

**BAM****Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung**D-12200 Berlin
Telefon: 030/8104-0
Telefax: 030/8112029Dieses Dokument darf nur in
vollem Wortlaut und ohne
Zusätze veröffentlicht
werden. Für die veränderte
Wiedergabe und Auszüge
ist vorher die widerrufliche
schriftliche Einwilligung der
BAM einzuholen

Schadensanalyse an im Münsterland umgebrochenen Strommasten

- Aktenzeichen:** BAM-V.3/442
- Ausfertigung:** Elektronische Version von Ausfertigung 1 von 3, rechtsver-
bindlich ist ausschließlich die gesiegelte Papier-Version
- Datum:** 2006-04-11
- Auftraggeber:** Bundesnetzagentur BNetzA
Tulpenfeld 4
53113 Bonn
- Auftrag vom:** 2006-01-12, Eing. 2006-01-16
Erweiterung vom 2006-02-17, Eingang 2006-02-20
- Zeichen:** Z 25-1 2573
- Unterlagen:** 4 CD von RWE, Eing. 2006-01-11 bis -02-15
1 CD von Prof. Thierauf, Eing. 2006-02-13
- Prüfstücke:** 15 Prüfstücke von 4 Strommasten, Eing. 2005-12-28
weitere Prüfstücke der Masten 65 und 27, Eing. 2006-02-16
zusätzliche Prüfstücke des Masts 65, Eingang 2006-03-16
- Bearbeitung in:** Arbeitsgruppe Schadensanalyse
in den BAM-Fachgruppen V.3, V.1, VII.2, I.1
- Gegenstand d.
Gutachtens:** Untersuchungen hinsichtlich Versagensmechanismus, Rei-
henfolge der Schäden, Schadensursachen und Empfehlungen
- Umfang:** Seiten 1 bis 207 mit Bildern 1 bis 131 und Tabellen 1 bis 29.

Die Inhalte des Gutachtens beziehen sich ausschließlich auf die begutachteten Gegenstände.

**GUTACHTEN**

Kurzfassung: Beim Ortstermin am 2005-12-20 wurden 11 umgebrochene Strommasten besichtigt. Aus 4 der 11 Masten wurden 15 Prüfstücke entnommen, aus denen wiederum insgesamt 169 Proben für unterschiedliche Werkstoffuntersuchungen gefertigt wurden.

Hinweise auf ein korrosionsbedingtes Versagen konnten in keinem Fall gefunden werden; an der Instandhaltung der Masten sind aus korrosionstechnischer Sicht keine Mängel festzustellen.

Ausgangspunkt der Schäden am Freileitungsabschnitt BL1503 M65-M74 war wahrscheinlich das Versagen des Winkelabspannmasts M65. Die in Leitungsrichtung anschließenden Tragmasten M66 bis M73 sind nacheinander vom Ausgangspunkt weg umgebrochen.

Alle untersuchten Werkstoffe entsprechen den Anforderungen der jeweiligen Normen zum Zeitpunkt der Errichtung der Masten. Einige der verwendeten älteren Stähle erfüllen auch die Anforderungen an heute für den Freileitungsbau zugelassene Stähle, einige andere nicht.

In Stählen aus den Jahren 1951 und 1960, die als Thomasstähle eingestuft wurden, wurden Nitrid-Ausscheidungen gefunden, wie sie durch Alterung entstehen können.

Hinweise auf Schwingbruch wurden nicht gefunden. Alle untersuchten Bruchflächen zeigen Gewaltbrüche mit duktilen und Spaltbruchbereichen.

Aus den Unterlagen von RWE wurden die tatsächlichen Einwirkungen zum Versagenszeitpunkt abgeschätzt, welche den Mastschaft extrem tordieren. Mittels statischer Berechnungen wurden die Stabkräfte im Mast M65 ermittelt.

Die experimentell an Prüfstücken aus dem Mast M65 ermittelten Bruchkräfte lagen teilweise erheblich unter den nach Norm berechneten. Sie wurden mit den Stabkräften verglichen, woraus auf das Primärversagensbauteil geschlossen werden konnte.

Nach dem auf Bestandschutz basierenden RWE-Sanierungskonzept wurden Bauteile aus Thomasstahl in Masten belastet, weil die zu Grunde gelegte Norm von 1954 extreme Torsionslastfälle nicht vorsieht. Unter dem Versagenslastfall haben diese, in der Zugbeanspruchbarkeit geschwächten Diagonalen, spröde versagt.

Die aus dem Versagensmechanismus abgeleitete Versagensreihenfolge ist widerspruchsfrei auch für andere Freileitungen denkbar.

Als Ursache für das Versagen des Masts 65 in BL1503 konnte die Kombination aus wetterbedingt hohen einseitigen Zusatzlasten und Bauteilen aus versprödetem Thomasstahl widerspruchsfrei identifiziert werden.

Aus der Bewertung der Ergebnisse folgende Empfehlungen zur Vermeidung ähnlicher Schäden wurden erarbeitet.

Überblick

Die im vorliegenden Gutachten beschriebenen Untersuchungen hatten zum Ziel, das Versagen der Strommasten im westlichen Münsterland Ende November 2005 zu klären und damit die Fragen des Auftraggebers (Kap. 1.1) zu beantworten.

Bei einem Ortstermin an einigen der umgebrochenen Strommasten (Kap. 2.2) wurden die Schäden dokumentiert sowie Art und Umfang der Versagensstellen analysiert (Kap. 2.3). An den entnommenen Schadensteilen wurden die Brucharten ermittelt (Kap. 4.5) und an den Prüfstücken umfangreiche Werkstoffuntersuchungen (Kap. 4) durchgeführt.

Aus einer Vielzahl von Voruntersuchungen (Kap. 3.5) sowie einigen eigenen Vergleichsversuchen (Kap. 4.8) wurde die Belastbarkeit der für den Umbruch der Masten relevanten Diagonalen ermittelt.

Anhand der vom Betreiber zur Verfügung gestellten Dokumentationen unmittelbar nach dem Schaden konnte auf die Einwirkungen zum Zeitpunkt des Mastversagens geschlossen werden (Kap. 5). Anhand von statischen Berechnungen wurden die Belastungen der relevanten Diagonalen ermittelt (Kap. 6.5).

Aus dem Vergleich der rechnerischen Belastungen mit der experimentell ermittelten Belastbarkeit konnte die als erstes versagende Diagonale (Primärversagen) identifiziert (Kap. 7.1) und daraus auf den weiteren Versagensablauf (Kaskadeneffekt) (Kap. 7.3) geschlossen werden.

Mit der Bewertung der rekonstruierten Einwirkungen sowie der experimentell ermittelten Belastbarkeiten anhand des Regelwerks (Kap. 7.5) konnten die Ursachen der Mastumbrüche angegeben werden.

Abschließend werden die Fragen des Auftraggebers beantwortet (Kap. 8) und technische Empfehlungen (Kap. 9) zur Vermeidung von zukünftigen Mastumbrüchen gegeben.

Inhaltsverzeichnis

1	Gegenstand des Gutachtens, Fragestellung	9
1.1	Fragestellung der BNetzA	9
1.2	Chronologie	10
1.3	Zwischenberichte an BNetzA	11
1.4	Begriffe, Definitionen	11
1.5	Untersuchungskonzept	13
2	Bestandsaufnahme, Ortstermin, Prüfstücke, Unterlagen	15
2.1	Unterlagen von RWE	15
2.2	Ortstermin	15
2.2.1	Planung, Vorinformationen	15
2.2.2	Generelle Vorgehensweise	16
2.2.3	Ortstermin BL1503	16
2.2.4	Ortstermin BL1536	17
2.2.5	Ortstermin BL1525	17
2.2.6	Ortstermin Mast „Nünning“	18
2.3	Rekonstruktion der Positionen der Schadensteile im Mast	18
2.4	Instandhaltungszustand	18
3	Auswertung der Unterlagen	19
3.1	Literaturrecherche „Versprödung Thomasstahl“	19
3.1.1	Fragestellung	19
3.1.2	Zeitschriften	19
3.1.3	Datenbanken, Internet	19
3.1.4	Ergebnis	19
3.1.5	Auswertung	19
3.1.6	Fazit	25
3.2	Literatur „Schäden an Freileitungen“	25
3.2.1	Schäden durch Thomasstahlversprödung	25
3.2.2	Schäden an Freileitungen	25
3.3	Frühere Mastumbrüche durch Eis, Raureif, Nassschnee	26

3.4	Prüfbericht MPA NRW 1994 [87]	26
3.5	Auswertung der SAG Untersuchungen 1990 bis 2006	26
3.5.1	Bauteilversuche SAG Versuchsbericht 2006-20	26
3.5.2	Dokumentation SAG 2003-066 Studie Stickstoffversprödung	27
3.5.3	Kurzberichte SAG 2000-053A + B [77] [78]	27
3.5.4	Versuchsbericht SAG 99-054 KW Weiher – Uchtelfangen [71]	27
3.5.5	Versuchsbericht SAG 98-028 [75]	28
3.5.6	Versuchsbericht SAG 93-027 Bj 1958 bis 1963 [74]	28
3.5.7	Versuchsbericht SAG 92 056 Vöhringen – Füssen [73]	28
3.5.8	Versuchsbericht SAG 90 052 KW Weiher – Uchtelfangen [72]	28
3.6	Maßnahmen an Masten mit Stäben aus spröden Stählen	28
3.7	Zertifizierung der RWE-Sanierung durch Prof. Thierauf [80]	29
3.8	Bauteilversuche SLV 2005-710-1118/3 [86]	30
3.9	Auswertung der Regelwerke für Freileitungsbau, Forderungen an die Werkstoffe für Stahlgittermasten	30
4	Werkstoffuntersuchungen und deren Ergebnisse, Beanspruchbarkeit, Belastbarkeit	31
4.1	WE: Beurteilung des Korrosionszustandes der besichtigten Masten	31
4.2	Probenahme und -fertigung	31
4.3	Mechanisch-technologische und chemische Werkstoffuntersuchungen an den Schadensteilen	32
4.3.1	Zielstellung	32
4.3.2	Zugversuche	32
4.3.3	Kerbschlagbiegeversuche	32
4.3.4	Chemische Analyse der Werkstoffe	33
4.3.5	Zusammenfassung Werkstoffsorten	34
4.4	Metallographie, Bestimmung der Stahlsorten	34
4.4.1	Baumannabdrücke	34
4.4.2	Gefügebestimmung	35
4.4.3	Metallographischer Nachweis von Nitrid-Ausscheidungen	35
4.5	Fraktographie an den gebrochenen Prüfstücken	36
4.6	Metallographie an Schliffen durch Bruchflächen	38
4.7	Auswertung von früheren Bauteilzugversuchen	38
4.8	BAM-Bauteil-Zugversuche an der Verbindung Diagonale-Eckstiel	38
4.8.1	Fragestellung, Ziel	38

4.8.2	Rekonstruktion der Positionen der Prüfstücke im Mast 65.....	39
4.8.3	Mechanisch-technologische und chemische Werkstoffuntersuchungen an den Prüfstücken für die Bauteilversuche	39
4.8.4	Prüfparameter BAM-Bauteilzugversuche	40
4.8.5	Prüfparameter	40
4.8.6	Prüfergebnisse BAM-Bauteilzugversuche	40
4.8.7	Vergleich BAM – SLV	41
4.9	Einordnung der BAM-Ergebnisse in die SAG /SLV-Versuchsergebnisse..	42
4.10	Fraktographie: Vergleich der Bruchflächen der Bauteilversuche mit denen der Schadensteile.....	43
4.11	Fazit.....	43
5	Einwirkungen, Belastungen	44
5.1	Vergleich der Lastannahmen in den verschiedenen Ausgaben der Freileitungs-Normen.....	44
5.1.1	DIN 1055-5: Lastannahmen infolge Schnee und Eis	44
5.2	Abschätzung der tatsächlich aufgetretenen Eislasten nach [58].....	45
5.2.1	Abschätzung des Streckengewichts der Schneewalze auf Foto IMG_7995	46
5.2.2	Gemessene Luft- und abgeschätzte Masttemperatur	46
5.3	Abschätzung der realen Einwirkungen aus Seildurchhangsberechnungen von RWE	47
5.3.1	Folgerungen für die Lastannahmen	47
5.4	Fazit Streckenlasten	47
5.5	Abschätzung unsymmetrischer Seilkräfte aus der Belegung mit Schneewalzen	48
5.5.1	Analyse der Eisbelegung der Freileitung BL1503 M82-M90	48
5.5.2	Auswertung einseitiger Betrieb im Schadensbereich BL1503.....	49
5.5.3	Verbiegung C-Bock Mast 1503M82	49
5.6	Versagenslastfall.....	49
6	Konstruktive Betrachtungen, statische Untersuchungen.....	51
6.1	Bemessungskonzept für Tragwerke.....	51
6.2	Baustahl – Anforderungen an die Duktilität.....	51
6.3	Beschreibung der Masttypen	52
6.4	Sanierungszustand M65	53

