

# Schlussbericht

---

zu IGF-Vorhaben Nr. 18424 N

## Thema

Festlegung von Zähigkeitshochlagenanforderungen an Stahl mit Hilfe hybrider schädigungsmechanischer Methoden

## Berichtszeitraum

01.11.2014 - 31.01.2018

## Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Stahlanwendung e.V. (FOSTA)

## Forschungseinrichtung(en)

Institut für Stahlbau, RWTH Aachen University

Institut für Eisenhüttenkunde, RWTH Aachen University

Aachen, 02.07.2018

  
Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann

Aachen, 02.07.2018

  
Prof. Dr.-Ing. Sebastian Münstermann

---

Ort, Datum

---

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der  
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

## Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Hochlagenanforderungen an Stahl als verbessertes AUBI-Ersatzkriterium“, IGF-Projekt Nr. 18424N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

## Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Zur Bearbeitung des Projektes wurden am Institut für Stahlbau 30 Monate sowie am Institut für Eisenhüttenkunde 28,2 Monate wissenschaftlich-technisches Personal (A1) eingesetzt. Die Arbeiten wurden gemäß dem Forschungsantrag durchgeführt. Die für das Forschungsprojekt geleisteten Arbeiten waren angemessen und zur Erreichung des Forschungszieles notwendig.

Es wurden keine Geräte in Höhe von 7.983,13 € beschafft und Leistungen Dritter in Höhe von 12.988,- € herangezogen.

## Angaben über gewerbliche Schutzrechte

Es wurden im Rahmen des vorliegenden Projektes keine gewerblichen Schutzrechte erworben. Eine Anmeldung eines gewerblichen Schutzrechtes ist nicht beabsichtigt.

## Kurzzusammenfassung

Neben dem Sicherheitsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit, der mit der Grundannahme duktilen Werkstoffverhaltens geführt wird, erfordert der Tragfähigkeitsnachweis für Stahlbauten in EC3 zusätzlich die Stahlsortenwahl nach DIN EN 1993-1-10 bzw. DAST-RiLi 009, um Sprödbruch zu vermeiden. Die Stahlsortenwahl wird zusammen mit den Anforderungen aus dem Zugversuch auch als Gewährleistung für duktilen Werkstoffverhalten angesehen.

Als weiterer Zähigkeitsnachweis in der Hochlage existiert in Deutschland noch der Aufschweißbiegeversuch nach SEP 1390 zur Beurteilung des qualitativen Rissauffangvermögens des Stahlgrundwerkstoffs, welcher in der Regel derzeit für geschweißte Stahlkonstruktionen für Stahlsorten bis S355J2 bei Blechdicken größer 30 mm gefordert wird. Im Zuge der Harmonisierung Europäischer Normen wurde der AUBI jedoch nicht von den übrigen EU-Mitgliedsländern akzeptiert. Anstelle dessen wurde ein tieflagenorientiertes Ersatzkriterium eingeführt, indem die aus der moderneren Herstellungstechnologie resultierenden anerkannt besseren Eigenschaften von Feinkornbaustählen zu Nutze gemacht werden.

In der Vergangenheit wurden Untersuchungen angestellt, den AUBI mit Kerbschlagergebnissen zu korrelieren; ein Unterfangen, das wegen seines stark empirischen Charakters nicht zur Zufriedenheit führte und im Ergebnis Fragen offen ließ. Denn die unzufriedene Situation derzeit ist, dass der AUBI nur als spezieller Ersatzversuch für die Einhaltung einer besonderen Lieferbedingung herangezogen wird, jedoch aus werkstoffmechanischer Sicht als Hochlagenkriterium im Hinblick auf die Sicherheitsanforderungen an Tragwerke schwer begründbar und nur eingeschränkt verwendbar ist. Für den vermehrt geforderten Einsatz höherfester Stähle und abweichender Geometrieformen wurde er ohnehin nicht konzipiert.

In den europäischen Produktnormen wird die Zähigkeit unter dem Kerbschlagbiegeversuch abgefragt. Es besteht daher der Wunsch, auch die restlichen Bereiche, für die in Deutschland nach wie vor der AUBI gefordert ist, mit Formulierungen von Mindestwerten aus dem Kerbschlagbiegeversuch, insbesondere für die Hochlage, abzudecken. Dies bezieht sich sowohl für Bereiche bis S355J2 als auch für höherfeste Stähle und andere Erzeugnisformen auf Basis der Nennwerte der Werkstoffe. Dies ist Ziel des vorliegenden Forschungsvorhabens.

Hierbei werden innovative wissenschaftliche Methoden auf Grundlage von hybriden schädigungsmechanischen Modellen herangezogen, die die numerisch gestützte Simulation des AUBIs sowohl unter Berücksichtigung der Versagensform Spaltbruch (Tieflage) als auch Zählbruch (Hochlage) erlauben.

Im Ergebnis konnte dadurch die Korrelation der Zähigkeits-Hochlage des Kerbschlagbiegeversuchs mit dem AUBI durchgängig für alle Stahlsorten und Dicken gezeigt und zahlenmäßig bestimmt werden. Damit ist ein generelles Kriterium geschaffen worden, das die werkstofflichen und produktbezogenen Restriktionen des AUBI überwindet.

## Abstract

In addition to the ultimate limit state assessment which is based on ductile material behaviour the design concept in EC3 requires a toughness-orientated verification according to EN 1993-10 or DAST-RiLi 009 in order to avoid brittle fracture. The choice of steel grade, together with the requirements of the tensile test, is also regarded as guarantee for ductile material behaviour.

In Germany a further toughness test in the upper-shelf, the so-called „Aufschweißbiegeversuch“ (AUBI) according to SEP 1390, is required in general for welded steel constructions for steel grades up to S355J2 with element thicknesses above 30 mm to estimate the crack-arrest capacity of the parent material. Within the harmonising process of European Standards, the AUBI was not accepted by the other EU-member states. Instead, a lower-shelf orientated equivalence criterion was established by utilizing the acknowledged material properties of fine grained steels.

In the past, studies were carried out to correlate the AUBI with notched bar impact results; an undertaking which, due to its highly empirical character, did not lead to satisfaction and left questions unanswered. The unsatisfying situation is that the AUBI is only used as a special substitute test for compliance with a special delivery condition. However, it is hardly justifiable and cannot be applicable without any restrictions as an upper shelf criterion from a material mechanic point of view with regard to the safety demands of steel structures. Anyway, the test was not developed for the growing demand of the exploitation of high-strength steel and varying sectional geometries.

In the European product standards the toughness is tested under the notched bar impact test. It is therefore desirable to cover the remaining areas, which the AUBI is still required for in Germany, with formulations of minimum values from the notched bar impact test, especially for the upper shelf region. This applies both for ranges up to S355J2 and for high-strength steels as well as for other product forms based on the nominal values of the materials. This is the aim of this research project.

Therefore, innovative scientific approaches using hybrid damage mechanic models for the numerical simulation of the AUBI test considering the failure mechanism cleavage fracture (lower-shelf) and ductile fracture (upper-shelf) are applied.

As a result, the correlation of the upper shelf toughness of the notch impact bending test with the AUBI could be consistently shown and numerically determined for all steel grades and thicknesses. This has created a general criterion that overcomes the material and product related restrictions of the AUBI.

