert, B. (1997). Event analysis as problem solving process. In A. R. Hale, B. Wilpert, & M. Freitag (Eds.), *After the Event: From accident to organisational learning* (pp. 113-130). Amsterdam: Elsevier.
- [8] Fahlbruch, B., & Wilpert, B. (1999). System safety - an emerging field for i/o psychology. In C. L. Cooper & I. T. Robertson (Eds.), *International review of industrial and organizational psychology* (Vol. 14, pp. 55-94). Chichester: Wiley.
- [9] Fücsök, F.; Müller, C. & Scharmach, M. (2005). Measuring of the Reliability of NDE. Paper presented at *The 8th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing „Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering”*, September 1-3, 2005, Portoroz, Slovenia.
- [10] Gaal, M.; Bertovic, M; Müller, C.; Spokoiny, V. & Fahlbruch, B. (2009). *Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse; Bericht zum Arbeitspaket 4*. Unveröffentlicht.
- [11] Hancock, P.A. (1984). Environmental Stressors. In Warm, J.S. (ed.) *Sustained Attention In Human Performance*. New York: John Wiley & Sons.
- [12] Harris, D.H. & McCloskey, B.P. (1990) *Cognitive correlates of ultrasonic inspection performance*. EPRI Report NP-6675.

- [13] Harris, D.H. (1990). Effect of human information processing on the ultrasonic detection of intergranular stress-corrosion cracking. *Materials Evaluation*, 48, 475-480.
- [14] Harris, D.H. (1992) *Effect of Decision Making on Ultrasonic Examination Performance*. EPRI Report TR-100412
- [15] Hart, S. G. & Staveland, L. E. (1988) Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research. In P. A. Hancock and N. Meshkati (Eds.) *Human Mental Workload*. Amsterdam: North Holland Press.
- [16] Heasler, P.G.; Taylor, T.T.; Spanner, J.C.; Doctor, S.R. & Deffenbaugh, J. D. (1990) *Ultrasonic Inspection Reliability for Intergranular Stress Corrosion Cracks, A Round Robin Study of the Effects of Personnel, Procedures, Equipment and Crack Characteristics*. NUREG/CR-4908, PNL-6196
- [17] Hwang, S.-L., Yau, Y.-J., Lin, Y.-T., Chen, J.-H., Huang, T.-H., Yenn, T.-C. and Hsu, C.-C. (2008). Predicting work performance in nuclear power plants. *Safety Science*, 46, p. 1115–1124.
- [18] J. Andres (1996). Das allgemeine lineare Modell. In Edgar Erdfelder, Rainer Mausfeld, Thorsten Meiser & Georg Rudinger (Hrsg.), *Handbuch quantitative Methoden*, (S.185-200); Weinheim: Belz.
- [19] Janke, W. & Erdmann, G. (2002). *SVF 78: Eine Kurzform des Stressverarbeitungsfragebogens SVF 120. Kurzbeschreibung und Grundlegende Kennwerte. Manual*. Göttingen: Hogrefe.
- [20] Janke, W., Hüppe, M. & Erdmann, G. (2002). *Befindlichkeitskalibrierung anhand von Kategorien und Eigenschaftswörtern (BSKE(EWL))*. Unveröffentlicht. Copyright: W.Janke, Verlag für Psychologie Göttingen 2003.
- [21] Jelinek, T.; Tidström, L.; Brickstad, B. (2005) *Probability of Detection for the Ultrasonic Technique according to the UT-01 Procedure*. Stockholm: SKI Report 2005:03.
- [22] Kadenko, I.; Sakhno, N. & Sergeev, I. (2007) Human Factor Estimation for ET Results Reliability of SG Tubes of NPPs with VVER. *6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, 8 - 10 October 2007; Budapest, Ungarn
- [23] Kadenko, I.; Sakhno, N. & Yermolenko, R. (2007). Increasing Results Reliability for SG Tubes of NPPs with VVER based on Experimental Assessment of Human Factor. *6th International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*, 8 - 10 October 2007; Budapest, Ungarn
- [24] Kettunen, J. & Norros, L. (1996). *Human and Organizational Factors Influencing the Reliability of Non-Destructive Testing. An international literary survey*. Helsinki: STUK-YTO-TR 103.
- [25] Kettunen, J. (1997). *Beliefs Concerning the Reliability of Nuclear Power Plant In-Service Inspections*. Helsinki: STUK-YTO-TR 121.
- [26] Klein, D. (1990). Stressreaktionen bei Industriearbeiten: Arbeitsplatz-