6.4.1	Soll-Zustand nach RWE-Sanierungskonzept	53
6.4.2	Ist-Zustand nach Fotodokumentation und Ortstermin	54
6.4.3	Fazit.....	54
6.5	Statische Untersuchungen	54
6.5.1	Allgemeines	54
6.5.2	Statische Systeme Winkelabspannmast und Tragmast	54
6.5.3	Lastfälle	55
6.5.4	Ergebnisse	56
6.5.5	Diskussion der Ergebnisse des Versagenslastfalls	60
6.5.6	Fazit.....	61
7	Bewertung, Schlussfolgerungen	62
7.1	Vergleich Beanspruchung – Beanspruchbarkeit.....	62
7.2	Primärversagen.....	62
7.3	Untersuchung der Versagensreihenfolge.....	62
7.3.1	Einfluss der Windrichtung.....	62
7.3.2	Auswertung von Luftbildern	63
7.3.3	Beschreibung der Schäden an den Masten BL1503, M65-74	63
7.3.4	Beschreibung der Schäden an den Masten BL1525M22 und M10	63
7.3.5	Beschreibung der Schäden an den Masten BL1536	64
7.4	Schadenshypothesen und Übertragbarkeit auf andere BL	64
7.4.1	Schadensablauf BL1503	64
7.4.2	Übertragung auf andere BL, Zusammenfassung	65
7.5	Kombination der Schadensursachen	65
8	Beantwortung der Fragen des Auftraggebers.....	67
8.1	Antwort 1	67
8.2	Antwort 2	67
8.3	Antwort 3	68
8.4	Antwort 4	68
9	Empfehlungen	69
9.1	Vermeidung von feldweise ungleichen und/oder einseitigen Eis- /Schneewalzen	69
9.2	Normung	69

9.3	Konstruktion, Sanierung der Masten.....	69
10	Zusammenfassung	70
11	Quellen	72
11.1	Literatur	72
11.2	Regelwerke	75
11.3	Voruntersuchungen, Versuchsberichte	75
12	Tabellen	80
13	Bilder	116
13.1	Ortstermin, Zustand der Masten.....	116
13.2	Ortstermin M27, M22.....	123
13.3	Zuordnung der Prüfstücke, Probennahme	125
13.4	Literaturrecherche „Versprödung Thomasstahl“	128
13.5	Reihenfolge des Versagens der Masten	132
13.6	Fraktographie	152
13.7	Metallographie.....	164
13.8	Prüfstücke, MTP	175
13.9	Einwirkungen.....	192
13.10	Statische Untersuchungen	194

1 Gegenstand des Gutachtens, Fragestellung

Am 25. und 26. November 2005 wurden im Münsterland 82 Strommasten beschädigt, viele davon sind umgebrochen, Tabelle 1 und Tabelle 2. Ziele der Untersuchungen und deren Bewertungen sind die Klärung der Ursachen sowie des Versagensmechanismus und -ablaufs. Empfehlungen und technische Maßnahmen zur Vermeidung ähnlicher weiterer Schäden an Strommasten sollen angegeben werden.

1.1 Fragestellung der BNetzA

Am 2005-12-15 wurden bei der BAM folgende Themenschwerpunkte angefragt:

- Werkstoffzustand der Masten
- Analyse des Versagensmechanismus
- Entsprechen die Konstruktionen den jeweils damals bzw. heute geltenden Normen und Regeln?
- Überprüfung der Lastannahmen, insbesondere der Eislastzonen

Aufgabenstellung der BNetzA vom 2005-12-19:

Zitat: „Ziel des Gutachtens ist die Analyse der Schadensursachen, die zu den großflächigen Stromausfällen im Münsterland am Wochenende des 25./26./27. November 2005 im Hoch- und Mittelspannungsnetz der RWE Westfalen-Weser-Ems Verteilernetz GmbH geführt haben. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung der material-technischen und statischen Eigenschaften der umgestürzten bzw. beschädigten Strommasten und auf der Frage, ob schadhaftes Material mitursächlich für die Schadensereignisse waren. Folgende Punkte sind dabei insbesondere zu untersuchen:

1. Werkstoffzustand der Masten

Der Stahl der Strommasten ist auf seinen Werkstoffzustand und seine mechanisch-technologischen Eigenschaften hin zu untersuchen. Dabei ist zu beantworten, in welchem Umfang der Stahl der geschädigten Masten nach dem Thomas-Verfahren hergestellt worden ist, ob die Stahlkonstruktionen der Masten Versprödungen aufweisen und in welchem Umfang hierdurch eine Minderung der Tragfähigkeit und Belastbarkeit der Maste gegeben ist. In wie weit stellt diese eventuelle Materialveränderung eine Ursache der Beschädigungen dar?

2. Analyse des Versagensmechanismus

Der Versagensmechanismus soll anhand einer Fraktographie, mittels einer metallographischen Untersuchung und anhand des Korrosionszustandes analysiert werden. Die umgebrochenen Masten weisen u.a. Torsionen im Kopfbereich auf: Kann aus dem Schadensbild oder anderen Gegebenheiten die Primärversagensstelle benannt werden und daraus ein Ablaufszenario entwickelt werden, so dass auf die Kausalität der Schadensabläufe geschlossen werden kann?

3. Normen und Regeln

Wurden die gültigen einschlägigen Normen und Regeln beim Bau der Masten eingehalten? Wäre das Schadensausmaß u. U. geringer gewesen, wenn alle Masten den heute gültigen einschlägigen Normen entsprochen hätten?

4. Eislastzonen

Hätte der Ansatz anderer Eislastzonen und Windzonen in der Auslegung das Ausmaß des Schadens verringert oder ihn ganz vermieden?

Zur Erstellung des Gutachtens sollen Proben von mindestens fünf beschädigten Masten möglichst von unterschiedlichen Leitungsabschnitten/Leitungen verschiedenen Alters (1950 – 1990) entnommen und analysiert werden. Die Probenauswahl und -entnahme erfolgt vor Ort durch den Auftragnehmer in Abstimmung mit der Bundesnetzagentur. Die Probenentnahme hat unverzüglich nach Auftragserteilung zu erfolgen (spätestens KW 51 in 2005).

Erste Ergebnisse der Untersuchungen sollen spätestens drei Wochen nach Auftragserteilung der Bundesnetzagentur vorgestellt werden. Der Abschlussbericht des Gutachtens ist in schriftlicher und elektronischer Form (pdf-Format) der Bundesnetzagentur vorzulegen. Der zeitliche Rahmen hierzu wird nach Vorliegen der ersten Ergebnisse festgelegt. Die zentralen Ergebnisse der Untersuchung sind dem Abschlussbericht in einer kurzen Zusammenfassung voranzustellen. Die Ergebnisse des Gutachtens sind der Bundesnetzagentur außerdem in einer Präsentation vorzustellen. Eine Veröffentlichung des Gutachtens oder Teilen davon bedürfen der vorherigen schriftlichen Zustimmung durch die Bundesnetzagentur.“

1.2 Chronologie

- 2005-11-25 bis -27, Münsterland: In der genannten Zeit wurden im Münsterland bei einer durch einen Wintereinbruch ausgelösten großflächigen Störung des Elektrizitäts-Versorgungsnetzes insgesamt 82 Strommasten beschädigt. Viele wurden durch Umbruch zerstört, die betreffenden Stromkreise dadurch unterbrochen.
- 2005-12-13: In einer Anfrage der BNetzA wurde die BAM um Erstellung eines Angebots gem. o. g. Fragestellung gebeten.
- 2005-12-19: Am 19. Dezember fand in Bonn bei der BNetzA ein Gespräch zur Festlegung der zu besichtigenden Masten statt. Nach Auswahl von ca. 20 Masten durch die BAM wurde bekannt, dass die abgerhnenen Strommasten bereits weitgehend demontiert und beseitigt waren.
- 2005-12-20: Am 20. Dezember fand ein Ortstermin im Münsterland statt. Es wurden 11 geknickte Masten bzw. deren Reste besichtigt und fünf Masten für die Entnahme von insgesamt 15 Prüfstücken gekennzeichnet. Da der Mast „Nünning“ nach RWE-Angaben nicht relevant sei, wurden von RWE aus vier gekennzeichneten Masten die Prüfstücke entnommen, Tabelle 3.
- 2005-12-28: Prüfstückeingang in der BAM
- 2006-01-03: Dokumentation der Prüfstücke, Probenahme, Beginn der Untersuchungen
- 2006-01-11: Eingang technischer Unterlagen von RWE über die Strommasten auf CD-ROM.
- 2006-01-16: Der schriftliche Auftrag zur Untersuchung der Strommasten gemäß Fragestellung der BNetzA vom 2005-12-19 bzw. 2005-12-29 sowie Untersuchungsangebot der BAM vom 2005-12-22 bzw. 2006-01-04 ging am 2006-01-16 ein.
- 2006-01-25: 1. Zwischenbericht der BAM, Präsentation bei BNetzA in Bonn
- 2006-02-02: Präsentation des von RWE beauftragten Gutachtens von Prof. Thierauf in Dortmund,

- 2006-02-08: BAM erstellt 2. Zwischenbericht und kommt zu dem Schluss, dass Bauteilversuche erforderlich sind. Dazu müssen weitere Proben genommen werden.
- 2006-02-11: Entnahme von weiteren Prüfstücken aus M65 und M27 für Bauteilversuche nach Vorgabe BAM durch RWE
- 2006-02-16: Prüfstückeingang in der BAM
- 2006-02-17: Probenahme, Beginn der weiteren Untersuchungen
- 2006-02-20: Eingang der Auftragsenerweiterung BNetzA für Bauteilversuche
- 2006-03-03: Präsentation der bisherigen Ergebnisse der BAM bei der BNetzA in Bonn
- 2006-03-14: 3. Zwischenbericht mit den Ergebnissen der Bauteilversuche
- 2006-03-16: Entnahme von zusätzlichen Prüfstücken aus M65 für zusätzliche Bauteilversuche nach Vorgabe der BAM durch RWE
- 2006-03-16: Prüfstückeingang in der BAM
- 2006-03-17: Probenahme, Beginn der zusätzlichen Bauteilversuche
- 2006-03-28: Präsentation der Ergebnisse für BNetzA, RWE und RWE Gutachter in der BAM, Berlin.
- 2006-04-11: Fertigstellung des BAM-Gutachtens

1.3 Zwischenberichte an BNetzA

Am 2006-01-25, am 2006-02-08 und am 2006-03-14 wurden jeweils Zwischenberichte an den Auftraggeber übermittelt. Alle in diesen Zwischenberichten vorläufig mitgeteilten Ergebnisse sind im vorliegenden Gutachten abschließend enthalten.

1.4 Begriffe, Definitionen

Die im Folgenden aufgelisteten Begriffe, Abkürzungen und Definitionen werden im gesamten Gutachten konsistent verwendet und in den betreffenden Abschnitten nicht erneut erläutert.

Aufbau der Freileitungen	
BL	Bauleitnummer. Je eine BL bezeichnet die verschiedenen Freileitungen.
Leistungsrichtung, rechts, links	Die Leistungsrichtung ist definiert als die Blickrichtung von einem Mast zum Nachbarmast mit der nächsthöheren Mastnummer. Damit sind auch die Bezeichnungen für die Seiten als „links“ und „rechts“ definiert.
(feldweise) ungleich	in Blickrichtung der Freileitung vor und hinter dem Mast unterschiedliche Lasten o.ä., nach [53].
einseitig	in Blickrichtung der Freileitung rechts und links des Masts unterschiedliche Lasten o.ä., nach [53].

Aufbau der Masten	
Stahlgittermasten	Alle untersuchten Masten sind sog. Stahlgittermasten.
Mastschaft	Der Stamm des Masts wird als Mastschaft bezeichnet
Eckstiel	Der Mastschaft jedes Mast besitzt senkrechte 4 Eckstiele, die mit den Nummern 1 bis 4 versehen sind. Die Bezeichnung der Eckstiele erfolgt in Draufsicht mit Blickrichtung in Freileitungsrichtung (s. „Aufbau der Freileitungen“) im Uhrzeigersinn: unten links ist 1, Eckstiel 4 ist dann unten rechts, Bild 18.
Schuss	Der Mastschaft besteht in der Vertikalen aus mehreren Schüssen, d.h. die Eckstiele sind mehrfach unterteilt.
Diagonale	Mit Hilfe der sog. Diagonalen sind die Eckstiele untereinander verstrebt.
Wand	Je 2 Eckstiele bilden mit den dazwischen liegenden Diagonalen eine Wand. Jeder Mast hat also 4 Wände, die durch die beiden Eckstielnummern gekennzeichnet werden.
Traverse	Die Tragarme, an denen die Stromleitungen aufgehangen sind, werden als Traversen bezeichnet. Die Traversen sind parallel zu den Wänden 1-4 und 2-3.
Leiter	zwischen den Stützpunkten frei gespanntes Seil nach DIN EN 50341-3-4:2002-03
Kette	Die Seile sind an kettenförmigen Isolatoren aufgehängt, den sog. Ketten.
Erdseil	Das Erdseil ist von Mastspitze zu Mastspitze gespannt und dient u.a. als Blitzableiter
C-Bock	Die C-Böcke sind auf den Mastspitzen angebracht und halten das Erdseil. Ihre Form erinnert an den Buchstaben „C“.
Winkelprofil	Eckstiele und Diagonalen bestehen aus Winkelprofilen. Ein Winkelprofil hat 2 Schenkel, die sich in der Ecke bzw. im Eckbereich treffen.
inneres Loch = erstes Loch	das zur Mitte der Diagonale liegende Loch erstes Niet oder erste Schraube 1. Loch ist immer das innerste mit höchst beanspruchtem Nettoquerschnitt
äußeres Loch = letztes Loch	am dichtesten am Knotenblech