---

## Inhaltsverzeichnis

### Content

1	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung.....	2
1.2	Motivation.....	4
1.3	Zielsetzung.....	4
1.4	Methodische Vorgehensweise.....	5
2	Stand der Technik.....	7
2.1	Aktueller Stand der Normung.....	7
2.1.1	Einleitung.....	7
2.1.2	Kerbschlagarbeit.....	8
2.1.3	Duktilitätsanforderungen.....	9
2.1.4	Aufschweißbiegeversuch nach SEP 1390 [5].....	9
2.1.5	Feinkornbaustähle als Äquivalenzkriterium zum AUBI.....	10
2.2	Aktueller Stand der Forschung.....	12
2.2.1	Vorangehende Forschungsprojekte.....	12
2.2.2	Einfluss von Eigenspannungen.....	16
2.2.3	Bruchverhalten von Baustählen.....	18
2.2.3.1	Sprödbbruch.....	19
2.2.3.2	Zähbruch.....	21
2.2.3.3	Mischbruch.....	22
2.2.3.5	Temperaturabhängigkeit der Bruchmechanismen (Zähigkeit).....	23
2.2.4	Ingenieurtechnische Modelle.....	24
2.2.4.1	Bruchmechanische Methoden.....	25
2.2.4.2	Schädigungsmechanische Methoden.....	27
3	Schädigungsmechanische Modellierung der Versagenseigenschaften.....	30
3.1	Übersicht.....	30
3.2	Plastizitäts- und Versagensmodell nach Bai und Wierzbicki.....	31
3.2.1	Spannungszustandsabhängiges Fließmodell nach Bai und Wierzbicki.....	31
3.2.2	Spannungszustandsabhängiges Versagensmodell.....	32
4	Charakterisierung der Untersuchungswerkstoffe.....	35
4.1	Untersuchungsmaterialien.....	35

---

4.1.1	S355J2.....	35
4.1.2	S460M .....	37
4.1.3	S690Q.....	38
4.2	Eigenschaftsbestimmung an Laborproben .....	39
4.2.1	Rundzugversuche .....	39
4.2.2	Gekerbte Rundzugproben.....	42
4.2.3	Temperaturzugversuche .....	45
4.2.4	Schnellzerreißversuche .....	49
4.2.5	Kerbschlagbiegeversuche.....	52
4.2.6	Plane-Strain-Versuche.....	55
4.2.7	Scherversuche .....	58
5	Schädigungsmechanische Simulation von Laborproben .....	60
5.1	Kalibrierung des Fließverhaltens .....	60
5.1.1	Bestimmung der Fließkurven .....	60
5.1.2	Bestimmung der Spaltbruchspannung .....	63
5.1.3	Simulation gekerbter Rundzugversuche .....	64
5.1.4	Simulation Schnellzerreißversuche.....	66
5.1.5	Simulation Plane-Strain-Versuche .....	68
5.1.6	Simulation der Scherversuche .....	69
5.2	Kalibrierung der Materialschädigung.....	70
5.2.1	Bestimmung der Schdigungsortskurve für das MBW-Modell .....	70
5.2.2	Kalibrierung des Versagenszeitpunktes.....	73
5.2.3	Diskussion .....	74
6	Experimentelle Untersuchungen an Groproben (AUBI).....	75
6.1	Allgemeines.....	75
6.2	Eigen Spannungsmessungen .....	76
6.2.1	Einleitung .....	76
6.2.2	Referenzmessungen vor Probenfertigung .....	76
6.2.3	Röntgenographische Messungen .....	77
6.2.4	Mikromagnetische Messungen .....	78
6.2.5	Schlussfolgerung .....	79
6.3	Aufschweißbiegeversuche (AUBI).....	80
6.3.1	Versuchsaufbau .....	80
6.3.2	Versuchsdurchführung.....	81

---



---

6.3.3	Ergebnisse und Auswertung .....	83
7	Numerische Untersuchungen .....	89
7.1	Einleitung.....	89
7.2	Schädigungsmechanische Nachrechnung der AUBI-Proben .....	90
7.2.1	Allgemeines .....	90
7.2.2	Einflussgrößen im MBW-Modell.....	91
7.2.2.1	Netzgrößenabhängigkeit.....	91
7.2.2.2	Amplitudenschrittweite .....	93
7.2.2.3	AUBI-Modellierung.....	94
7.2.2.4	Parameterstudie der duktilen Schädigungsentwicklung im MBW- Modell .....	95
7.2.2.5	Zusammenfassung der Einflussgrößen auf die AUBI-Simulation.....	102
7.2.3	Simulation und Validierung des AUBI nach SEP 1390 .....	103
7.2.3.1	AUBI-Simulation S355J2 als homogene Probe .....	103
7.2.3.2	Materialparameter der Schweißnaht .....	104
7.2.3.3	AUBI-Simulation S355J2 mit Schweißnaht .....	105
7.2.3.4	AUBI-Simulation S460M .....	109
7.2.3.5	AUBI-Simulation S690Q .....	109
7.3	Schweißprozesssimulationen .....	110
7.4	AUBI-Untersuchungen für Hohlprofile .....	114
7.5	Zusammenfassung.....	118
8	Ableitung verbesserter Hochlagenanforderungen.....	119
8.1	Allgemeines.....	119
8.2	Korrelationshypothese zwischen AUBI-Ergebnissen und Kerbschlagarbeit.	120
8.3	Nominelle Zähigkeitsanforderung für die Hochlage.....	128
8.3.1	Anpassung des untersuchten S355J2 auf nominelle Mindestwerte.	128
8.3.2	Untersuchung des Streckgrenzenverhältnisses .....	131
8.3.3	Ableitung von verbesserten Hochlagenanforderungen für Stähle bis S355 .....	136
8.3.4	Validierung anhand vorhandener Korrelationen.....	138
8.3.5	Übertragung der Zähigkeitsanforderungen auf höherfeste Stähle ...	140
9	Zusammenfassung .....	142
10	Empfehlungen und Ausblick .....	144
11	Zusammenstellung aller Arbeiten, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben veröffentlicht wurden oder in Kürze veröffentlicht werden sollen .....	145

12	Ergebnistransfer in die Wirtschaft .....	146
13	Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts .....	150
14	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse .....	151
15	Literaturverzeichnis.....	153
16	Danksagung.....	158

## Abbildungsverzeichnis

BILD 1-1: MAKROAUFNAHME NACH AUFSCHWEIßBIEGEVER SUCH; PRÜFERGEBNIS A) BESTANDEN UND B) NICHT BESTANDEN .....	2
BILD 1-2: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER METHODISCHEN VORGEHENSWEISE .....	5
BILD 2-1: AUFSCHWEIßBIEGEVER SUCH NACH SEP 1390.....	10
BILD 2-2: VERGLEICH AUBI UND KERBSCHLAGBIEGEVER SUCH IN JOULE [7] .....	13
BILD 2-3: TRENDUNTERSUCHUNGEN FÜR MITTELWERTE UND KLEINSTE EINZELWERTE DER KERBSCHLAGBIEGEVER SUCHE FÜR BESTANDENE UND NICHT BESTANDENE AUFSCHWEIßBIEGEVER SUCHE IN ABHÄNGIGKEIT VON DER BLECHDICKE [15].....	14
BILD 2-4: ABBAU DER SCHWEIßEIGENSPANNUNGEN EINER X-NAHT DURCH SPANNUNGSFREI GLÜHEN [26].....	16
BILD 2-5: EINFLUSS DES SPANNUNGSFREI-GLÜHENS UND NORMALGLÜHENS AUF DEN BIEGEWINKEL BEIM AUFSCHWEIßBIEGEVER SUCH [26] .....	17
BILD 2-6: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BRUCHMECHANISMEN UND -ARTEN [32] .....	19
BILD 2-7: RISSPROZESSZONE .....	20
BILD 2-8: TRANSKRISTALLINER SPALTBRUCH (LINKS); INTERKRISTALLINER SPALTBRUCH (RECHTS) [33] .....	20
BILD 2-9: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER DUKTILEN SCHÄDIGUNG VON BAUSTAHL [33] .....	21
BILD 2-10: MECHANISMEN DER HOHLRAUMVEREINIGUNG [31] .....	22
BILD 2-11: QUALITATIVE DARSTELLUNG DER ZÄHIGKEITS-TEMPERATUR-KURVE EINES BAUSTAHL.....	23
BILD 2-12: BRUCHVORGÄNGE AUF UNTERSCHIEDLICHEN BETRACHTUNGSEBENEN NACH [30] .....	25
BILD 2-13: EINTEILUNG SCHÄDIGUNGSMECHANISCHER MODELLE [28].....	28
BILD 3-1: SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSLOKUS .....	34
BILD 4-1: SCHLIFFBILD DES S355 BEI EINER AUFLÖSUNG VON 200 µM (LINKS); LICHTOPTISCHE AUFNAHME DES S355 ZUR EINSCHLUSSERMITTLUNG UND DARSTELLUNG DES GEFÜGES NACH NITALÄTZUNG (RECHTS) .....	36
BILD 4-2: SCHLIFFBILD DES S460 BEI EINER AUFLÖSUNG VON 200 µM (LINKS); LICHTOPTISCHE AUFNAHME DES S460 ZUR EINSCHLUSSERMITTLUNG UND DARSTELLUNG DES GEFÜGES NACH NITALÄTZUNG (RECHTS) .....	38
BILD 4-3: SCHLIFFBILD DES S690 BEI EINER AUFLÖSUNG VON 200 µM (LINKS); LICHTOPTISCHE AUFNAHME DES S690 ZUR EINSCHLUSSERMITTLUNG UND DARSTELLUNG DES GEFÜGES NACH NITALÄTZUNG (RECHTS) .....	39
BILD 4-4: PROBENSKIZZE FÜR EINE B8X40 RUNDZUGPROBE.....	40
BILD 4-5: VORBEREITETE RUNDZUGPROBE MIT MESSSTÄBCHEN FÜR DAS OPTISCHE MESSSYSTEM UND ANSCHLÜSSEN FÜR DIE STROMZUFUHR .....	41