belastung und koronares Risiko. Frankfurt: Campus Verlag.

- [27] McGrath, B. A. (1999) *Programme for the Assessment of NDT in Industry*. AEA Technology plc.
- [28] McGrath, B. A. (2008) *Programme for the Assessment of NDT in Industry, PANI 3*. Report Nr.RR617.
- [29] Murgatroyd, R.A.; Chapman, R.K; Crutzen, S.; Seed, H.; Willetts, A.J. & Worall, G.M. (1994) *Human Reliability in Inspection. Final report on Action 7 in the PISC 3 Programme. PISC 3 Report n°31*. Joint Research Centre.
- [30] Nockemann, C.; Nickisch, S.; Schnitger, D.; Tillack, G.-R.; Wessel, H. & Zscherpel, U. (1995). Zuverlässigkeitsuntersuchung der Durchstrahlungsprüfung von austenitischen Rohrschweißnähten. In *Proceedings of the yearly symposium of the German Society for Nondestructive Testing "DGZfP-Jahrestagung 1995"*.
- [31] Nockemann, C.; Tillack, G.R. & Schnitger, D. (1994). Statistical Assessment within a Global Conception of Reliability of NDE. Paper presented on *Joint CEC OECD IAEA Specialists Meeting on Non-Destructive Examination Practice and Results: State of the art and PISC 3 Results*, March 8-10, 1994, Petten, Netherlands.
- [32] Nockemann, C.; Tillack, G.-R.; Bellon, C. & Heidt, H. (1994). Kann man mit der ROC Methode die Personaleignung für konkrete Prüfaufgaben objektiv und mit vertretbarem Aufwand beurteilen? In *Proceedings of the yearly symposium of the German Society for Nondestructive Testing "DGZfP-Jahrestagung 1994"*
- [33] Norm DIN 25435-1 (2005-09): *Wiederkehrende Prüfungen der Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren*. Teil 1: Mechanisierte Ultraschallprüfung.
- [34] Norm DIN EN 473 (Deutsche Fassung EN 473:2008): *Zerstörungsfreie Prüfung - Qualifizierung und Zertifizierung von Personal der zerstörungsfreien Prüfung - Allgemeine Grundlagen*.
- [35] Norros, L. & Kettunen, J. (1998). *Analysis of NDT-inspectors working practices*. Helsinki: STUK-YTO-TR 147.
- [36] Ortner, T.M. & Janous, G. (2006). Zur Nützlichkeit des Einsatzes eines Objektiven Persönlichkeitstests für die Auswahl von Fachhochschulstudierenden. In T.M. Ortner, R.T. Proyer, & K.D. Kubinger, (Hrsg.) (2006). *Theorie und Praxis Objektiver Persönlichkeitstests*, 244-253. Bern: Hans Huber.
- [37] Pond, D.J., Donohoo, D.T., & Harris, Jr., R.V. *An Evaluation of Human Factors Research for Ultrasonic In-service Inspection*. NUREG/CR-6605, PNNL-11797. 1998.
- [38] R Development Core Team (2006). *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- [39] Reaktorsicherheitskommission. *Anpassung und Optimierung von zerstörungsfreien Prüfungen an den sicherheitstechnisch bedeutsamen Systemen und Komponenten*. Stellungnahme der RSK vom 11.04.2002.