Lastfälle, Versagen, Kräfte	
Primärversagen	Erstes Versagen, dass weiteres Versagen nach sich zieht
Versagenslastfall	Kap. 6.5.3.4
Normlastfall	Kap. 6.5.3
Reallastfall	Kap. 6.5.3.3
Maximalkraft	Kap. 4.8.6 bzw. Bild 107
Bruchkraft	Kap. 4.8.6 bzw. Bild 107
Kaskadenbruch	Umbruch der Tragmasten zwischen zwei Abspannmasten
Mastumbruch	Versagen im Bereich des Mastschafts, so dass die Traversen oder die Mastspitze auf den Boden kommt
Schadensbereich	Bereich im Mastschaft in die Diagonalen und Eckstiele, gerissen, verbogen oder geknickt, bei den untersuchten Masten wenige m unterhalb der unteren Traverse

Formelzeichen	
A_{net}	Nettoquerschnitt
b_1	Länge des angeschlossenen Schenkels
b_2	Länge des nicht angeschlossenen Schenkels
$\varnothing D$	Lochdurchmesser
t	Profildicke
e_2	Abstand zwischen Lochmitte und nächstem Profilrand
R_m	Zugfestigkeit
R_{eL}	Untere Streckgrenze
R_{eH}	Obere Streckgrenze
A	Bruchdehnung
n	Anzahl der Schrauben oder Niete einer Verbindung
A_s	Spannungsquerschnitt der Schraube bzw. des Niet
$R_{m,s}$	Zugfestigkeit der Schraube bzw. des Niet
N_{sk}	Charakteristischer Wert der Beanspruchbarkeit der Diagonale
$F_{\text{max,exp}}$	Maximalkraft im Zugversuch an Bauteilen
ABW	prozentualer Wert der Abweichung zwischen der berechneten Beanspruchbarkeit N_{sk} und der Maximalkraft im Versuch $F_{\text{max,exp}}$; $ABW = (F_{\text{max,exp}} - N_{sk}) / N_{sk}$
$f_{u,k}$	Charakteristischer Wert der Zugfestigkeit
$f_{y,k}$	Charakteristischer Wert der Streckgrenze

Dimensionen
Spannungen: $1 \text{ kN/cm}^2 = 10 \text{ MPa}$
Spannungen: $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ Mpa}$
Streckenlasten: 1 kg/m entspricht $9,81 \text{ N/m}$
Dichte: $1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$
Dichte und Wichte: 1000 kg/m^3 entspricht $9,81 \text{ kN/m}^3$

1.5 Untersuchungskonzept

Zur Untersuchung der Schäden, Ableitung des Versagensmechanismus und – ablaufs sowie Beantwortung der Fragen wurde folgende Vorgehensweise gewählt:

- Beim Ortstermin wurde nach den Schadensteilen gesucht, die Primärversagen aufweisen könnten. Die Probenahme erfolgte entsprechend.
- Werkstoffversuche und metallographische Untersuchungen wurden zur Charakterisierung und Identifizierung der vorgefundenen Stahlsorten durchgeführt und hinsichtlich maßgeblicher Regelwerke bewertet.
- Fraktographische Untersuchung der Schadensbruchflächen zur Identifizierung der Bruchmechanismen.
- Mit weiteren, unverbogenen Original-Prüfstücken wurden Bauteilversuche zur Ermittlung der tatsächlichen Bauteilbeanspruchbarkeit durchgeführt.
- Aus den zahlreichen und umfangreichen Unterlagen von RWE wurden die tatsächlichen Einwirkungen zum Schadenszeitpunkt in Form von Schneewalzen, deren Verteilung und Wind rekonstruiert. Dabei sollte die Belastungssituation so rekonstruiert werden, dass:

- einerseits der Widerstand des Masts gegen die Einwirkungen bis kurz vor (ca. 02:25 Uhr) dem Umbruch und
 - andererseits das Versagen des Primärbauteils und Umbruch des Masts um (ca. 02:27 Uhr)
 - ohne weiteres erklärt werden kann. Dazu werden die Belastungen gesteigert und die Lastkonstellationen verändert, bis das „schwächste Glied der Kette“ versagt. Dieser Lastfall wird dann Versagenslastfall genannt.
- Mit diesem Versagenslastfall werden mittels statischer Berechnungen die Stabkräfte, Belastungen und Beanspruchungen aller Bauteile im Schadensbereich berechnet.
- Durch Vergleich der Beanspruchbarkeit mit den abgeschätzten Beanspruchungen wird dann das Primärbauteil „als schwächstes Glied der Kette“ sowie dessen Versagensart identifiziert.
- Daraus wird auf den Ablauf des weiteren Versagens, die Sekundärschäden, den Mastumbruch und den Beginn des Kaskadeneffekts geschlossen.
- Die Bewertung der Ergebnisse anhand Voruntersuchungen, Regelwerk und Literatur führt dann zur Kombination der Schadensursachen.
- Auf Basis der Schadensursachen werden technische Empfehlungen gegeben, die zur Vermeidung ähnlicher Mastumbrüche beitragen sollen.

2 Bestandsaufnahme, Ortstermin, Prüfstücke, Unterlagen

2.1 Unterlagen von RWE

Die BAM hat mit [64] [65] [66] [67] von RWE und Prof. Thierauf [68] umfangreiche, technischen Unterlagen erhalten:

- Freileitungspläne: Verlauf der Freileitungen auf topographischer Karte "Profilpläne" mit dem genauen Verlauf der Freileitungen über die Flur- und Grundstücke
- Mastlisten: Verzeichnis der Masttypen für die einzelnen Mastnummern
- Werkstattzeichnungen der unsanierten und der sanierten Masten
- Statische Berechnungen nach der jeweils gültigen VDE-Norm 0210
- Statische Berechnungen zur "Stahlsanierung wegen Versprödung"
- Allgemeine Fotos Störung November 2005 mit den Schneewalzen
- Bilder der Schneewalzen an den Seilen und auf dem Boden
- Luftbilder einzelner Freileitungen
- Übersicht mit allen umgebrochenen Masten eingezeichnet in topographischer Karte
- Bilder (teilweise nicht zu Masten zugeordnet) unmittelbar nach dem Umbruch
- Bilder der umgebrochenen, aber noch nicht auf den Boden gelegten Masten
- Bilder der Reparatur/Entstörung

Diese und weitere Unterlagen sind in Kap. 11 zusammengestellt.

2.2 Ortstermin

2.2.1 Planung, Vorinformationen

Am 2005-12-19 wurde der Ortstermin Münsterland in Bonn bei der BNetzA geplant. Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurden aus der topographischen Karte mit den geschädigten Masten einige ausgewählt. Zu diesen wurden von RWE folgende Angaben gemacht:

- Stadtlohn: Bauleitnummer 1520, 3 Tragmasten, zwei Winkelabspannmasten (Bj. 1950) sind weggeräumt
- Legden: Bauleitnummer 1503, Mast 65-73 (Bj. 1960) Masten sind vorhanden, teilweise noch stehend
- bei Leer: Bauleitnummer 1525 (Bj. 1990) Mast 22 Winkelabspannmast vorhanden, Mast 27 Tragmast weggeräumt
- Metelen: Mast 57, 59, 60 Bauleitnummer 1536 (1951), Mast 58 (2004) weggeräumt
- Gronau: Schrottplatz mit den weggeräumten Masten, Zustand des Schrottplatzes ungeordnet, Identifizierung einzelner Masten nicht möglich.
- Steinfurt: Bauleitnummer 1536, Masten 41 und 43 sind Bestandteil der gerichtlichen Untersuchung.

Zum Zeitpunkt des Ortstermins waren viele der abgeknickten Strommasten weitgehend demontiert und beseitigt.

2.2.2 Generelle Vorgehensweise

Anhand der Masttafel wurden die Freileitung und die Mastnummer identifiziert. Aus den Schadensteilen der Masten wurden primär Prüfstücke mit folgenden Merkmalen ausgesucht:

- Diese Prüfstücke stammen vermutlich aus dem Baujahr des Masts, erkennbar am grünen Korrosionsschutz
- spröde Bruchflächenanteile
- keine/geringe Verformungen

Nach der Auswahl und Kennzeichnung der Prüfstücke erfolgte die Fotodokumentation und die Entnahme durch RWE Mitarbeiter. Die entnommenen Prüfstücke sind in Tabelle 3 aufgeführt.

2.2.3 Ortstermin BL1503

Am 2005-12-20 fand zwischen 9:40 Uhr bei Heeck und ca. 16:00 Uhr bei Nünning ein Ortstermin im westlichen Münsterland statt. Anwesend waren:

Es wurde beschlossen, dass eine Besichtigung des Schrottplatzes in Gronau nicht sinnvoll ist, da eine Zuordnung der Schrottteile zu einer Mast-Nr. nicht gewährleistet ist.

2.2.3.1 Winkelabspannmast M65 Bj. 1960, liegend

Mast 65 wurde nach dem Umbruch am 2005-11-26 an den Eckstielen abgetrennt und abgelegt, Bild 1.

Die Brennschnitte von früheren Probenahmen sind erkennbar, Bild 2. Es wurden einige Bruchstellen am Nietloch der Diagonalen gefunden und dokumentiert, Bild 3.

Im Versagensbereich sind verzinkte, neuere Diagonalen vorhanden. Auch an den verzinkten, bei der RWE-Sanierung vor 1-2 Jahren eingesetzten Diagonalen wurden Brüche festgestellt, die aber nicht gerade durchgebrochen, sondern am Loch abgerissen sind, Bild 4.

Die Korrosionsstellen wurden besichtigt und der Korrosionszustand als unkritisch eingestuft.

Lt. Aussagen von RWE habe dieser Mast durch Torsion versagt.

Prüfstücke aus dem Eckstiel E4 mit Knotenblechen sowie gebrochene Diagonalen wurden markiert, Bild 5.

2.2.3.2 Tragmast M66 Bj. 1960 liegend

Alle Diagonalen waren durch verzinkte Diagonalen ersetzt, Bild 6.

Die Leiterseile sind teilweise aufgekorbt. Gefundene Drahtbruchstellen wiesen Scherbrüche und Fließkegel auf, Bild 7. An den Traversen wurden Schäden festgestellt.

Nach Aussagen von _____ waren Schneewalzen teilweise nur an einem Stromkreis zu finden. Die Eis-Last und damit auch der Durchhang sei auf den Seiten unterschiedlich gewesen, wodurch Seilkraft-Differenzen von 2-3 Tonnen pro Traversen-Spitze große Torsionsmomente für den Mastschaft erzeugt hätten. Nach Aussagen von _____ drehte der Mast ganz langsam

weg, knickte ein und dann hing der Mastkopf herunter. Nachdem sich der erste Mast gedreht hatte, folgte der zweite ca. 1 - 2 s später, drehte ebenfalls ganz langsam weg und fiel dann um.

An diesem Tragmast wurden keine Proben genommen, da nur noch neue, verzinkte Diagonalstreben vorhanden sind. Alle Ein-Nietverbindungen wurden durch Schraubverbindungen mit jeweils einer Schraube ersetzt. Einzelne Diagonalen wurden mit der Schraube aus den Eckstielen herausgerissen, Bild 8; spröde Bruchstellen waren nicht zu erkennen.

2.2.3.3 Tragmast M68 Bj. 1960 stehend

Dieser Mast befand sich noch in stehender Position, Bild 9. Der obere Teil des Schafts ist in Richtung der Freileitung (SO) umgebrochen, beide Traversen hingen nach unten.

Der Mastschaft ist von ungefähr 1 m über Fundament bis kurz unterhalb dieser Traversenstelle durch „Schmetterlingsprofile“ verstärkt.

2.2.3.4 Mast Nr. 69 Bj. 1960 stehend

Der Versagensbereich befindet sich etwas tiefer als bei M68, Bild 10. Eckstiel E1 ist gerissen und weist mehrere Biegestellen auf.

2.2.3.5 Mast Nr. 73 Bj. 1960, liegend

Im Tragwerk wurden alle Diagonalen bis auf die Mastspitze ausgetauscht.

5 Prüfstücke wurden gekennzeichnet, Nr. 10/11/12/13/14, Bild 11.

2.2.4 Ortstermin BL1536

2.2.4.1 Mast Nr. 27 - Freileitung 1536 Bj. 1951

Der Mast versagte durch Biegung und Torsion, Bild 12.

Für Werkstoffuntersuchungen wurden Prüfstücke gekennzeichnet, Bild 13.

2.2.4.2 Mast Nr. 26 – Freileitung 1536 Bj. 1951

An den Schadensteilen wurde festgestellt, dass Diagonalen an M26 zusätzliche Gewaltbruchflächen aufweisen, die offensichtlich nicht nur durch den Umbruch des Masts entstanden sein können. Nach Angaben von RWE wurde dieser Mast von dem Ort, an dem er gebrochen ist, wegtransportiert und auf einem Hof gelagert. M26 wurde deshalb nicht näher untersucht.

2.2.5 Ortstermin BL1525

Nach Angaben von RWE gibt es an dieser BL mehrere Masten, die nicht umgebrochen sind, sondern „nur“ tordiert und durch die Leiterseile „gehalten“ wurden. 2-3 m unterhalb der Traverse ist ein Eckstiel nach außen und einer nach innen ausgewichen. Diese Masten konnten daher mit neuen Mastoberteilen repariert werden. Dabei wurde jeweils der beschädigte Oberteil an der Schraubverbindung abgetrennt, mit einem Kran heruntergehoben und mit den Traversen abgelegt.

2.2.5.1 Mast-Nr. 10 BL1525 – Baujahr 1991

Am M10 wurden duktile Anrisse, geknickte Diagonalen und Eckstiele, aber keine Bruchstellen gefunden.