---

BILD 4-6: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER ZUGVERSUCHE MIT GLATTEN RUNDZUGVERSUCHEN .....	42
BILD 4-7: PROBENSKIZZE EINER GEKERBTEN RUNDZUGPROBE MIT DER BEZEICHNUNG R5L6 .....	42
BILD 4-8: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER VERSUCHE AN GEKERBTEN RUNDZUGPROBEN MIT VERSCHIEDENEN KERBGEOMETRIEN (S355) .....	43
BILD 4-9: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER VERSUCHE AN GEKERBTEN RUNDZUGPROBEN MIT VERSCHIEDENEN KERBGEOMETRIEN (S460) .....	44
BILD 4-10: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER VERSUCHE AN GEKERBTEN RUNDZUGPROBEN MIT VERSCHIEDENEN KERBGEOMETRIEN (S460) .....	44
BILD 4-11: AUFBAU FÜR DIE MESSUNG VON TEMPERATURZUGVERSUCHEN .....	45
BILD 4-12: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER TEMPERATURZUGVERSUCHE BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN MIT RUNDZUGPROBEN B8x40 (S355) .....	46
BILD 4-13: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER TEMPERATURZUGVERSUCHE BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN MIT RUNDZUGPROBEN B8x40 (S460) .....	47
BILD 4-14: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DER TEMPERATURZUGVERSUCHE BEI VERSCHIEDENEN TEMPERATUREN MIT RUNDZUGPROBEN B8x40 (S690) .....	47
BILD 4-15: DIAGRAMM DES SPANNUNGSVERHÄLTNISSSES ÜBER DER TEMPERATUR ZUR BESTIMMUNG DER TEMPERATURPARAMETER (S355J2) .....	48
BILD 4-16: PROBENSKIZZE FÜR EINE SCHNELLZERREIßPROBE .....	50
BILD 4-17: KRAFT-WEG-DIAGRAMM VON SCHNELLZERREIßVERSUCHEN MIT GESCHWINDIGKEITEN 150 1s UND 250 1s .....	50
BILD 4-18: DIAGRAMM DES SPANNUNGSVERHÄLTNISSSES ÜBER DER DEHNRATE ZUR BESTIMMUNG DER DEHNRATENPARAMETER .....	51
BILD 4-19: PROBENSKIZZE EINER CHARPY-V-PROBE, DIE FÜR KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHE VERWENDET WIRD.....	52
BILD 4-20: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES AUFBAUS UND DER DURCHFÜHRUNG EINES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHES [32] (LINKS) SCHLAGWERK DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHES MIT MESSSKALA UND SCHLEPPZEIGER (RECHTS) .....	53
BILD 4-21: KERBSCHLAGARBEIT-TEMPERATUR-DIAGRAMM FÜR KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHE MIT CHARPY-V-PROBEN S355.....	54
BILD 4-22: KERBSCHLAGARBEIT-TEMPERATUR-DIAGRAMM FÜR KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHE MIT CHARPY-V-PROBEN S460.....	54
BILD 4-23: KERBSCHLAGARBEIT-TEMPERATUR-DIAGRAMM FÜR KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHE MIT CHARPY-V-PROBEN .....	55
BILD 4-24: PROBENSKIZZE EINER PLANE-STRAIN-PROBE .....	55
BILD 4-25: ÜBERSICHT DER PLANE-STRAIN-VERSUCHSERGEBNISSE (S355) .....	56
BILD 4-26: ÜBERSICHT DER PLANE-STRAIN-VERSUCHSERGEBNISSE (S460) .....	57
BILD 4-27: ÜBERSICHT DER PLANE-STRAIN-VERSUCHSERGEBNISSE (S690) .....	57
BILD 4-28: PROBENSKIZZE EINER SCHERPROBE.....	58

---

---

BILD 4-29: VERSUCHSERGEBNISSE SCHERVERSUCHE S355.....	58
BILD 4-30: VERSUCHSERGEBNISSE SCHERVERSUCHE S460.....	59
BILD 4-31 VERSUCHSERGEBNISSE SCHERVERSUCHE S690.....	59
BILD 5-1: DARSTELLUNG DES ITERATIONSPROZESSES ZUR BESTIMMUNG DER FLIEßKURVE.....	61
BILD 5-2: SIMULATIONSMODELL EINER GLATTEN RUNDZUGPROBE.....	62
BILD 5-3: MIT LUDWIK-EXTRAPOLATION ERZEUGTE FLIEßKURVEN.....	63
BILD 5-4: VERSUCHSAUFBAU DES ZUGVERSUCHS IN FLÜSSIGEM STICKSTOFF.....	64
BILD 5-5: DREIDIMENSIONALE PROBENMODELLE FÜR DIE SIMULATION VON GEKERBTEN RUNDZUGPROBEN.....	65
BILD 5-6: VERGLEICH DER SIMULATIONSERGEBNISSE MIT DEN REALEN VERSUCHEN FÜR DAS MBW-MODELL.....	66
BILD 5-7: DREIDIMENSIONALES SIMULATIONSMODELL FÜR SCHNELLZERREIßVERSUCHE MIT VERGRÖßERUNG DES.....	67
BILD 5-8: ERGEBNIS DER SIMULATION DES SCHNELLZERREIßVERSUCHES MIT EINER DEHNRATE VON 150 1s (LINKS) UND EINER DEHNRATE VON 250 1s (RECHTS).....	67
BILD 5-9: ÜBERSICHT DER SIMULATIONSMODELLE FÜR DREIDIMENSIONALE PLANE-STRAIN- SIMULATIONEN.....	68
BILD 5-10: GENAUERE BETRACHTUNG DES KERBBEREICHES DES DREIDIMENSIONALEN SIMULATIONSMODELLES.....	68
BILD 5-11: VERGLEICH DER SIMULATIONSERGEBNISSE DES MBW-MODELLS MIT DEN VERSUCHSERGEBNISSEN DER.....	69
BILD 5-12: DREIDIMENSIONALES SIMULATIONSMODELL EINER SCHERPROBE.....	69
BILD 5-13: VERGLEICH DER SIMULATION MIT DEM MBW-MODELL MIT DEN VERSUCHSERGEBNISSEN DER.....	70
BILD 5-14: ERMITTLUNG DER SCHÄDIGUNGSINITIIERUNG.....	71
BILD 5-15: SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSKURVE DES MBW-MODELLS.....	72
BILD 5-16: SCHÄDIGUNGSFLÄCHE S460.....	72
BILD 5-17: S690 SCHÄDIGUNGSFLÄCHE.....	72
BILD 5-18: VERGLEICH DER SIMULATIONSERGEBNISSE DER GEKERBTEN RUNDZUGVERSUCHE MIT UND OHNE SCHÄDIGUNGSPARAMETER (LINKS) SOWIE DER HOCHGESCHWINDIGKEITZUGVERSUCHE (RECHTS).....	73
BILD 5-19: VERGLEICH DER SIMULATIONSERGEBNISSE DER PLANE-STRAIN-VERSUCHE MIT UND OHNE SCHÄDIGUNGSPARAMETER (LINKS) UND DER SCHERVERSUCHE (RECHTS) ..	73
BILD 6-1: MESSSPUREN UND MESSPOSITIONEN FÜR EIGENSPANNUNGSANALYSE.....	76
BILD 6-2: MESSPOSITIONEN FÜR REFERENZMESSUNGEN VOR PROBENFERTIGUNG.....	77
BILD 6-3: EIGENSPANNUNGEN VOR PROBENFERTIGUNG (S355J2).....	77
BILD 6-4 EIGENSPANNUNGEN VOR PROBENFERTIGUNG (S460M).....	77
BILD 6-5: EIGENSPANNUNGEN FÜR DIE MESSSPUREN 3-5 (S355).....	78