- [40] Reason, J. (1993). Managing the management risk: New approaches to organisational safety. In B. Wilpert & T. Quale (Eds.), *Reliability and Safety in Hazardous Work Systems: Approaches to Analysis and Design* (pp. 7-21). Hove, UK: Lawrence Erlbaum.
- [41] Regel KTA 3201.3 (Fassung 2007-11).: *Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren*. Teil 3: Herstellung
- [42] Regel KTA 3201.4 (Fassung 1999-06; Entwurfsvorschlag 2009-03): *Komponenten des Primärkreises von Leichtwasserreaktoren*. Teil 4: Wiederkehrende Prüfungen und Betriebsüberwachung und Regeländerungs.
- [43] Salvendy, G. (ed.) (1997). *Handbook of human factors and ergonomics*. New York: John Wiley & Sons.
- [44] Schmittke, H. (1993). *Ergonomie*. 3. Auflage. München: Hanser.
- [45] Shepherd, B., Goujon, S. & Whittle, J. (2007). *Link between RI-ISI and Inspection Qualification: Relationship between Defect Detection Rate and Margin of Detection*. Stockholm: SKI Report 2007:04
- [46] Spanner, J. & Harris, D. H. (1999). Human factor developments in computer based training and personnel certification. In *Proceedings of the First International Conference on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components*. 20-22 October 1998 – Amsterdam, the Netherlands. Held by the Joint Research Centre of the European Commission. pp 149-165. Woodhead Publishing Limited.
- [47] Stanton, N.A., Salmon, P.M., Walker, G.H., Baber, C. & Jenkins, D.P. (2005). *Human Factors Methods. A Practical Guide For Engineering and Design*. Hampshire: Ashgate Publishing Limited.
- [48] StatSoft, Inc. (2006). *STATISTICA (data analysis software system), version 7.1*. www.statsoft.com.
- [49] Stephens, Jr, H.M. *NDE Reliability – Human Factors – Basic Consideration*. EPRI. Published at *15th WCNDT*, Rome, 2000. Available at [www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn736/idn736.htm](http://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn736/idn736.htm).
- [50] Svenson, O. & Maule, A.J. (ed.) (1993) *Time pressure and stress in human judgement and decision making*. New York: Plenum Press.
- [51] Swain, A.D. & Guttmann, H.E. (1983). *Handbook of human reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications*. NUREG/CR-1278.
- [52] Taylor, N., Faigy, C. & Gilles, P. (ed.) (2006). *Assessment of Dissimilar Weld Integrity – Final Report of the NESC-III Project*. European Commission, Joint Research Centre, EUR 22510 EN.
- [53] Tidström, L., Jelinek, T. & Brickstad, B. *How to Extract POD-Information from Qualification Data*. Internal document. Swedish Nuclear Power Inspectorate, Sweden.
- [54] Wilpert, B. & Fahlbruch, B. (1998). Safety related interventions in inter-organisational fields. In A. Hale & M. Baram (Eds.), *Safety Management: The challenge of change* (pp. 235-248). Amsterdam: Elsevier.

- [55] Yerkes, R.M. & Dodson, J.D. (1908). The Relation of Strength of Stimulus to Rapidity Of Habit-Formation. *Journal of Comparative Neurology and Psychology*, 18, 459-482.
- [56] Zickler, S., Gaal, M., Bertovic, M., Müller, C. & Fahlbruch, B. (2008). *Untersuchungen zum Einfluss menschlicher Faktoren auf das Ergebnis von zerstörungsfreien Prüfungen, Möglichkeiten zur Minimierung dieses Einflusses und Bewertung der Prüfergebnisse; Bericht zu Arbeitspaketen 2 und 3*. Unveröffentlicht.

# | Verantwortung für Mensch und Umwelt |

**Kontakt:**

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: [www.bfs.de](http://www.bfs.de)

E-Mail: [ePost@bfs.de](mailto:ePost@bfs.de)

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



**Bundesamt für Strahlenschutz**