2.2.5.2 Mast-Nr. 22 BL1525 Baujahr 1991

M22 ist nicht umgebrochen, sondern war „nur“ tordiert, Bild 14. Auch hier wurde das Mastoberteil mit 2 Kranen von Unterteil abgehoben und vorsichtig gelegt. Am

Mastoberteil sind leichte Schäden infolge Torsion mit einigen geknickten Diagonalstreben zu erkennen, Bild 15. Eckstiel 1 ist geknickt und angerissen. 2 Prüfstücke wurden gekennzeichnet und entnommen.

BL1525 Mast 22 hat unmittelbar unterhalb der unteren Traverse durch Knicken der Diagonalen versagt. Der Bruch einer zugbelasteten Diagonale ist nicht zu erkennen, Bild 14, Bild 15.

Nach Angaben von RWE seien die Masten M22 und M10 dieser BL erst beim Abschlagen der Schneewalzen aufgrund der entstandenen einseitigen Belastung überlastet und tordiert worden.

2.2.6 Ortstermin Mast „Nünning“

Bei diesem Mast ist der obere Teil zu Boden gestürzt.

Obwohl hier ein deutlich schlechterer Wartungszustand der Beschichtung (offensichtlich seit längerer Zeit nicht überarbeitet worden) vorliegt, sind keine nennenswerten Querschnittsschwächungen durch Korrosion zu erkennen.

Da der Mast vermutlich nicht zum RWE-Netz gehört, wurde beschlossen, die gekennzeichneten Schadensteile -40 und -41 vor Ort zu belassen und diesen Mast nicht weiter zu untersuchen.

2.3 Rekonstruktion der Positionen der Schadensteile im Mast

Der Winkelabspannmast M65 der BL1503 enthielt mehrere Bruchstellen, die makroskopisch einen spröden Charakter aufwiesen. Dieser Mast wurde daher als besonders interessant für die weitere Untersuchung eingestuft. Zahlreiche Prüfstücke wurden entnommen, darunter die Diagonalen mit den Bruchflächen, Bild 16. Letztere erhielten die Nummern M65-01, M65-02 und M65-04. Bild 16 zeigt diese 3 Prüfstücke nach dem Eingang an der BAM.

Die 3 genannten Diagonalen M65-01, M65-02 und M65-04 konnten zunächst auf den Bildern vom Ortstermin identifiziert werden, Bild 17. Vom Mast M65 existieren weitere Aufnahmen, die teilweise eine ausreichende Auflösung haben, um die einzelnen Bauteile erkennen zu können. Eines dieser Bilder wurde aufbereitet und konnte dann genauer analysiert werden, Bild 18 ff. In Bild 18 ist die Lage von M65 in der BL1503 skizziert. Die Skizze ist am Foto ausgerichtet, so dass Norden rechts im Bild ist. Die Eckstiele E1 bis E4 wurden eingezeichnet. In Bild 19 ist der obere Teil des Fotos vergrößert. Die Positionen der entnommenen Diagonalen und der Bruchstellen wurden eingezeichnet.

Die Positionen wurden nun auf die Zeichnung des Masts übertragen, Bild 20. Die Diagonale M65-04 überspannt den Übergang von Schuss 2 nach Schuss 3. Alle 3 Diagonalen lagen nur ein kurzes Stück unterhalb der unteren Traverse. Die zugehörige Wand mit den Eckstielen E3 und E4 lag auf der südwestlichen Seite der BL1503, gegenüber dem an der Ecke der Freileitung am Mast M65 eingeschlossenen Winkel, vgl. Bild 18 oben.

2.4 Instandhaltungszustand

Beim Ortstermin wurden die besichtigten Masten auch allgemein hinsichtlich des Instandhaltungszustandes, eingehend hinsichtlich des Korrosionszustands, Kap. 4.1, visuell untersucht.

Die Instandhaltungsvorschriften und -protokolle von RWE gingen erst später in der BAM ein. Die übergebenen Instandhaltungsprotokolle der besichtigten Masten der BL1503 wurden überprüft. Anhand der Dokumentationen vom Ortstermin sowie der Prüfstücke wurden offensichtliche Mängel am Instandhaltungszustand nicht gefunden.

3 Auswertung der Unterlagen

3.1 Literaturrecherche „Versprödung Thomasstahl“

3.1.1 Fragestellung

Unter welchen Bedingungen laufen zeitabhängige Änderungen der mechanisch-technologischen Eigenschaften von Thomasstahl ab und wie sind diese zu charakterisieren?

3.1.2 Zeitschriften

Im vorliegenden Kontext maßgebliche Zeitschriften wie „Archiv für das Eisenhüttenwesen / Steel Research / Steel Research International“ gekoppelt mit „Stahl und Eisen“ (ab 1927) sowie „Der Stahlbau“ (ab 1940) wurden jahrgangsweise durchgesehen. Ferner wurden in der Bibliothek des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) in Düsseldorf Monographien zum Thema Thomasstahl sowie ein unikatler Zeitschriften-Sachkatalog (abgeschlossen 1983) ausgewertet.

Folgende Schlagworte wurden in den Zeitschriftenrecherchen wie auch bei der Suche in den Datenbanken verwendet: Alterung, Altstahl, Baustahl, Bruch, Duktilität, Eigenschaften, Festigkeit, Freileitungsmast, Gittermast, historisch, Hochspannungsmast, Loch, Mast, Niete, Schaden, spröd, Stahlbau, Stahlmast, Stickstoff, Thomasstahl, Tragwerk, Versprödung.

3.1.3 Datenbanken, Internet

Die Recherche erstreckte sich auf die elektronische Datenbank TEMA (Einträge ab 1968 vorhanden) sowie auf die Bestände bei Elsevier www.sciencedirect.com (ohne Zeitbegrenzung).

3.1.4 Ergebnis

Thomasstahl wurde in Deutschland während einer Periode von etwa 100 Jahren bis in die 70-er Jahre des letzten Jahrhunderts hergestellt. Aus der Fülle der zum Thema Thomasstahl veröffentlichten Aufsätze und Publikationen wurden im Rahmen der Recherche 95 als im gegebenen Kontext potentiell relevant klassifiziert und beschafft. Hiervon wurden 41 Arbeiten als prioritär eingestuft und ausgewertet.

Eine Vielzahl von Veröffentlichungen beschäftigt sich vornehmlich mit metallurgisch-technologischen Gesichtspunkten der Herstellung von Thomasstahl. Diese Thematik war nicht Gegenstand der durchgeführten Recherche.

3.1.5 Auswertung

3.1.5.1 Zum Begriff Thomasstahl

Mit der von Sidney G. Thomas und Percy G. Gilchrist im Jahre 1878 eingeführten und später Thomas-Verfahren genannten Methode zur Flusstahlerzeugung kann phosphorreiches Roheisen im Konverter zu Stahl verblasen werden, was durch eine basische Zustellung des bislang sauer ausgekleideten Bessemer-Konverters gelang. Wegen der heimischen phosphorreichen Erzlagerstätten hat sich das Thomas-Verfahren in Europa sehr schnell durchsetzen und lange Zeit halten können, spielt jedoch aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen seit etwa 30 Jahren keine Rolle mehr.

Ohne äußere Wärmezufuhr wurde durch Windfrischen aus Roheisen mit hohem Phosphor- und niedrigem Siliziumgehalt zum größten Teil ein weicher, also koh-

lenstoffarmer „Thomasstahl“ als Massen- und Baustahl erzeugt. Er unterscheidet sich analytisch von dem entsprechenden Siemens-Martin-Stahl neben im Allgemeinen etwas niedrigerem Kohlenstoffgehalt vor allem durch den höheren Phosphor- und Stickstoffgehalt [2][3][4], Tabelle 4. Da im Einzelfall jedoch vielfach Überschneidungen vorliegen können, lässt die Zusammensetzung allein keine Entscheidung zu, ob Thomas- oder Siemens-Martin-Stahl vorliegt [5]. Im Zuge der Weiterentwicklung des Thomas-Verfahrens wurden über die Jahre vielfältige technologische Maßnahmen verbessert oder eingeführt (z.B. Desoxidation, Beruhigung, Stickstoffabbinding), um die chemische Zusammensetzung und Güte zu verbessern, auf die im Einzelnen hier jedoch nicht eingegangen werden soll. Im Ergebnis wurde es möglich, eine breite Palette spezifischer, auch qualitativ höherwertiger Thomasstähle zu erzeugen [6].

Phosphor und Stickstoff beeinflussen die mechanisch-technologischen Eigenschaften des Thomasstahls ungünstig. Im Vergleich zu Thomasstahl sind z. B. Alterungsneigung und -betrag bei nach üblicher Herstellungsart basisch erschmolzenen Siemens-Martin-Stählen weit geringer [7][10]. Nichtsdestotrotz war Thomasstahl für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten ein geeigneter und in großem Umfang eingesetzter Werkstoff. Zum Beispiel sind allein in Deutschland bis 1943 etwa 300 Millionen Tonnen Thomasstahl erblasen worden [6]. Dezierte Anwendungsempfehlungen und -vorschriften finden sich u.a. in [5][11][12]. Weiterhin verweisen auch zum Beispiel deutsche Regelwerke zur Erstellung von Gittermasten für Freileitungen bis Ende der 60-er Jahre des letzten Jahrhunderts bezüglich der zulässigen Werkstoffe u.a. auf Flusstahl St 37/12 Normalgüte [45], St 37.12 [46] bzw. St 37 [47], die in den entsprechenden Werkstoffnormen [49][50] bzw. [51] genormt sind und nach dem Thomas-Verfahren erschmolzen werden durften. In [2] wird darauf verwiesen, dass im Hochbau seit jeher (Anm.: im Jahr 1957 veröffentlicht) für Träger-, Winkel- und U-Profile fast ausschließlich Thomasstahl verwendet wurde. Voraussetzungen hierfür sind jedoch, dass sowohl bei der Verarbeitung als auch den zu erwartenden Beanspruchungen (keine stärkere Kaltverformung) die Besonderheiten des Thomasstahls (Alterungsempfindlichkeit aufgrund des hohen Stickstoffangebots) berücksichtigt werden. Beim unberuhigten Vergießen ist ferner der mögliche Einfluss von Seigerungen zu beachten.

3.1.5.2 Begriffe und Mechanismen bei der Alterung von Stahl

Unter Alterung allgemein versteht man jede zeitabhängige Änderung einer Stahleigenschaft. Die Änderung kann sich durch die Beeinträchtigung der Gebrauchseigenschaften der Stähle ungünstig, z.B. als Abnahme der Zähigkeit (Versprödung) oder der Verarbeitbarkeit, aber auch günstig, z.B. als Zunahme der Härte und Festigkeit, auswirken.

Man unterscheidet Alterung nach einem Abschrecken (*Abschreckalterung*), wobei sich neben der Blockierung von Versetzungen durch interstitielle Atome auch Karbide und Nitride in größerem Umfange ausscheiden, und Alterung nach (oder auch bei) einer Verformung (*Reck-, Verformungs- oder mechanische Alterung*), bei der wegen der großen Zahl von Versetzungen im Wesentlichen die Wanderung der interstitiellen Atome zu den Versetzungen und deren Blockierung stattfindet. Der Stickstoff wird beschleunigt an Versetzungen in plastisch umgeformten Bereichen ausgeschieden. An den Diffusionsvorgängen bei der Alterung sind Kohlenstoff und Stickstoff beteiligt, wobei Stickstoff wegen der größeren Löslichkeit und schnelleren Diffusion eine führende Rolle spielt [7][13][14].

Abschreckalterung

Grundlage der für die Abschreckalterung von Stählen kennzeichnenden zeit- und temperaturabhängigen Ausscheidungsprozesse ist ein übersättigter α -Eisenmischkristall. Die Elemente Kohlenstoff und Stickstoff beeinflussen sich gegen-

seitig in der Ausscheidung, wobei die Prozesse zusätzlich von anderen Elementen wie Mangan oder Silizium beeinflusst werden [7][15][16][17].

Bei rascher, nicht dem Gleichgewicht entsprechender Abkühlung von Stählen (vorrangig weiche, unlegierte bzw. Baustähle) von Temperaturen $\leq A_{c1}$ auf Raumtemperatur geraten C- und N-Atome in Zwangslösung. Diese ergibt sich daraus, dass beim Aufheizen und Halten des Stahls auf Glühtemperatur zunächst eine zunehmende Menge dieser Elemente im Gitter gelöst wird (bei Kohlenstoff entspricht die gelöste Menge im Gleichgewicht der Linie PQ des Systems Eisen-Kohlenstoff) und bei Abkühlung nicht genügend Zeit zum Wiederausscheiden vorhanden ist. Zum Beispiel beträgt die maximale Löslichkeit von Stickstoff im technischen Eisen bei 590 °C ca. 0,1 % und bei Raumtemperatur nur 0,014 % [7][18]. Die Ausscheidung findet anschließend bei Raum- oder Gebrauchstemperatur statt und erfordert oft Wochen oder Monate bis zu deren endgültigem Abschluss. Diese Art der Alterung wird als *Abschreckalterung* bezeichnet [7][19]. Zunächst erfolgt hierbei eine Umordnung von eingelagerten Atomen im Spannungsfeld der Versetzungen und eine Wanderung zu den Versetzungen. Anschließend setzt dann die Diffusion zu Karbid- oder Nitridkeimen ein. Ausscheidungen an Versetzungen spielen aufgrund der niedrigen Versetzungsdichte nur eine untergeordnete Rolle [17].