---

BILD 6-6: MITTELWERT DER EIGENSPANNUNGEN BIS IN 0,5 MM TIEFE; MESSSPUREN 3-5 (S355) .....	79
BILD 6-7: MITTELWERT DER EIGENSPANNUNGEN BIS IN 0,5 MM TIEFE; MESSSPUREN 3-5 (S460) .....	79
BILD 6-8: PROBENABMESSUNGEN GEMÄß SEP 1390 [5] .....	80
BILD 6-9: AUBI-PROBE NACH SEP 1390, T = 30 MM .....	81
BILD 6-10: AUBI-VERSUCHSAUFBAU ZU BEGINN DER UNTERSUCHUNG .....	81
BILD 6-11: SERVOHYDRAULISCHER 2,5 MN – PRÜFZYLINDER UND SPANNFELD MIT MONTIERTEM VERSUCHSSTAND .....	82
BILD 6-12: AUBI-PROBE NACH DER VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....	83
BILD 6-13: KRAFT-BIEGEWINKEL-DIAGRAMME FÜR S355J2 T = 30, 40 UND 50 MM SOWIE RISSBILD S355J2 T = 50 MM .....	84
BILD 6-14: KRAFT-BIEGEWINKEL-DIAGRAMME FÜR S460M T = 30, 40 UND 50 MM SOWIE RISSBILD S460M T = 40 MM .....	85
BILD 6-15: ANRISSE IN DER SCHWEIßNAHT BEI S460M T = 50 MM .....	86
BILD 6-16: KRAFT-BIEGEWINKEL-DIAGRAMME FÜR S690Q T = 30, 40 UND 50 MM SOWIE RISSBILD S690Q T = 50 MM .....	87
BILD 6-17: VERGLEICH RISSBILD S690 T = 30 MM; OBEN: EXP1; UNTEN: EXP2 .....	88
BILD 7-1: BIEGEBALKEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN VERNETZUNGSGRÖßEN .....	91
BILD 7-2: NETZGRÖßENABHÄNGIGKEIT DES MBW-MODELLS AN EINEM EINFACHEN BIEGEBALKEN .....	92
BILD 7-3: DARSTELLUNG DES ERREICHTEN BIEGEWINKELS ÜBER DIE NETZGRÖßE .....	92
BILD 7-4: VERGLEICH DER AMPLITUDENEINSTELLUNG FÜR AMP2 .....	93
BILD 7-5: AUBI-SIMULATION MIT VERSCHIEDENEN AMPLITUDENSCHRITTWEITEN .....	94
BILD 7-6: AUBI-MODELL IN ABAQUS MIT T = 50 MM .....	95
BILD 7-7: VERNETZUNG DES AUBI-MODELLS UM DIE SCHWEIßNAHT .....	95
BILD 7-8: EINFLUSS DER BRUCHENERGIE <i>G<sub>f</sub></i> .....	96
BILD 7-9: AUBI-ERGEBNISSE MIT UNTERSCHIEDLICHEN <i>G<sub>f</sub></i> .....	96
BILD 7-10: AUBI-SIMULATION MIT UNTERSCHIEDLICHEN <i>G<sub>f</sub></i> .....	97
BILD 7-11: AUFTRAGUNG DES ERREICHTEN BIEGEWINKELS BEI BRUCHEINTRITT ÜBER <i>G<sub>f</sub></i> ..	97
BILD 7-12: EINFLUSS DES SCHÄDIGUNGSKRITERIUMS <i>D<sub>crit</sub></i> .....	98
BILD 7-13: AUBI-SIMULATION MIT UNTERSCHIEDLICHEN <i>D<sub>crit</sub></i> .....	98
BILD 7-14: KALIBRIERTE SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSKURVE DES S355J2 .....	99
BILD 7-15: VERSCHIEDENE SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSKURVEN FÜR DEN S355J2 ..	100
BILD 7-16: EINFLUSS SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSDER DEHNUNG .....	101
BILD 7-17: AUBI-SIMULATION MIT VERSCHIEDENEN SCHÄDIGUNGSINITIIERUNGSKURVEN .....	101
BILD 7-18: AUBI-SIMULATIONEN MIT UNTERSCHIEDLICHEN DICKEN IM VERGLEICH ZU DEN EXPERIMENTEN .....	103

---

---

BILD 7-19: SIMULIERTE AUBI-PROBEN MIT HOMOGENEM WERKSTOFF.....	104
BILD 7-20: HÄRTEMAPPING DER SCHWEIßNAHT, WÄRMEEINFLUSSZONE UND GRUNDWERKSTOFF .....	104
BILD 7-21: SKALIERTER FLIEßKURVE FÜR DIE SCHWEIßNAHT .....	105
BILD 7-22: AUBI-SIMULATION MIT SCHWEIßNAHTPARAMETER, T = 50 MM.....	106
BILD 7-23: AUBI-SIMULATION MIT SCHWEIßNAHTPARAMETER, T = 40 MM.....	106
BILD 7-24: RISSBILD EXPERIMENT UND SIMULATION, T = 50 MM.....	107
BILD 7-25: KRAFT-BIEGEWINKEL-KURVE FÜR S460M EXPERIMENT UND SIMULATION, T = 50 MM .....	109
BILD 7-26: KRAFT-BIEGEWINKEL-KURVE FÜR S690Q EXPERIMENT UND SIMULATION, T = 50 MM .....	110
BILD 7-27: THEMENGEBIETE FÜR SCHWEIßPROZESSSIMULATIONEN (LINKS) UND ZUGEHÖRIGE BERECHNUNGSANSÄTZE (RECHTS).....	111
BILD 7-28: NORMALVERTEILTE UNSYMMETRISCH-HALBELLIPTISCHE VOLUMENWÄRMQUELLE NACH GOLDAK .....	112
BILD 7-29: VERGLEICH DER KRAFT-BIEGEWINKEL-KURVEN FÜR AUBI MIT UND AUBI OHNE EIGENSPANNUNGEN.....	113
BILD 7-30: EIGENSPANNUNGSPROFIL INFOLGE VORGESCHALTETER SCHWEIßPROZESSSIMULATION.....	113
BILD 7-31: GEWÄHLTER PROBENQUERSCHNITT FÜR HOHLPROFILE IN AUBI- UNTERSUCHUNGEN .....	114
BILD 7-32: SCHÄDIGUNGSBILDER DER UNTERSUCHTEN HOHLPROFILE BEI 60° BIEGUNG ..	116
BILD 7-33: KRAFT-BIEGEWINKEL-KURVEN DER UNTERSUCHTEN HOHLPROFILE .....	117
BILD 8-1: VERGLEICH DES KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHS MIT DER SIMULATION FÜR DEN UNTERSUCHTEN S355J2.....	120
BILD 8-2: KSBV-SIMULATION S355J2, T = 20 °C .....	122
BILD 8-3: KRAFT-WEG-DIAGRAMM DES KSBV S355J2, T = 20 °C, VERSUCH UND SIMULATION .....	123
BILD 8-4: GLEITBRUCH- UND SPALTBRUCHANTEILE IN AUBI-SIMULATION .....	124
BILD 8-5: AUBI-SIMULATION MIT BRUCH BEI 60°-BIEGEWINKEL, T = 50 MM .....	125
BILD 8-6: AUBI-SIMULATION OHNE SCHWEIßNAHT, T = 50 MM.....	126
BILD 8-7: SIMULATIONSERGEBNIS DER ZÄHIGKEITS-TEMPERATUR-KURVE FÜR AUBI- ANFORDERUNG .....	126
BILD 8-8: VERGLEICH WAHRE UND REDUZIERTE ZÄHIGKEITS-TEMPERATUR-KURVE .....	127
BILD 8-9: SPANNUNGS-DEHNUNGS-DIAGRAMM S355J2 .....	129
BILD 8-10: AUBI-SIMULATION MIT NOMINELLEN WERTEN.....	130
BILD 8-11: NOMINELLE UND WAHRE ZÄHIGKEITS-TEMPERATUR-KURVE S355J2 .....	130
BILD 8-12: FLIEßKURVEN MIT UNTERSCHIEDLICHEM STRECKGRENZENVERHÄLTNIS .....	132

---

BILD 8-13: ERREICHTER BIEGEWINKEL BEIM BRUCH DER AUBI-PROBE ÜBER STRECKGRENZENVERHÄLTNIS .....	133
BILD 8-14: ZÄHIGKEITS-TEMPERATUR-KURVE FÜR AUBI-ANFORDERUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE STRECKGRENZENVERHÄLTNISSE .....	134
BILD 8-15: ERFORDERLICHE HOCHLAGENZÄHIGKEIT FÜR AUBI-ANFORDERUNG UNTERSCHIEDLICHER STRECKGRENZENVERHÄLTNISSE .....	135
BILD 8-16: ERFORDERLICHE HOCHLAGENZÄHIGKEIT AUS AUBI-ANFORDERUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE BLECHDICKENBEREICHE (S355).....	137
BILD 8-17: VERGLEICH ZWISCHEN KORRELATIONSFORMELN UND SIMULATION HINSICHTLICH T <sub>27J</sub> UND T <sub>US</sub> (T = 30 MM).....	138
BILD 8-18: VERGLEICH ZWISCHEN KORRELATIONSFORMELN UND SIMULATION HINSICHTLICH T <sub>27J</sub> UND T <sub>US</sub> (T = 50 MM) .....	139
BILD 8-19: VERGLEICH ZWISCHEN KORRELATIONSFORMELN UND SIMULATION HINSICHTLICH T <sub>27J</sub> AND T <sub>US</sub> (T = 80 MM).....	139
BILD 8-20: VERGLEICH ZWISCHEN KORRELATIONSFORMELN UND SIMULATION HINSICHTLICH T <sub>27J</sub> UND T <sub>US</sub> (T = 100 MM).....	139
BILD 8-21: ERFORDERLICHE HOCHLAGENZÄHIGKEIT AUS AUBI-ANFORDERUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE BLECHDICKENBEREICHE (S460).....	140
BILD 8-22: ERFORDERLICHE HOCHLAGENZÄHIGKEIT AUS AUBI-ANFORDERUNG FÜR UNTERSCHIEDLICHE BLECHDICKENBEREICHE (S690).....	140



## Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1: DUKTILITÄTSANFORDERUNGEN NACH DIN EN 1993-1-1 [1] UND DIN EN1993-1-12 [19].....	9
TABELLE 2-2: ÄQUIVALENZKRITERIUM DER ZÄHIGKEIT DES GRUNDMATERIALS, TABELLE 3.1 DIN EN 1993-2 [9] .....	10
TABELLE 2-3: AUSZUG AUS TABELLE NA.1 AUS DIN EN 1993-2/NA [21], STRAßENBRÜCKEN .....	11
TABELLE 2-4: AUSZUG AUS TABELLE NA.2 AUS DIN EN 1993 2/NA [21], EISENBAHNBRÜCKEN .....	11
TABELLE 2-5: TABELLE 1 AUS DBS 918002-02:2011 [11], ÄQUIVALENZKRITERIUM FÜR DEN AUFSCHWEIßBIEGEVERSUCH .....	11
TABELLE 2-6: ÄQUIVALENZKRITERIEN DER STAHLINSTITUT-VDEH-RINGUNTERSUCHUNG; DIE ERGEBNISSE DER KERBSCHLAGBIEGEVERSUCHE BEZIEHEN SICH AUF EINE PRÜFTEMPERATUR VON $-20\text{ °C}$ [15].....	15
TABELLE 2-7: BRUCHKATEGORIEN .....	19
TABELLE 2-8: BRUCHART MIT CHARAKTERISTISCHEM PHÄNOMEN .....	23
TABELLE 2-9: MAKROSKOPISCHE MERKMALE VON BAUSTAHL IN DER TIEF- UND HOCHLAGE	24
TABELLE 2-10: DEFEKTE IN BAUTEILEN AUS STAHL [30].....	25
TABELLE 2-11: MATERIALSCHÄDIGUNG MIT WACHSTUM BIS ZUR RISSENTSTEHUNG .....	27
TABELLE 4-1: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DES STAHL S355; MASSEGEHALTE IN % .....	36
TABELLE 4-2: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DES STAHL S460M; MASSEGEHALTE IN % .....	37
TABELLE 4-3: CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DES STAHL S690Q; MASSEGEHALTE IN % .....	38
TABELLE 4-4: ALLGEMEINE DATEN DER GEKERBTEN RUNDZUGPROBEN .....	43
TABELLE 4-5: VERSUCHSINFORMATIONEN DER TEMPERIERTEN RUNDZUGPROBEN .....	46
TABELLE 4-6: PARAMETER DER TEMPERATURABHÄNGIGKEIT.....	48
TABELLE 4-7: VERSUCHDATEN DER SCHNELLZERREIßVERSUCHE .....	50
TABELLE 4-8: KONSTANTEN DER DEHNRATENABHÄNGIGKEIT.....	51
TABELLE 4-9: ÜBERSICHT DER VERWENDETEN PLANE-STRAIN-PROBENGEOMETRIEN.....	56
TABELLE 5-1: ERGEBNISSE DER KALIBRATION DER LUDWIK-PARAMETER .....	62
TABELLE 5-2: ERGEBNISSE DER KALIBRIERUNG DES MBW-PARAMETERSATZES .....	66
TABELLE 5-3: KALIBRIERTE SCHÄDIGUNGSPARAMETER DES BW-MODELLS .....	72
TABELLE 5-4: KALIBRIERTE $D_{KRIT}$ WERTE .....	74
TABELLE 6-1: AUBI VERSUCHSMATRIX .....	83
TABELLE 7-1: MODELLPARAMETER FÜR DEN S355J2 .....	90

TABELLE 7-2: AMPLITUDEN BEI DER LASTAUFBRINGUNG .....	93
TABELLE 7-3: <b><i>Dcrit</i></b> -PARAMETER .....	98
TABELLE 7-4: SPALTBRUCHSPANNUNG IN DER SCHWEIßNAHT.....	107
TABELLE 7-5: SCHWEIßPARAMETER DER AUBI-PROBEN.....	112
TABELLE 7-6: SIMULIERTE HOHLPROFILMODELLE .....	115
TABELLE 8-1: REDUZIERTER BRUCHENERGIE FÜR UNTERSCHIEDLICHE DICKEN.....	125
TABELLE 8-2: AUSZUG AUS DIN EN 10025-2 [20] .....	128
TABELLE 8-3: STRECKGRENZENVERHÄLTNISS MIT ZUGFESTIGKEIT UND STRECKGRENZE ....	132
TABELLE 8-4: ERGEBNISSE DER AUBI-SIMULATIONEN MIT UNTERSCHIEDLICHEM STRECKGRENZENVERHÄLTNISS .....	133
TABELLE 8-5: BRUCHENERGIEN FÜR AUBI-ANFORDERUNG VERSCHIEDENER STRECKGRENZENVERHÄLTNISSE.....	134
TABELLE 8-6: HOCHLAGENZÄHIGKEIT FÜR AUBI-ANFORDERUNG.....	136
TABELLE 8-7: ABLEITUNG VON ÄQUIVALENTEN TIEFLAGENBEZOGENENEN ZÄHIGKEITSANFORDERUNGEN.....	137