Reckalterung

Die *Reckalterung* (auch *Verformungs- oder mechanische Alterung* genannt) beruht auf der Diffusion von Kohlenstoff und Stickstoffatomen in das Spannungsfeld von Versetzungen, die durch Kaltverformen zusätzlich in das Gitter eingebracht wurden. Diese Atome blockieren eine Versetzungsbewegung, die durch eine erneute Kaltverformung ausgelöst wird und ergeben Festigkeitserhöhungen, verbunden mit einer Verschlechterung der Plastizität [19]. Bei der Reckalterung überwiegt in der Mengenbilanz die Wanderung zu den Versetzungen gegenüber der Diffusion zu Karbid- oder Nitridkeimen aufgrund der hohen Versetzungsdichte [17].

Natürliche und künstliche Alterung

Im Hinblick auf die Temperatur sind zwei Formen der Alterung zu unterscheiden: Die *natürliche Alterung* läuft bei Raumtemperatur (bzw. klimatischer Temperatur) ab und ist selbstinduzierend oder tritt nach einer Kaltverformung auf. Der Begriff *künstliche Alterung* (*thermisches Altern*) beinhaltet eine gezielte Beeinflussung der Alterungsprozesse im Hinblick auf eine Vorwegnahme der meist über längere Zeiträume unkontrolliert ablaufenden natürlichen Alterung mit dem Ziel, diese bei erhöhten Temperaturen innerhalb einer kurzen Zeit abzuschließen [18][19].

Sollen Festigkeitserhöhungen und Plastizitätsverluste im Ergebnis einer gezielten Alterung sicher vermieden werden, dann empfiehlt sich die Anwendung einer *Überalterungsbehandlung*. Diese hat zum Ziel, einen stabilen Gefügestand durch weitgehende Ausscheidung von Kohlenstoff und Stickstoff herzustellen. Darüber hinaus sind aber auch die Partikel in einer Größe auszuscheiden, die sich weder auf die Festigkeit noch auf die Plastizität ungünstig auswirken [19].

Die durch die Ausscheidungen verursachte Verfestigung ist bei konstantem Gesamtvolumen an Ausscheidungen abhängig von der Anzahl und damit der Größe der ausgeschiedenen Partikel. Insbesondere bei höheren Temperaturen lösen sich kleinere Teilchen auf, diffundieren die Atome und es wachsen größere Teilchen durch Neuausscheidung der Atome (*Überalterung, Ostwald-Reifung*), um die Grenzflächenenergie zu verringern.

Die Größe der Ausscheidungen bestimmt maßgeblich ihre Auswirkung auf die mechanischen Eigenschaften. Die Wechselwirkung zwischen Versetzungen und 3-dimensionalen Hindernissen (Ausscheidungen) ist unterhalb eines kritischen Teilchendurchmessers d_{krit} durch Schneidprozesse und oberhalb durch Umge-

hung gekennzeichnet. Der Verfestigungsbeitrag von Teilchen ist umso höher, je kleiner ihr Durchmesser ist. Bezüglich der Feinheit besteht jedoch eine Grenze, da unterhalb von d_{krit} das zunehmende Schneiden von Teilchen über die damit sukzessive einhergehende Entfestigung von Gleitebenen und Ausbildung einer groben Gleitverteilung zu einer Begünstigung von Sprödbbruch führt. Das Maximum der Festigkeit wird somit im Bereich des kritischen Teilchendurchmessers erreicht und nimmt mit fortschreitender Ostwald-Reifung wieder ab. Entgegengesetzt zur Festigkeit entwickeln sich die Verformbarkeit und Zähigkeit. In Abhängigkeit von der Auslagerungstemperatur und -dauer können die spröden Anfangszustände der natürlichen Alterung überwunden werden und Eigenschaftswerte erreicht werden, die dem Ausgangszustand nahe kommen, wie beispielsweise in [20] berichtet.

Für ausführliche Darstellungen der metallkundlichen Grundlagen von Alterungsvorgängen in Stählen wird an dieser Stelle zum Beispiel auf [15] und [21] verwiesen.

Einfluss metallurgischer Aspekte auf die Alterung

Der übliche windgefrischte Thomasstahl (Gütegruppe 1) neigt infolge seines vergleichsweise hohen Gehaltes an Stickstoff in stärkerem Maße zur Alterung und damit zur Versprödung als nach anderen Verfahren erzeugte Flusstähle [2][4][9][22][23]. Hinsichtlich einer zunehmenden Alterungsanfälligkeit und damit Versprödungsneigung lässt sich die folgende Einstufung treffen: 1. Si- und Al-beruhigter, feinkörniger SM-Stahl; 2. halbberuhigter SM-Stahl; 3. unberuhigter Thomasstahl [24], wobei Aluminium-Beruhigung etwa doppelt so wirksam ist wie Silizium-Beruhigung [25], Bild 21. Die Begleitelemente Phosphor, Stickstoff und Sauerstoff dominieren die Alterungsneigung unberuhigter Stähle gegenüber dem Einfluss von Kohlenstoff und Mangan. Ihre Wirkung entspricht im Verhältnis zueinander etwa 1 : 3,3 : 0,75, wobei der Elementgehalt und die Vergießungsart maßgebend gegenüber dem Erschmelzungsverfahren sind [26][27]. Weicher Thomasstahl enthält i.d.R. mehr Elemente, die zur Ausscheidungshärtung befähigen, als Siemens-Martin-Stahl. Diese Neigung zur Ausscheidungshärtung in Form von Alterungssprödigkeit nach vorangegangener Verformung (Anm.: Reckalterung) kann sich für manche Verwendungszwecke ungünstig auswirken [5].

Für die allgemeinen Baustähle nach DIN 17100 [50][51] und ihrer Vorgängernorm DIN 1612 [49] liegt ein nachteiliger Einfluss der Alterung auf das Zähigkeitsverhalten vor, da es besonders unter Einwirkung erhöhter Temperaturen und nach Kaltverformung zu einer Versprödung kommen kann. Diese Alterungsversprödung wird weitgehend von freiem Stickstoff verursacht und verlor jedoch mit der fortschreitenden Verlagerung der Erzeugung auf die stickstoffarmen Sauerstoffblas-Stähle selbst bei aluminiumfreiem Vergießen mehr und mehr an Bedeutung. Einer als Verschiebung der Übergangstemperatur ausgedrückten Alterungsversprödung von 25 bis 60 K bei Thomasstählen stehen Werte von nur 5 bis 15 K bei Sauerstoffblas-Stählen gegenüber [13].

Für eine weitgehende Alterungsbeständigkeit sind Stickstoffgehalte unter rund 0,001 % erforderlich. Dies lässt sich durch unterschiedliche Maßnahmen wie z.B. Fernhalten oder Entfernen des Stickstoffs (z.B. Vakuumbehandlung, Entstickungsglühung) oder stabiles Abbinden durch Zugabe von Nitridbildnern (z.B. Aluminium) erreichen [13][19].

Da nach dem Thomas-Verfahren erzeugter Baustahl üblicherweise einen sehr geringen Kohlenstoffgehalt aufweist, wird im Kontext der Alterung nachfolgend schwerpunktmäßig die Wirkung des Elements Stickstoff betrachtet.

3.1.5.3 Alterung von Thomasstahl

Zeitabhängige Änderung mechanisch-technologischer Eigenschaften

Für Stahlkonstruktionen werden bei der Planung und dem Bau die relativ kurz nach der Stahlerzeugung festgestellten Eigenschaften als zutreffend unterstellt. In der Frühzeit der Verwendung von Flussstahl für Stahltragwerke galten als charakteristische Kenngrößen die im Zugversuch ermittelten Werte für die Streckgrenze, Zugfestigkeit und Bruchdehnung. Dabei wurden Zugfestigkeit und Streckgrenze für die allgemeine Beurteilung der rechnerischen Tragfähigkeit herangezogen. Die Bruchdehnung galt als Maß für die Zähigkeit des Werkstoffs und des Widerstandsvermögens der Konstruktion gegenüber unfreiwilligen Beanspruchungen [18]. Bis heute werden die Begriffe plastische Verformbarkeit und Zähigkeit immer wieder fälschlicherweise synonym verwendet. Eine saubere Begriffsbestimmung ist jedoch auch im Hinblick auf die hier diskutierte Thematik notwendig. Die plastische Verformbarkeit oder Duktilität kennzeichnet das Vermögen eines Werkstoffs zur irreversiblen Verformung ohne Rissbildung, während die Zähigkeit als Widerstand gegen Rissinitiierung und -ausbreitung definiert wird. Zwischen beiden Eigenschaften besteht ein enger Zusammenhang, da die an der Rissspitze ablaufenden Prozesse wesentlich von der Duktilität bestimmt werden.

Die Abschreckalterung durch Stickstoff und ihr Einfluss auf die zeit- und temperaturabhängige Änderung der mechanisch-technologischen Eigenschaften wird u.a. in den Arbeiten [17][18][26][28][29] untersucht. Nach natürlicher Abschreckalterung eines Thomasstahls mit einer Auslagerungszeit (Gebrauchsdauer) von 90 Jahren wurde in [18] ein Anstieg der Übergangstemperatur im Kerbschlagbiegeversuch von 20 K gegenüber einem durch Glühbehandlung eingestellten, dem Werkstoffzustand nach der Herstellung nahekommenden Referenzwert festgestellt. Über den Verlauf der klimatischen Temperaturen während der Gebrauchsdauer liegen hierbei Informationen nicht vor. Ebenfalls für einen Thomasstahl wird in [19] eine Zunahme der Festigkeit und Abnahme der Bruchdehnung nach natürlicher Abschreckalterung dargestellt, die nach wenigen Stunden beginnt und nach einem Jahr weitgehend abgeklungen ist, Bild 22.

Erhöhte Temperaturen beschleunigen die Alterung, wovon bei experimentellen Untersuchungen i.d.R. Kredit genommen wird. Eine geringe Festigkeitszunahme wurde in [13] nach einer Auslagerung bei 40 °C festgestellt. In [29] führte Abschreckalterung bei unberuhigtem Thomasstahl bei Auslagerungstemperaturen von 50 °C zu einer Übergangstemperaturerhöhung von ca. 40 K nach 2000 h Auslagerung und bei 150 °C bereits nach 200 h. Bei 250 °C trat bereits nach 20 h Überalterung auf, wodurch die Übergangstemperaturerhöhung wieder auf weniger als 20 K abnahm. Langzeituntersuchungen wurden nicht durchgeführt, so dass keine Informationen über einen ggf. weitergehenden Rückgang der Übergangstemperaturerhöhung vorliegen, Bild 23.

Bei der Abschreckalterung tritt nach einer Festigkeitszunahme und dem Durchlaufen eines Maximums eine Überalterung auf, wobei die Eigenschaftswerte des Ausgangszustandes nachfolgend unterschritten werden können [17][18][29][30]. Die Duktilität entwickelt sich entgegengesetzt zur Festigkeit, Bild 24.

Derartige Überalterungsprozesse werden jedoch i.d.R. durch künstliche Alterung mit erhöhten Auslagerungstemperaturen hervorgerufen bzw. beschleunigt, die zum Teil deutlich oberhalb der hier relevanten, für den Stahlbau maßgebenden Einsatztemperaturen liegen, Bild 23. Deshalb erscheint eine Übertragung der Ergebnisse auf die Bedingungen üblicher mitteleuropäischer klimatischer Temperaturen allenfalls tendenziell möglich. Bei künstlicher Alterung ist ferner zu bedenken, dass je nach der angewandten Auslagerungstemperatur auch der Kohlenstoff zur Alterung mehr oder weniger beiträgt, die Alterungsneigung dann also nicht in der Weise erfasst wird, wie sie sich bei Raumtemperatur auswirkt [13].

In diesem Zusammenhang ist auch auf die fehlende Praxisnähe der bei der Beurteilung der Alterungsneigung lange Zeit üblichen vorverformten und künstlich gealterten Kerbschlagbiegeprobe hinzuweisen, da diese in keinem Zusammenhang mit der natürlichen Alterung der Stähle bei Raumtemperatur steht [13][24]. Für vergleichende Untersuchungen der Alterungsanfälligkeit ist sie jedoch durchaus geeignet.

Auf der Basis der Auswertung umfangreicher Versuchsserien an Kerbschlagbiegeversuchen wurde in [26] ein quantitativer Zusammenhang zwischen der chemischen Zusammensetzung (Begleitelemente) und der Alterungs-Kerbschlagzähigkeit unberuhigter Stähle abgeleitet, um Spielräume bei der Stahlherstellung auszuloten und deren Kosten zu reduzieren. Die Korrelation wurde in [28] noch um den Einfluss der Temperatur und der Vorverformung erweitert. Im nachfolgenden Schrifttum tauchen Hinweise auf eine Nutzung dieser Korrelation jedoch nicht mehr auf.

Bei der künstlichen Alterung bestimmen die Kaltverformung und die Anlassbehandlung die resultierende Zähigkeitsverminderung, wie bei der Untersuchung unberuhigter allgemeiner Baustähle festgestellt wurde [31]. Hierbei verursacht jedoch in erheblichem Maße die Kaltverformung die Versprödung des Werkstoffes. Die eigentliche Alterungsversprödung (infolge Abschreck- und Reckalterung) ergibt noch eine zusätzliche Verschiebung der Übergangstemperatur, wofür bereits Anlasstemperaturen von 50 oder 100 °C genügen [13][24][31][32][33]. Die Höhe des Verformungsgrades und die Art der Kaltverformung wirken sich jeweils unterschiedlich aus. Es zeigte sich, dass Recken die geringste und Querstauchen die größte Versprödung der Proben bewirkte, Bild 25 und Bild 26.