## Abkürzungsverzeichnis Abbreviations and symbols

$a$	Risslänge
$c_p$	Wärmekapazität
$c_T^i$	Temperaturparameter
$c_\varepsilon^i$	Dehnungsparameter
$k$	Fitparameter der Fließkurven nach LUDWIK
$n$	Fitparameter der Fließkurven nach LUDWIK
$t$	Blechdicke
$A$	Bruchdehnung
$A_g$	Gleichmaßdehnung
$A_0$	Anfangsquerschnittsfläche
$AV_{RT}$	Kerbschlagarbeit bei Raumtemperatur
BW	BAI-WIERZBICKI-Modell
$D$	Schädigungsvariable
$D_{crit}$	kritische Schädigungsvariable
$D_i$	empirische Fitparameter
$E$	Elastizitätsmodul
FE	Finite Elemente
$G_f$	Bruchenergie
$J_3$	3. Invariante des Spannungsdeviators
$KV_{US}$	Kerbschlagarbeit in der Hochlage
MBW	modifiziertes BAI-WIERZBICKI Modell
$R_e$	tatsächliche Streckgrenze
$R_{eH}$	obere Streckgrenze
$R_{eL}$	untere Streckgrenze
$R_m$	tatsächliche Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
RT	Versuchsdurchführung bei Raumtemperatur
$\varepsilon$	technische Dehnung
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage

$\varepsilon_f$	kritische Dehnung
$\bar{\varepsilon}_f$	kritische Vergleichsdehnung
$\bar{\varepsilon}_i$	spannungszustandsabhängige Dehnung
$\bar{\varepsilon}^p$	plastische Vergleichsdehnung
$\bar{\varepsilon}_{pl}$	plastische Vergleichsdehnung
$\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl}$	plastisches Dehnungsinkrement
$\varepsilon_u$	Gleichmaßdehnung
$\varepsilon_w$	wahre Dehnung
$\eta$	Spannungsmehrachsigkeit
$\theta$	Lodewinkelparameter
$\bar{\theta}$	normierter Lodewinkelparameter
$\vartheta$	spezifischer Wärmeanteil
$\xi$	Lodewinkel
$\rho$	Materialdichte
$\sigma$	technische Spannung
$\sigma_e$	VON MISES-Vergleichsspannung
$\sigma_h$	hydrostatischer Spannungsanteil
$\sigma_w$	wahre Spannung
$\sigma_y$	Fließspannung
$\sigma_{y0}$	Fließspannung bei Schädigungsbeginn
$\sigma_0$	Fließspannung der Fließkurven nach LUDWIK
$\phi$	Fließpotential

# 1 Einleitung

## Introduction

### *Kurzfassung*

*Die Regeln zur Erfassung des Grenzzustands der Tragfähigkeit für den Stahlbau sind nur gültig, wenn Versagen durch Spröbruch ausgeschlossen werden kann. Spröbruch wird im Eurocode 3 daher durch geeignete Stahlsortenwahl auf Grundlage bruchmechanischer Sicherheitsnachweise ausgeschlossen. Obwohl durch den Doppelnachweis (Stahlsortenwahl und Festigkeitsnachweis im Hochlagenbereich) die Sicherheitsanforderungen erfüllt sind, bleibt die Frage, ob die Hochlagenzähigkeit ausreicht, Spaltbruchereignisse bzw. Rissereignisse ohne instabilen Riss aufzunehmen. Ein solcher Hochlagenzähigkeitsnachweis fehlt bislang in der nationalen wie auch europäischen Normung. Obgleich für die meisten Feinkornbaustähle abgeschafft, bedient man sich in Deutschland, insbesondere für Stahlsorten bis S355J2, immer noch eines empirischen Ersatznachweises in Form des Aufschweißbiegeversuchs (AUBI).*

*Der AUBI, der im Wesentlichen als Test zur Erfassung des Rissauffangvermögens unter großen plastischen Biegeverformungen dient, ist gleichwohl in der Übertragung auf reale Bemessungssituationen aus werkstoffmechanischer Sicht schwer zu interpretieren. So hat er den Nachteil, dass er nicht auf höhere Festigkeiten und abweichende Profilformen übertragbar ist. Auch ist er im Vergleich zu anderen Werkstofftests kostenintensiv und aufwendig. Dies führte zwischenzeitlich dazu, dass aufgrund von empirischen Untersuchungen ein Ersatzkriterium entwickelt wurde, das den AUBI für viele Baustähle, insbesondere Feinkornbaustähle und höherfeste Stähle, obsolet machte. Trotzdem wird er inzwischen auch für höherfeste Stähle wieder vermehrt in der Praxis gefordert. Die angesprochenen empirischen Untersuchungen lösten das Problem indirekt über tieflagenorientierte Ersatzkriterien, allerdings nur teilweise. Das Ziel ist deswegen, einen Weg zu erforschen, wie AUBI-Ergebnisse mit der Zähigkeits-Hochlage des Kerbschlagversuchs durchgängig für alle Stahlsorten und Blechdicken korreliert werden kann. Damit würde ein generelles Kriterium geschaffen, das die werkstofflichen und produktbezogenen Restriktionen des AUBI überwindet.*

### *Abstract*

*The rules for determining the ultimate limit state for steel structures are only valid if failure due to brittle fracture can be excluded. Brittle fracture is therefore excluded by a secure steel selection on the basis of fracture mechanical safety concepts. Although the safety requirements are fulfilled by the double verification (steel grade selection and strength verification in the upper shelf area), the question remains as to whether the upper shelf toughness is sufficient to tolerate crack fracture events or crack events without unstable cracks. Such an upper shelf toughness verification has so far been lacking in national*

and European standardization. Although disestablished for most fine-grained structural steels, Germany, especially for steel grades up to S355J2, is still using an empirical substitute proof in terms of the “Aufschweißbiegeversuch” (AUBI).

The AUBI, which essentially serves as a test for determining the crack arrest capacity under large plastic bending deformations, is nevertheless difficult to interpret from a material-mechanical point of view when applied to real design situations. It has the disadvantage that it cannot be transferred to higher strengths and deviating profile shapes. Compared to other material tests, it is also cost-intensive and complex. In the meantime, this led to the development of an equivalent criterion based on empirical studies, which made the AUBI obsolete for many structural steels, in particular fine-grained structural steels and high-strength steels. Nevertheless, it is now increasingly demanded in practice again for high-strength steels. The above-mentioned empirical studies solved the problem indirectly by means of lower shelf oriented equivalent criteria, but only in part. The aim is therefore to explore a way of correlating AUBI results with the high toughness of the notched bar impact test for all steel grades and sheet thicknesses. This would create a general criterion that overcomes the material and product-related restrictions of AUBI.

## 1.1 Problemstellung

### Problem definition

Tragfähigkeitsnachweise für Stahlbautragwerke werden aktuell nach den europäisch vereinheitlichten technischen Regeln für den Entwurf, die Berechnung und Bemessung von Stahlbauten in Eurocode 3 [1] durchgeführt und bestehen aus zwei Komponenten:

1. Sicherheitsnachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit, der mit der Grundannahme duktilen Werkstoffverhaltens geführt wird.
2. Stahlsortenwahl, um Sprödbruch zu vermeiden und zusammen mit den Anforderungen aus dem Zugversuch duktilen Werkstoffverhalten zu gewährleisten



a)

b)

Bild 1-1: Makroaufnahme nach Aufschweißbiegeversuch; Prüfergebnis a) bestanden und b) nicht bestanden

Figure 1-1: Photomicrograph after weld bead bend test (AUBI); test result a) passed and b) failed

Für die Stahlsortenauswahl liefert DIN EN 1993-1-10 [2] eine Methode, mit der auf Basis eines bruchmechanischen Sicherheitsnachweises im Temperaturübergangsbereich der Zähigkeit die erforderliche Zähigkeit, ausgedrückt durch die Mindestkerbschlagarbeit von 27 J bei einer festgelegten Temperatur ( $T_{27J}$ ), ermittelt wird. Diese Methode wird auch in der DASt-Richtlinie 009 [3] eingesetzt.

Zusätzlich zu dem Zähigkeitstest durch den Kerbschlagbiegeversuch nach DIN EN ISO 148-1 [4] existiert in Deutschland noch der Aufschweißbiegeversuch (AUBI) nach SEP 1390 [5]. Dieser Versuch wurde infolge zahlreicher Schadensfälle an geschweißten Stahlbrücken aus St52 in den 30iger Jahren entwickelt und ermöglicht auf empirischer Basis eine Beurteilung des qualitativen Rissauffangvermögens des Stahlgrundwerkstoffes (Zähigkeitsverhalten in der Hochlage der Zähigkeits-Temperatur-Kurve). Vor Einführung der Eurocodes wurde der AUBI für geschweißte Stahlkonstruktionen in Deutschland in DIN 18800-7 [6] für Blechdicken  $\geq 30$  mm unter Zug und Biegezug gefordert, zuletzt konnte er über ein an der Tieflage orientiertes Ersatzkriterium für Baustähle der Lieferzustände N/NL bzw. M/ML entfallen [7, 8]. Aktuell wird der AUBI gemäß DIN EN 1993-2 [9] - bzw. gemäß zugehörigem Nationalen Anhang [10] - und nach DBS 918002-02 [11] für Bleche dicker als 30 mm als zusätzliches Zähigkeitskriterium im Bereich der Schweißnähte, die auf Zug oder Biegezug beansprucht werden, für die Stahlsorten S235, S275 und S355 erforderlich für den Fall, dass keine Erzeugniszustände N, NL, M oder ML eingesetzt werden (analog Ersatzkriterium vor Einführung der Eurocodes). In einigen Sonderfällen (höhere Dicken) ist bei diesen Festigkeitsklassen nunmehr auch wieder bei NL bzw. ML ein Aufschweißbiegeversuch notwendig, was sogar einen Rückschritt zur DIN 18800-7:2008 [6] darstellt. Auch wird der AUBI-Versuch in zunehmendem Maße für andere Stähle, z.B. hoch- und höchstfeste Stähle, für die dieser Versuch ursprünglich nicht konzipiert war, gefordert [7]. Darüber hinaus sind aufgrund neuerer Forschungsergebnisse [12] Überlegungen aufgekommen, den AUBI für im Brückenbau eingesetzte Hohlprofile zu etablieren. Dazu existieren Vorschläge [13] für Hinweisblätter der ARS [14] der BASt (Bundesanstalt für Straßenwesen), die den Einsatz dickwandiger Hohlprofile mit  $t \geq 30$  mm nur mit Zustimmung im Einzelfall in Verbindung mit einem modifizierten Aufschweißbiegeversuch für Hohlprofile erlauben sollen. Diesem Vorschlag ist die BASt jedoch derzeit nicht gefolgt, wohl auch aufgrund der Nichtvergleichbarkeit von Aufschweißbiegeversuchen an dickwandigen Hohlprofilsegmenten unterschiedlicher Radien und  $R/t$ -Verhältnisse untereinander sowie mit Flachmaterial. Anstelle dessen wird der normalgeglühte Zustand NH gefordert [14], wodurch sowohl ein metallurgischer Effekt und eine deutliche Eigenspannungsreduktion erzeugt werden. Auch diese Situation ist jedoch unbefriedigend, da auch die „Demarkation“ auf keiner wissenschaftlichen Begründung fußt.

Für Bleche S235, S275 und S355 mit  $t \geq 30$  mm und Lieferzuständen N, NL, M und ML konnte empirisch gezeigt werden [7, 15], dass ein Versagen im AUBI ausgeschlossen ist, was zu der oben beschriebenen Ausnahmeregelung (Ersatzkriterium) führte. Da jedoch der AUBI nach begrenzt sprödem Versagen der Schweißnaht das „Crack-Arrest-Vermögen“ des Hochlagenverhaltens betrifft, das Ersatzkriterium hingegen allein das Tieflagenverhalten heranzieht, ist ein direkter Bezug nicht herstellbar. Vielmehr ist es nur als ein indirekter Bezug zu sehen, welcher aussagt, dass ein günstiges Tieflagenverhalten auch das Hochlagenverhalten begünstigt.

Im Zuge der Harmonisierung Europäischer Normen wurde der AUBI nicht von den übrigen Mitgliedsländern akzeptiert, so dass zur Erfüllung europäischen Marktrechtes ein Ersatzkriterium (Einsatz von Feinkornbaustählen für Bleche dicker 30 mm) geschaffen werden musste, um durch den AUBI für Deutschland getroffenen Sicherheitsanforderungen vergleichbar Rechnung zu tragen. Der Grund hierfür ist, dass der AUBI als qualitativer Ausschlussversuch zu verstehen ist und als Resultat ein reines „Ja/Nein“-Kriterium in Form von „Bestehen“ oder „Nichtbestehen“ vorliegt, vgl. Bild 1-1. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens [7] konnte nachgewiesen werden, dass der AUBI jedoch wenig Bezug zu quantitativen Anforderungen an das Bauwerk aufweist und dass er bislang auch mit wissenschaftlichen Methoden (z.B. mit Methoden der Bruchmechanik) bisher nicht nachrechenbar war.

Im Zuge der Entwicklung innovativer Berechnungsverfahren existieren heute jedoch Werkzeuge auf schädigungsmechanischer Grundlage, die die numerisch gestützte Simulation des AUBIs sowohl unter Berücksichtigung der Versagensform Spaltbruch (Tiefloge) als auch Zählbruch (Hochlage) erlaubt. Damit stehen neue Wege offen, Qualitätsanforderungen an Baustähle unter Berücksichtigung der maßgeblichen Randbedingungen (Werkstoffdicke, Bauteilgeometrie, Schweißnaht, Beanspruchungssituation) abzuleiten und mit nominellen Werkstoffkennwerten zu verknüpfen [16, 17]

## **1.2 Motivation**

### **Motivation**

Der Anlass dieses Forschungsvorhabens ist somit dadurch begründet, dass der AUBI aus früheren Erfahrungen des deutschen Stahlbaus resultiert, über Jahrzehnte beibehalten und nicht an die moderne Stahlentwicklung angepasst wurde. Er ist weder mit einer realistischen Bauteilbelastung noch mit einer realistischen Bauteilbeanspruchung direkt zu korrelieren und damit nicht mit den Sicherheitsanforderungen an Tragwerke begründbar. Bislang lässt er nur eine empirische Aussagefähigkeit hinsichtlich Hochlagenverhalten zu und dient nur zur Erzielung einer bestimmten Lieferqualität, ohne dass diese quantitativ begründet werden kann. Außerdem kann er aufgrund des abweichenden Verhältnisses von elastischem und plastischem Verformungsanteil nicht auf höherfeste bzw. hochfeste Baustähle übertragen werden, deren Festigkeits- und Zähigkeitspotential derzeit daher nicht ausgenutzt werden kann.

Zurzeit wird der AUBI immer noch in Spezifikationen von dickwandigen Blechen und Profilen berücksichtigt, mittlerweile sogar wieder für einige dickwandige NL- und ML-Lieferzustände. Es existieren sogar aktuelle Überlegungen, das Anwendungsgebiet des aufwändigen Aufschweißbiegeversuchs zu erweitern [18]. Aufgrund mangelnder wissenschaftlicher Grundlage und fehlender theoretischer Vorhersagemöglichkeit steht er allerdings modernen Stahlentwicklungen im Wege.