Eine natürliche Alterung allgemeiner Baustähle ist, wenn überhaupt, dann nur in sehr geringem Maße zu erwarten. Zieht man von der gesamten Verschiebung der Kerbschlagzähigkeits-Temperaturkurve, die durch Verformung und Auslagerung bei Raumtemperatur entsteht, den verformungsbedingten Anteil ab, so liegt die durch Alterung bei Raumtemperatur bedingte Verschiebung nur noch in der Größenordnung von wenigen Grad [13][24][31], Bild 27. Die Alterungsversprödung der Baustähle enthält stets auch einen geringen Kohlenstoffanteil, da Kohlenstoff bei diesen Stählen immer in ausreichender Menge frei, d.h. nicht als Karbid abgebunden, vorliegt. Dies gilt aber nur für die künstliche Alterung. Bei Raumtemperatur kommt es wegen der geringen Löslichkeit und erschwerten Diffusion des Kohlenstoffs auch nach sehr langer Auslagerungsdauer im Allgemeinen zu keiner messbaren Alterungsversprödung durch Kohlenstoff [13].

Die Kerbschlagzähigkeit in den Seigerungszonen unberuhigter Baustähle kann durch die Anreicherung an Begleitelementen erheblich herabgesetzt und die Übergangstemperatur erhöht werden [33]. Erstreckt sich die Kaltverformung auch auf die Seigerungszonen, so wird die durch Reckalterung bewirkte Versprödung deutlich von den Seigerungsverhältnissen beeinflusst [13].

Auswirkungen der Alterung auf das Beanspruchungsverhalten von Bauteilen

Im Stahlbau, besonders im Freileitungsbau, kann bei Niet- oder nicht vorgespannten Schraubverbindungen mit gestanzten Löchern eine ausgeprägte Sprödbbruchneigung vorliegen. Die Berandungen der gestanzten Löcher, über die die Krafteinleitung erfolgt, weisen eine stark inhomogene Kaltverfestigung auf. Bei Vorliegen sprödbbruchfördernder konstruktiver und Beanspruchungsbedingungen (größere Blechdicke, Kerben, tiefe Temperatur, dynamische Belastung) sowie eines alterungsempfindlichen Werkstoffs (Reckalterung im Lochrandbereich) kann es bereits bei üblichen Gebrauchstemperaturen zum Sprödbbruchversagen des Bauteils kommen [34]. In ähnlicher Weise wie beim Stanzen werden beim Scherenschneiden von Thomasstählen die Schnittkanten stark verformt, wobei erhebliche Eigenspannungen verbleiben und neben der Kaltverfestigung

infolge Reckalterung Versprödung auftritt, die bis zur Rissbildung führen kann [35][36].

Schadensfälle, die bei der Verarbeitung und im Gebrauch von unberuhigtem Thomasstahl am häufigsten auftraten, waren auf dessen spezifische Versprödungsneigung infolge Alterung zurückzuführen. Örtliche „Störstellen“, wie Kaltverformungen, hohe Erhitzung oder auch örtliche Härtung, können Ursachen für einen Sprödbbruch sein, der sich u. U. über den gesamten Querschnitt erstreckt. Hierbei nimmt die Sprödbbruchneigung mit steigender Blechdicke zu. Zu örtlichen Störungen führen z.B. Sauerstoffbrennschnitte, Scherenschnitte, Stanzflächen, Richtrollendrucke oder Schweißnähte. Bei der Verarbeitung und Anwendung von unberuhigtem Thomasstahl sind deshalb die genannten Störungen entweder zu vermeiden, zu entfernen oder durch eine Nachbehandlung unschädlich zu machen, wie bereits seit langem bekannt ist [4].

3.1.6 Fazit

Im Kapitel 3.1 wurden der Ausdruck „Thomasstahl“ erläutert sowie in allgemeiner Form Begriffe, Mechanismen und Einflussgrößen bei der Alterung von Stahl erklärt. Ferner wurden die zeitabhängige Änderung mechanisch-technologischer Eigenschaften bei der Alterung von Thomasstahl und deren Auswirkungen auf das Beanspruchungsverhalten von Bauteilen dargestellt. Damit wurde die Grundlage gelegt, in den folgenden Kapiteln die an den Prüfstücken und Schadensteilen ermittelten Eigenschaften vergleichend in den Kontext der Alterung einordnen und bewerten zu können.

3.2 Literatur „Schäden an Freileitungen“

3.2.1 Schäden durch Thomasstahlversprödung

Ausgangspunkt der Untersuchungen in [34] war ein Schadensfall an einer 110 kV Freileitung der Deutschen Bundesbahn, bei dem Sprödbbruch bei 4 Eckstielen aufgetreten war. Als Ausgangsstellen der Sprödbrüche konnten die Leibungen der dort vorschriftswidrig durch Stanzen hergestellten Löcher an den Fundamentverschraubungen ermittelt werden. Festgestellt wird, dass bei zur Alterung neigenden Werkstoffen sich durch Kaltverformung und Reckalterung die Sprödbbruchübergangstemperatur im Randbereich gestanzter Löcher so weit erhöht, dass sie in den Bereich der zu erwartenden Umgebungstemperatur beim Einsatz kommt. Experimentell nachgewiesen wurde, dass die Erhöhung der Spaltbruchübergangstemperatur verbunden mit der wirksamen Mehrachsigkeit des Spannungszustandes ist, welche stark von der Blechdicke abhängt und mit wachsender Blechdicke zunimmt [34].

3.2.2 Schäden an Freileitungen

In den alten Bundesländern gab es 1990 in Freileitungen 110...380kV insgesamt 132.289 Stahlgittermasten [1]. Als Solllebensdauer für Strommasten wird in [1] mindestens 60 Jahre genannt.

Bei Schäden an Freileitungsmasten wird in [1] die allgemein gültige Vorgehensweise vorgeschlagen, dass mit einer eingehenden Schadensanalyse der Schadensmechanismus identifiziert wird und darauf aufbauend Maßnahmen zur Prävention entwickelt werden.

In [1] und [69] werden auch Sprödbbruch-Schäden an Winkelabspannmasten beschrieben, die auch auf Versprödung und damit Minderung der Bauteiltragfähigkeit um bis zu 44 % in Bezug auf die rechnerische Beanspruchbarkeit aus der Norm zurückzuführen waren. „Bei Brüchen ohne Duktilität ist zu prüfen, ob sich die Nutzung der Stähle bereits in der Zähigkeitstieflage hinsichtlich der klimatischen Umgebungstemperatur befindet“ [1].

3.3 Frühere Mastumbrüche durch Eis, Raureif, Nassschnee

Laut VDEW Schadensstatistik, zitiert in [1], traten im norddeutschen Flachland folgende Streckenlasten auf: 1967 46 N/m, 1988 55 N/m und 1987 im Münsterland 25 N/m.

In [61] finden sich Angaben zu Großstörungen durch Eislasten im Hochspannungsnetz der Bundesrepublik, Tabelle 5, die durch Eis, Raureif, Nassschnee verursacht wurden.

Es stellt sich daher die Frage, ob die Wetterbedingungen „Münsterland 2005“ und die entstandenen Schäden tatsächlich als ein Jahrhundertereignis gewertet werden können oder ob solche Wetterbedingungen nicht häufiger auftreten.

3.4 Prüfbericht MPA NRW 1994 [87]

11 Diagonalen und 4 Eckstiele unterschiedlicher Profile mit geringen Stickstoffgehalten $\leq 0,01\%$ wurden in Bauteilzugversuchen mit Schraubverbindungen bei Raumtemperatur geprüft. Gegenüber der Beanspruchbarkeit nach Norm traten vor allem bei Sprödbrüchen Abweichungen von bis zu -42% auf, die mit zu geringen Loch-Randabständen am Profilende begründet wurden.

3.5 Auswertung der SAG Untersuchungen 1990 bis 2006

Von RWE wurden eine Reihe von Berichten [72][73][74][76][77][78][79] über in deren Auftrag durchgeführte Untersuchungen an Strommasten zur Verfügung gestellt. Diese Untersuchungsberichte wurden eingehend analysiert und hinsichtlich der Angaben über Bauteilversuche und Beanspruchbarkeit (Bruchkraft) von Diagonalen ausgewertet. Ziel war es, den Einfluss von Versprödung auf die ertragbare Zugkraft von Diagonalen zu ermitteln.

3.5.1 Bauteilversuche SAG Versuchsbericht 2006-20

Ziel der Versuche in [82] war die Ermittlung des Einflusses der Prüftemperaturen 0°C und 20°C auf die Bruchkräfte zugbelasteter Diagonalen.

3.5.1.1 Prüfstücke

Die Versuche erfolgten an Anschlüssen mit einer Schraube bzw. einem Niet. Für die Versuche wurden Diagonalen mit hohem Stickstoffgehalt als Indiz für Thomasstahl ausgewählt.

3.5.1.2 Prüfparameter SAG

Nach Angaben aus den Voruntersuchungen streuen die Ergebnisse von Bauteilzugversuchen an beiden Enden derselben Diagonale sehr wenig. Will man den Einfluss bestimmter Prüfparameter auf die Bruchkraft ermitteln, so erscheint es sinnvoll, aus einer Diagonale zwei Prüfstücke zu erstellen, die mit jeweils anderen Prüfparametern geprüft werden.

3.5.1.3 Auswertung der Versuche

Die Bruchformen der Bauteilzugversuche entsprechen nicht jenen an den Prüfstücken des Masts M65.

Nach Pohlmann 2006-02 erfolgte die Unterscheidung bei den Bauteilversuchen nach duktil/spröde:

- Erkennungsmerkmal duktil: Einschnürung, Ovale Löcher, Scherlippen, matte Bruchflächen

- Erkennungsmerkmal spröde: Kristallin glänzende Oberflächen, verformungsarm
- Unterscheidung bei Mischbrüchen nach Augenmaß einer Kategorie zugeordnet, nicht genauer ausgemessen

3.5.1.4 Fazit

Die an Anschlüssen mit einem Verbindungsmittel ermittelten Bruchkräfte sind nicht direkt auf Bauteile mit zwei Verbindungsmitteln aus M65 übertragbar.

Im Ergebnis ist keine signifikante Änderung der Bruchkraft in Abhängigkeit von der Temperatur erkennbar, weil sich nach [76] der versprödete Stahl schon bei Raumtemperatur in Tieflage oder im Übergangsbereich befindet.

Auch die Bruchart duktil oder spröde zeigte keine großen Unterschiede in der Bruchkraft.

Als experimentell ermittelte Werte für die Bewertung der mit der statischen Analyse ermittelten Stabkräfte im M65 sind diese Werte wegen der Abweichung der Anzahl der Verbindungsmittel nicht verwendbar. Es war daher erforderlich, eigene Bauteilzugversuche an Anschlüssen mit zwei Nieten durchzuführen.

3.5.2 Dokumentation SAG

Studie Stickstoffversprödung

In diesem Bericht [79] wurden 55 Versuchsberichte, in denen insgesamt 320 Bauteilzugversuche an Diagonalen, die in 14 Jahren im SAG VTZ durchgeführt wurden, zusammengefasst und ausgewertet.

Von 310 Diagonalen hatten 131 Diagonalen einen erhöhten ($\geq 0,0011\%$) N-Gehalt. Aus der statistischen Auswertung ergaben sich die 1% Fraktile bei 60% Minderung, d.h. Bruchkräfte von 40% der rechnerischen Mindest-Bruchkraft nach VDE 0210.

In einer Kurve, ausgewertet wie in Bild 111, der als duktil bezeichneten Brüche liegt mit der größten Häufigkeit bei 0% Minderung, d.h. nur die Hälfte aller duktilen Brüche erreicht den rechnerischen Norm-Mindestwert, den eigentlich 95% aller Bauteile überschreiten sollten.

Da Bruchflächen nicht gezeigt werden, kann nicht nachvollzogen werden, welche Bruchflächen als spröde, welche als duktil bezeichnet wurden. Leider bleibt auch unklar, ob immer Versagen im Nettoquerschnitt vorlag.

3.5.3 Kurzberichte SAG

[77] [78]

Bauteilzugversuche bei -20°C wurden an Diagonalen L60x6 sowie L75x5 durchgeführt.

Ein signifikanter Unterschied der Bruchkräfte in Abhängigkeit des Loch-Randabstandes 60 oder 80 mm bei L75x7 bzw. 45 oder 60 mm bei L60x6 ist nicht zu erkennen.

„Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass bei beiden Leitungen stickstoffbelastete und versprödete Diagonalstäbe vorhanden sind. Eine Sanierung ist daher aufgrund der Bruchkraftminderungen infolge der Stickstoff-Versprödung zu empfehlen.“ [77] [78]

3.5.4 Versuchsbericht SAG

[71]

Dieser Versuchsbericht enthält einen umfassenden und anschaulichen Überblick über das Thema der Thomasstahl-Versprödung. Auch die enthaltenen Bilder der Bruchformen zeigen anschaulich die Bewertungen spröde, zäh und Mischbruch durch die Autoren.

Besonders deutlich wird der Einfluss der Versprödung auf die Zug-Belastbarkeit wenn der Neu-Zustand durch neu gebohrte Löcher mit dem gealterten Zustand verglichen wird.

Wie auch in den anderen SAG Untersuchungen zeigt sich, dass die Alterung des Thomasstahls die Zug-Bruchkräfte um 40% (5% Fraktil) erheblich reduziert.

Für den hier untersuchten Schadensfall „Münsterland 2005“ bedeutet dies, dass die Zug-Bruchkräfte der Diagonalen aus Thomasstahl deutlich unter den „rechnerischen Bemessungsbruchkräften“ gewesen sein können.

3.5.5 Versuchsbericht SAG [75]

Untersuchungsziel war hier die Klärung, ob gestanzte oder gebohrte Löcher vorliegen. Anhand der Querschliffe durch den Lochrand wurde erkannt, dass alle Löcher in den untersuchten Bauteilen gebohrt worden waren.

3.5.6 Versuchsbericht SAG [74]

An Diagonalen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Messung der Brinellhärte zur Identifikation der Stahlsorte,
- Chemische Analysen,
- Bestimmung der Übergangstemperaturen im Kerbschlagbiegeversuch
- Bauteilzugversuche an Diagonalen zur Bestimmung der Bruchkraft

Im Ergebnis wird ein hoher Stickstoffgehalt als Indikator für Sprödbbruchgefährdung gesehen. Es traten Bruchkraftminderungen um bis zu 46% auf. Als Fazit wurde eine erhebliche Minderung der Tragfähigkeiten der Masten verschiedener Freileitungen Bj. 1958 bis 1963 festgestellt.

3.5.7 Versuchsbericht SAG [73]

Ausgehend von einem sturmbedingten Schadensfall im Jahr 1992 mit Kaskadenbruch wurde versucht, weitere mögliche Schadensursachen aufzudecken.

Aus den Bauteil-Zugversuchen ergab sich, dass die Lochabstände der Diagonalen zu klein waren und Versagen durch Ausreißen des Loches (Lochleibung) auftrat. Eine Bruchkraftminderung um bis zu 36 % wurde gegenüber dem rechnerischen Mindestwert festgestellt. Es wurden größere Lochabstände empfohlen. Neben dem Sturm wurden auch Eckstielsprödbüche als Schadensursache angesehen. Stickstoffversprödung spielte hier jedoch aufgrund geringer Stickstoffgehalte keine Rolle.

3.5.8 Versuchsbericht SAG [72]

Dieser Versuchsbericht basiert auf einer Schadensfalluntersuchung an gebrochenen Diagonalen. Aufgrund von Torsion brachen oberhalb der unteren Traverse, sechs übereinander liegende Diagonalen in der Wand 1-4. Der N-Gehalt lag stellenweise um Faktor 3 über den heute zulässigen Werten. „Die Stickstoffversprödung des Stahls als Ursache des Schadens an Mast 8 ist als systembedingter Werkstofffehler zu bezeichnen.“

3.6 Maßnahmen an Masten mit Stäben aus spröden Stählen

In diesem Bericht vom November 2001 [71] werden im Wesentlichen die Versuchsergebnisse aus [72] und [74] im Vergleich zur damals neuen Norm [53] und [55] erneut ausgewertet. Bei einer hohen Anzahl von aus Masten Baujahr 1963 und älter ausgebauten Diagonalen erreichten die Bruchkräfte im Versuch die Erwartungswerte der Norm nicht.

Es wurden auch Spannungsverteilungen an Anschlüssen mit mehreren Schrauben gemessen und ausgewertet. Die mittragende Wirkung des freien Schenkels wird in [72] überschätzt.

Der Autor vergleicht die sich aus der älteren Norm [48] und der jüngeren [53] ergebenden Nettoquerschnitte bei einem angeschlossenen Schenkel und kommt zum Schluss, dass die neuere Norm bei Anschlüssen mit mehreren Schrauben konservativer ist und daher beachtet werden sollte.

Abschließend bewertet er den Maßnahmenkatalog zur Sanierung der betroffenen Freileitungen als auf der sicheren Seite liegend und geeignet, um die Masten nachhaltig zu sanieren.

3.7 Zertifizierung der RWE-Sanierung durch Prof. Thierauf [80]

Im Auftrag der RWE wurde die Vorgehensweise zur Sanierung bestehender Hochspannungsfreileitungsmaste „Projekt Maststahl“ von Prof. Thierauf zertifiziert. Aus dem Inhalt werden im Folgenden nur die Aussagen zitiert, die unmittelbar mit der Bewertung des Schadensfalls Münsterland 2005 in Zusammenhang stehen.

„Gegenstand der Zertifizierung sind auch Maßnahmen, die die Verringerung der Tragfähigkeit infolge Stahlversprödung bei Strommasten aus den Baujahren vor 1966 ausgleichen sollen.“

„Anfang der 90er Jahre wurden vereinzelt Schäden an stählernen Hochspannungsfreileitungsmasten beobachtet, die teilweise zum Umbruch von Masten geführt hatten. Die Untersuchungen der Schadensfälle zeigten, dass die Schäden im Wesentlichen durch eine Versprödung des Maststahls verursacht wurden.“

„Bei einzelnen von der Maststahlproblematik betroffenen Masten kann jedoch das Sicherheitsniveau erheblich reduziert sein. Damit ist ein Versagen einzelner betroffener Masten bei extremen Einwirkungen, die eine Auftretenswahrscheinlichkeit innerhalb von 50 Jahren haben, als sehr wahrscheinlich einzuschätzen.“

Prof. Thierauf wertet die Versuchsergebnisse aus Versuchsbericht SAG erneut aus. Das Verhältnis der experimentellen Bruchkraft zur rechnerischen Bruchkraft wird gebildet durch eine zweiparametrische logarithmische Normalverteilung angenähert. Die Auswertung der 1% Quantile ergibt sowohl für die Menge der spröde versagenden Diagonalen, als auch für die Diagonalen mit zu hohem N-Gehalt und die Menge aller Diagonalen eine Resttragfähigkeit von etwa 48% bezogen auf die rechnerische Bruchkraft.

Aktuelle technische Normen beschreiben klimatische Einwirkungen, die statistisch betrachtet einmal in 50 Jahren vorkommen. Der zu berücksichtigende Sicherheitsfaktor der Lastannahmen von 1,5 und der Materialparameter von 1,1 sowie Reserven der Baustoffe führen dazu, dass Versagen intakter Masten erst bei einer Überschreitung der charakteristischen 50 a-Einwirkung um Faktor 2 zu erwarten ist [80].

„Da bereits solche Schäden aufgetreten sind und die Werkstoffversprödung zeitabhängig zunimmt, ist die Auftretenswahrscheinlichkeit solcher räumlich begrenzter Schäden als **sehr wahrscheinlich** zu bezeichnen“.

Abweichend von den vor 1930 erschienenen Vorschriften wird jedoch für alle sanierten Masten auch die Torsionsbelastung durch Fortfall eines Leiterzuges berücksichtigt. In der Regel wird für die Nachrechnung (unter Ausnutzung des Bestandsschutzes) die jeweilige Errichtungsvorschrift angesetzt.

Vor 1930 gebaute, nicht torsionssichere Masten entsprechen bei weitem nicht mehr dem Stand der Technik. Die Wiederherstellung des Ausgangszustandes ist nicht ausreichend, eine Ertüchtigung unwirtschaftlich; daher wird bei diesen ein Ersatzneubau angestrebt.

Die Resttragfähigkeit der Diagonalen beträgt ca. 60% der zum Zeitpunkt der Errichtung vorhandenen Tragfähigkeit [80]. Um dies bei den Neuberechnungen zu berücksichtigen, wurden die zulässigen Spannungen auf 55 bis 80% derjenigen Regelwerke reduziert. Diese Sanierung gewährleistet ein den anerkannten Regeln der Technik entsprechendes Sicherheitsniveau.

Prof. Thierauf empfiehlt abschließend, die Sanierung auch auf die Bj. 1966 und 1967 zu erweitern und jede Berechnung durch eine Sachverständigen prüfen lassen, wie dies bei der baustatischen Prüfung anderer Masten üblich sei.

Er schlägt weitere Bauteilversuche an künstlich endgealterten, vermessenen, Diagonalen vor. Dabei sollte auch immer die Zugfestigkeit bestimmt werden.

3.8 Bauteilversuche SLV 2005-710-1118/3 [86]

Die Diagonalen wurden an einem Ende mit ihren Originalanschlüssen (Schrauben oder Niete) und am anderen Ende mit neu gebohrten Löchern angeschlossen.

Bei den Bauteilversuchen an Diagonal-Eckstiel Verbindungen trat nur 4 mal Versagen im Nettoquerschnitt auf. Diese Brüche wurden als duktil bezeichnet, was anhand der Fotos nachvollzogen werden kann.

Bei allen Bauteilversuchen an Diagonalen L60x6 trat Versagen des Verbindungsmittels (Niet oder Schrauben) bei Kräften zwischen 134 und 163 kN auf.

Aus diesen Versuchsergebnissen kann nicht auf die beim spröden Versagen der Prüfstücke M65-04 und -01 wirkende Bruchkraft geschlossen werden. Es ist daher erforderlich, eigene Bauteilzugversuche durchzuführen.

3.9 Auswertung der Regelwerke für Freileitungsbau, Forderungen an die Werkstoffe für Stahlgittermasten

Tabelle 6 gibt eine Zusammenstellung über Angaben zu den zulässigen Werkstoffen für Stahlgittermasten in Regelwerken für den Freileitungsbau.

4 Werkstoffuntersuchungen und deren Ergebnisse, Beanspruchbarkeit, Belastbarkeit

4.1 Beurteilung des Korrosionszustandes der besichtigten Masten

Alle von der BAM am 2005-12-20 besichtigten Strommasten wiesen hinsichtlich der Korrosion einen guten Erhaltungs- und Wartungszustand auf. Die durch die Schadensereignisse erzeugte Verformung hat zu Abplatzungen der spröderen Beschichtungen in den verformten Bereichen geführt, wo es in der Folge zur Bildung von Flugrost kam. Abgesehen von kleinsten, unvermeidbaren Fehlstellen, an denen leichte Korrosion erkennbar war, befand sich die Beschichtung in einem guten Erhaltungszustand.

Unter der Beschichtung, die beim Mast 65 aus dem Baujahr 1960 noch auf der Basis von Bleimennige ausgeführt wurde, waren an den Profilen noch Spuren der Walzwerkzeuge aus dem Herstellungsprozess sichtbar. Ein merklicher Materialabtrag durch Korrosion konnte in keinem Fall beobachtet werden. Die Bereiche, in denen Bauteile infolge von Sanierungsmaßnahmen ausgetauscht wurden, wiesen einen korrekten Korrosionsschutz im Bereich der Überlappungen auf. Andere Überlappungen an vernieteten Knotenblechen, die durch die Schadensereignisse geöffnet worden waren, zeigten im Spalt keine Korrosionserscheinungen oder -schäden.

Fazit: Hinweise auf ein korrosionsbedingtes Versagen konnten an keinem der besichtigten Masten gefunden werden, an der Instandhaltung der Masten sind aus korrosionstechnischer Sicht keine Mängel festzustellen. Der Korrosionsschutz durch Bleimennige stellt ein sehr wirksames Korrosionsschutzsystem dar.

4.2 Probenahme und -fertigung

Die beim Ortstermin gekennzeichneten Prüfstücke sind am 2005-12-28 in der BAM eingegangen.

Aus den beim Ortstermin ausgewählten Prüfstücken, die insgesamt 4 Masten entnommen wurden, sind für die mechanisch-technologischen Versuche, für die chemische Analyse und für metallographische und fraktographische Untersuchungen 180 Proben entnommen worden, Bild 92 bis Bild 96. Eine Übersicht der untersuchten Prüfstücke gibt Tabelle 7.

Die Proben wurden entsprechend den Vorgaben so entnommen, dass die Prüfquerschnitte in einem Bereich liegen, der etwa 1/3 von der Kante entfernt liegt. Die Größe der Zugproben wurde den Halbzeugdimensionen angepasst, Bild 97. Entsprechend den Normenvorgaben wurden kurze Proportionalproben für die Prüfungen verwendet. Die Probenahme der Kerbschlagbiegeproben erfolgte mit einer Kerblage quer zur Profillängsrichtung, Bild 98. Aufgrund der Halbzeugdicken wurden die Kerbschlagbiegeproben mit einer Breite von 5 mm gefertigt. Lediglich die Proben aus dem Eckstiel des Masts 65 hatten eine Breite von 10 mm. Entsprechend der Prüfvorgaben in den relevanten Prüfnormen wurden die Proben als ISO-V-Proben und teilweise als DVM-Proben ausgeführt.

Für die chemische Analyse und Baumannabdrücke wurden Proben mit kompletten Halbzeugquerschnitten entnommen, z.B. Probe D13 in Bild 96. Die Probenahme der Proben für die metallographischen Untersuchungen erfolgte für jedes Halbzeug in Längs- und Querrichtung, z.B. Proben 10 (Q) und 11 (L) in Bild 94.

4.3 Mechanisch-technologische und chemische Werkstoffuntersuchungen an den Schadensteilen

4.3.1 Zielstellung

Die in den Prüfstücken verwendeten Werkstoffe sind hinsichtlich des zum jeweiligen Baujahr der Masten gültigen Regelwerks sowie unter den Aspekten der heute anzuwendenden Regelwerke zu bewerten. Dieses lässt sich in folgende Fragestellungen präzisieren:

1. Entsprechen die Werkstoffe den Anforderungen des jeweils geltenden Regelwerks bei der Errichtung der Masten?
2. Entsprechen die Werkstoffe heutigen (Werkstoffnormen-) Anforderungen?
3. Entsprechen die Werkstoffe den heute im Stahlgittermastbau zulässigen Werkstoffen?