## **1.3 Zielsetzung**

### **Objective**

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist, durch Anwendung neuerdings verfügbarer ingenieurwissenschaftlicher Methoden und Erkenntnisse den Aufschweißbiegeversuch hinreichend genau unter Berücksichtigung eines hybriden schädigungsmechanischen Modells im Hinblick auf das spröde und duktile Versagen zu beschreiben und damit die Basis für eine Verknüpfung mit in DIN EN 10025 ausgewiesenen Zähigkeitsnennwerten



oder Korrelationen zu Kerbschlagarbeiten auf der Hochlage herzustellen. Bislang existiert nur eine unzureichende empirische Verknüpfung mit Kerbschlagwerten, resultierend aus Tieflagenbetrachtungen, die den eigentlichen Hochlagencharakter des Aufschweißbiegeversuchs nicht korrekt abbildet.

Mit Hilfe eines gezielt ausgewählten Schädigungsmodells sollen Anforderungen an die Hochlagenzähigkeit abgeleitet werden, um so zu gewährleisten, dass große plastische Dehnungsbeanspruchungen, die bei der experimentellen Bestimmung der maximalen Festigkeitskennwerten unterstellt werden, ohne frühzeitigen Bruch aufgenommen werden können.

Darüber hinaus kann die Aussagefähigkeit mit Hilfe der verifizierten Schädigungsmodelle auf höherfeste Stähle größer S355 übertragen werden, um so durch Überwindung der Anwendungsgrenzen des AUBIs den Markt für diese Stähle potentiell zu erschließen.

## 1.4 Methodische Vorgehensweise

### Methodological approach

Für die Erreichung der oben erläuterten Zielsetzung wurde das Projekt in fünf Projektphasen bzw. Arbeitspakete unterteilt, die so aufgeteilt sind, dass sie von den beiden Forschungsstellen, dem Institut und Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau (STB) sowie dem Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen, eigenständig ausgeführt werden konnten. Für den ganzheitlichen Erfolg des Projektes und einen möglichst reibungsfreien Ablauf war eine enge Zusammenarbeit vorgesehen.

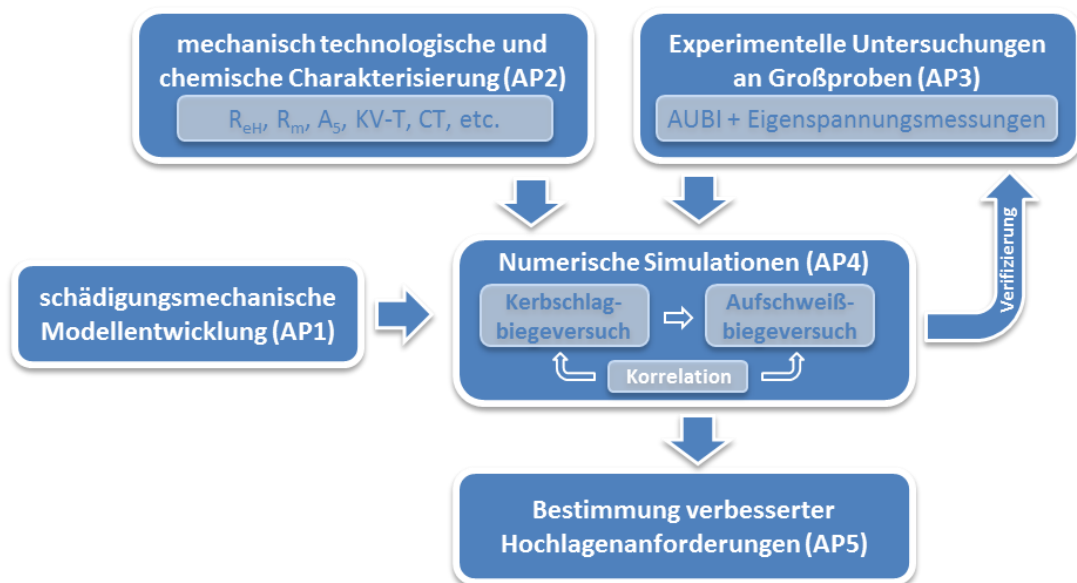


Bild 1-2: Schematische Darstellung der methodischen Vorgehensweise

Figure 1-2: Schematic illustration of the methodical approach

Die Untersuchungen und die resultierenden Ergebnisse der einzelnen Arbeitspaketen in Bild 1-2 werden in den nachfolgenden Abschnitten genauer erläutert.

In **Abschnitt 3 (AP1)** erfolgt die schädigungsmechanische Modellentwicklung basierend auf einem bereits am Institut für Eisenhüttenkunde entwickelten schädigungsme-

chanischen Modell. Hierzu wird zunächst ein anisotropes, dehnratenabhängiges Plastizitätsmodell mit isotroper Verfestigung implementiert, so dass die richtungsabhängigen unterschiedlichen Materialeigenschaften bei niederfesten und thermomechanisch-gewalzten Baustählen berücksichtigt werden können. Zudem wird ein spannungsabhängiges Schädigungsevolutionsgesetz entwickelt, das sowohl Tieflagen-, Übergangsbereichs und Hochlagenverhalten abbilden kann (hybrider schädigungsmechanischer Ansatz) und somit das AUBI-typische Versagensverhalten beschreiben kann. Abschließend erfolgt die Kopplung von Plastizitäts- und Schädigungsmodell.

**Abschnitt 4 (AP 2)** umfasst die Werkstoffcharakterisierung zur Ermittlung der schädigungsmechanischen Modellparameter. Zunächst werden die Festigkeitseigenschaften der untersuchten Werkstoffe bestimmt und anschließend die Einflüsse infolge von Temperatur- und Dehnratenverhältnissen auf das Verfestigungsverhalten bei Überschreiten des Fließpotentials erfasst. Anschließend werden die Grenzzustandskriterien zur Einleitung von Spalt- und Gleitbruch und die für das hybride Schädigungsmodell notwendigen Parameter abgeleitet. Ferner werden vollständige Kerbschlagarbeitsübergangskurven bestimmt.

In **Abschnitt 5 (AP4)** werden die Kerbschlagbiegeversuche zur Validierung des schädigungsmechanischen Modells herangezogen.

Die experimentellen Bauteiluntersuchungen werden in **Abschnitt 6 (AP 3)** durchgeführt. Sie erfolgen für die Blechdicken  $t = 30, 40$  und  $50$  mm sowie für die Stahlsorten S355J2, S460M und S690Q. Zur Berücksichtigung des Eigenspannungszustandes (sowohl aus Herstellungsprozess als auch Schweißen) wurden im Vorfeld zusätzliche Messungen der Eigenspannungen (röntgenographisch und elektromagnetisch) an ausgewählten Probekörpern durchgeführt.

**Abschnitt 7 (AP 4)** umfasst alle notwendigen simulationstechnischen Analysen. Zur Erfassung der Eigenspannungszustände aus dem Schweißprozess werden Simulationen der Probenfertigung durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden in Abgleich mit den Messwerten aus Abschnitt 6 als initialer Spannungszustand im Vorfeld der strukturellen Analyse zur Nachsimulation der AUBIs aufgebracht. Insbesondere soll bei der Simulation der Aufschweißbiegeversuche die Rissinitiierung und das Rissfortschrittsverhalten hinreichend genau erfasst werden. Im Anschluss an die Verifikation der numerischen Berechnungen erfolgt die Simulation der Aufschweißbiegeversuche unter Berücksichtigung nomineller Werkstoffeigenschaften. Simulationen für entsprechende AUBI-Versuche an Hohlprofilen werden ebenfalls durchgeführt.

Zur Ableitung optimierten Hochlagenanforderungen in **Abschnitt 8 (AP 5)** erfolgt als erstes die Aufstellung einer Korrelation zwischen den Ergebnissen des Kerbschlagbiegeversuchs bei Raumtemperatur und dem Resultat des AUBI. Anschließend werden Hochlagenzähigkeiten in Form von Kerbschlagarbeiten  $KV_{US}$  auf Grundlage der aktuellen Anforderungen nach SEP 1390 berechnet. Anhand eines Referenzbauteils werden die Bauteilanforderungen mit denjenigen aus dem AUBI verglichen. Schlussendlich wird auf Basis der innovativen Forschungsergebnisse ein Normenvorschlag für ein neues Hochlagenkriterium (als Ersatz für den Aufschweißbiegeversuch) ausgearbeitet.