Aus diesem Grund musste für jeden untersuchten Mast das entsprechende Regelwerk zum jeweiligen Baujahr beachtet werden. Dazu gehören neben den Normen für den Gittermastbau die jeweiligen Werkstoffnormen und die Prüfnormen, Tabelle 8.

4.3.2 Zugversuche

Die Zugversuche wurden zur Vergleichbarkeit mit einer einheitlichen Dehnrates von 0,0005 1/s und einer Spannungszunahmegeschwindigkeit von 6 bis 8 MPa/s weggeregelt durchgeführt. Mit diesen Parametern wurden die jeweiligen Normvorgaben Tabelle 8 hinsichtlich der Versuchsführung erfüllt.

Mit Ausnahme der sehr umfangreichen Versuche an Diagonalen des Masts 65 wurden jeweils 2 Parallelproben geprüft. Die Spannungs-Dehnungskurven der Zugversuche sind in Bild 99 dargestellt. Anhand der ermittelten Festigkeitswerte, der oberen Streckgrenze R_{eH} der Zugfestigkeit R_m sowie der Bruchdehnung A konnte eine Zuordnung der Werkstoffe entsprechend den Vorgaben der jeweiligen Werkstoffnorm erfolgen, Tabelle 9.

Die obere Kurvenschar in Bild 99 zeigt das Festigkeitsniveau eines St 52, die untere dasjenige des St 37. Dazwischen liegen die Kurven auf dem Niveau eines St 42 (Mast 73, Eckstiel). Die Bruchdehnungen liegen in allen Fällen bei über 30 % (im Diagramm 0,3) und damit z. T. erheblich über den Mindestanforderungen in den Normen, die Bruchdehnungen über 22 % (St 52) bzw. 25 % (St 37) vorschreiben.

Die anhand der im Zugversuch ermittelten Werkstoffkennwerte zugeordneten Stahlsorten sind in Tabelle 10 für die untersuchten Prüfstücke dargestellt. Das zum Zeitpunkt der Errichtung der Masten gültige Regelwerk VDE 0210 schreibt die Verwendung eines St 37.12, St 37, St 37-2 oder eines St 52, St 52-3 auf der Basis der jeweiligen Werkstoffnorm vor. Für den Mast 73, Eckstiel wurde ein St 42 eingesetzt, der im Sinne des Regelwerkes die Anforderungen eines St 37.12 erfüllen muss.

Im unteren Teil der Tabelle 10 sind die „alten“ Werkstoffe in die heute gültige Werkstoffnorm DIN EN 10025-2:2005 und das dort verwendete Bezeichnungssystem eingeordnet. Die alten Werkstoffe erfüllen auch die Anforderungen der heutigen Werkstoffnormen hinsichtlich der Festigkeit und Verformbarkeit.

4.3.3 Kerbschlagbiegeversuche

Aufgrund der Probenbreite von 5 mm statt der Standardprobenbreite von 10 mm reduziert sich der Mindestwert der Kerbschlagarbeit von 27 J auf 13,5 J durch die Umrechnung gemäß Werkstoffnorm. Im Folgenden bleibt es jedoch beim Begriff des 27 J-Kriteriums.

Im oberen Teil der Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche (Einzel- und Mittelwerte) und Prüfbedingungen (Probenform und Prüftemperatur) zusammengestellt.

Im mittleren Teil der Tabelle erfolgt deren Bewertung hinsichtlich der ebenfalls angegebenen Normenforderungen der Werkstoffnorm, die zum Zeitpunkt der Errichtung galten. Diese sehen, abhängig von der Werkstoffgüte, unterschiedliche Prüfbedingungen für den Kerbschlagbiegeversuch vor. So ist ein St 52-3 nach der Norm DIN 17100:1957 anhand einer DVM-Probe bei 0 °C zu prüfen. Für einen St 37.12 ist nach DIN 17100:1957 (auch nach DIN 1612:1943 und DIN 17100:1966) der Nachweis einer Mindestkerbschlagzähigkeit nicht erforderlich.

Die Forderungen für den St 52-3 bzw. St 37-2 hinsichtlich einer Mindestkerbschlagarbeit von 27 J werden erfüllt. Den sehr niedrigen Werten des Eckstiels des Masts 65 von 15 J steht eine Normenforderung nicht gegenüber (Werkstoff St 37.12).

In der aktuellen Werkstoffnorm DIN EN 10025-2 ist für alle Werkstoffe der Nachweis einer Mindestkerbschlagarbeit erforderlich. So sind für den St 37.12 und St 37-2 (beides neu S235JR) Kerbschlagarbeiten auf einem Mindestniveau von 27 J bei 20 °C nachzuweisen. Für den St 52-3 ist das 27 J-Kriterium bei 0 °C, d.h. für einen S355J0, zu erreichen.

Die Kerbschlagarbeitswerte der Proben des Masts 65, Eckstiel unterschreiten schon bei Raumtemperatur mit Werten um 15 J (bei einer Probenbreite von 10 mm) das 27 J-Kriterium erheblich. Dieser Werkstoff erfüllt somit die Anforderungen der aktuellen Werkstoffnorm (Kerbschlagarbeitswerte mindestens 27 J, für eine Probenbreite von 5 mm entsprechend 13,5 J) nicht. Alle anderen untersuchten St 37.12, St 37-2 zeigen bei Raumtemperatur ausreichend hohe Kerbschlagarbeitswerte und erfüllen damit die Forderungen an einen S235JR.

Die Werte der untersuchten St 52-3 liegen bei 0 °C deutlich über dem 27 J-Kriterium, im Falle des Eckstieles des Masts 22 wird sogar bei -20 °C das Kriterium erreicht. Das heißt, es werden die Bedingungen an einen S355J0 (Mast 73, Diagonale) und an einen S355J2 (Mast 22, Eckstiel) erfüllt.

Im aktuellen Regelwerk zum Gittermastbau, der DIN EN 50341-1:2002 [53], erfolgt die Einschränkung der zulässigen Stähle auf die Gütegruppen J0 bzw. J2. Das heißt, es werden höhere Forderungen insbesondere an die Zähigkeit bei tieferen Temperaturen gestellt als in den alten Regelwerken. Die vorliegenden Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche zeigen, dass die Werkstoffe der Güte St 37.12 der Masten 65 und 27 diese Anforderungen nicht erfüllen. Die Kerbschlagarbeiten liegen z. T. erheblich unter dem 27 J-Kriterium.

Der im Mast 73 eingesetzte St 42 erfüllt die Anforderungen an einen S275J0, da die Kerbschlagarbeiten bei Raumtemperatur und bei 0 °C über dem 27-J-Kriterium liegen.

Die beiden Stähle der Güte St 52-3 der Masten 22 (Eckstiel) und 73 (Diagonalen) zeigen auch bei 0 °C bzw. -20 °C ausreichend hohe Kerbschlagarbeiten und erfüllen somit die Anforderungen an die für den Gittermastbau heute zugelassenen Stähle S355J0 bzw. S355J2.

4.3.4 Chemische Analyse der Werkstoffe

Die Proben für die chemische Analyse wurden nach dem in 4.2 beschriebenen Probeentnahmeplan entnommen.

Die chemische Analyse wurde spektrometrisch mit einem Funkenemissionsspektrometer QBLF QSL 1500 in Anlehnung an das SEP 1085:1976 durchgeführt. Dazu wurden die Proben über eine Schenkellänge schräg abgefräst. Alle Werte in Tabelle 12 werden als Massenanteile in % angegeben.

Zur Unterscheidung der untersuchten Proben in Bezug auf die Erschmelzungsart als Thomas- oder Siemens-Martin (SM)-Stahl bzw. ein anderer moderner Stahl sind die Ergebnisse bezüglich der Elemente Stickstoff (N) und Phosphor (P) herangezogen worden, Tabelle 12. Demnach ergibt sich für den Mast 65, den Eckstiel von Mast 73 und den Eckstiel von Mast 27 eine Zuordnung zum Thomasstahl. Bei diesen Proben liegen der Stickstoffgehalt zwischen 0,01 % bis 0,02 % und der Phosphorgehalt zwischen 0,04 % bis 0,12 %, was für einen Thomasstahl typisch ist. Bei dem Werkstoff des Masts 22 und der Diagonalen des Masts 73 handelt es sich um einen SM-Stahl bzw. einen moderneren Stahl.

In Tabelle 13 wurde eine Zuordnung zum Desoxidationsgrad (beruhigt/unberuhigt) aufgrund der Elementgehalte Silizium (Si), Mangan (Mn) und Aluminium (Al) getroffen. Demzufolge sind die Profile des Masts 65 sowie die Diagonale von Mast 22 unberuhigt vergossen worden. Eine Einstufung zu beruhigt bzw. doppelt beruhigt vergossen konnte aufgrund der Ergebnisse für die Profile des Masts 73 und den Eckstiel von Mast 22 vorgenommen werden.

4.3.5 Zusammenfassung Werkstoffsorten

Die Tabelle 14 stellt für die jeweils untersuchten Prüfstücke der Masten (Eckstiel und Diagonalen) die Ergebnisse in zusammengefasster Form dar.

Es wurden unterschiedliche Werkstoffsorten festgestellt. Beim Mast 65 und Mast 27 wurde St 37.12 verwendet, wobei die Eigenschaftswerte der untersuchten Diagonalen des Masts 65 so hoch liegen, dass einige bereits die Forderungen eines St 42 erfüllen. Bei den anderen Masten ist teilweise der St 52-3 verwendet worden. Thomasstahl wurde verbaut im Mast 65 (Eckstiel und Diagonale), im Eckstiel von Mast 73 (M73E) und im Eckstiel von Mast 27 (M27E).

Anhand der Ergebnisse der chemischen Untersuchungen und mechanisch-technologischen Versuche wurden die Werkstoffe hinsichtlich ihrer Normenkonformität mit den jeweils zum Zeitpunkt des Freileitungsbaus gültigen Normen und mit heute aktuellen Normen bewertet, Teile 4, 5 und 6 der Tabelle 14. Die im Abschnitt 4.3.1 formulierten Fragestellungen lassen sich wie folgt beantworten:

- Zu 1. Alle untersuchten Werkstoffe erfüllen noch heute die Anforderungen der jeweils zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen Baustahl- und Freileitungsnormen. Anforderungen an den St 37.12 hinsichtlich der Zähigkeit waren bis zum Regelwerk VDE 0210:1969 nicht definiert.
- Zu 2. Von den untersuchten Werkstoffen erfüllt einer (M65E) die Zähigkeits- sowie drei (M65D, M73E, M27E) die chemischen Anforderungen der heute gültigen Werkstoffnorm nicht. Alle anderen untersuchten Werkstoffe entsprechen den Anforderungen.
- Zu 3. Nur die Werkstoffe M22D, M22E, M73D entsprechen den heute für den Stahlgittermastbau zugelassenen Werkstoffen.

4.4 Metallographie, Bestimmung der Stahlsorten

4.4.1 Baumannabdrücke

Von mehreren Proben, die für die chemische Analyse vorgesehen waren, wurden Baumannabdrücke angefertigt, an denen die Verteilung des Schwefels visuell qualitativ beurteilt werden kann, Beispiel in Bild 78. Anhand der Baumannabdrücke wurde versucht, für die betreffenden Proben die Erschmelzungsart zu bestimmen, also ob die Stähle beruhigt oder unberuhigt erschmolzen wurden. Die Ergebnisse aus der Auswertung der Baumannabdrücke wurden denjenigen der chemischen Analyse gegenübergestellt, Tabelle 13.

4.4.2 Gefügebestimmung

Für die Bestimmung der Gefügezustände der Grundwerkstoffe wurden Proben in einiger Entfernung von Bruch- oder Knickstellen entnommen. Die Proben stammen aus den gleichen Bereichen der Profile, aus denen auch die Kerbschlagbiegeproben entnommen wurden. Insgesamt wurden 16 Schliffe, nämlich je 8 Längsschliffe und Querschliffe aus 4 Masten untersucht. Die Proben wurden nach dem Polieren zunächst mit Nital geätzt, um das Grundgefüge sichtbar zu machen. Nitride konnten mit dieser Ätzung nicht sichtbar gemacht werden.

Alle Proben zeigen ein ferritisch-perlitisches Gefüge mit Seigerungszone in der Blechmitte, Bild 79 bis Bild 84. Die Perlit-Anteile sind bei den älteren Stählen von 1951 und 1960 teilweise sehr gering, die Korngröße relativ groß. Der St 37-2 von 1991 zeigt im Vergleich mit den älteren Varianten eine geringere Korngröße. Die St 52-3-Varianten von 1960 und 1991 zeigen erwartungsgemäß einen größeren Perlit-Anteil als der St 37 und eine deutlich geringere Korngröße. Die Menge der gefundenen Sulfid-Ausscheidungen ist teilweise unüblich hoch.

Die gefundenen Grundgefüge sind insgesamt typisch für die Stahlsorten St 37.12, St 37-2 und St 52-3. Eine Ausnahme bildet der St 37-2 von 1991, der einen relativ hohen Sulfidanteil ausweist.

4.4.3 Metallographischer Nachweis von Nitrid-Ausscheidungen

Die eben beschriebene Gefügeuntersuchung bei geringer bis mittlerer Vergrößerung erlaubt noch keine Aussage über eine etwaige Versprödung der untersuchten Stähle auf Grund von Nitrid-Ausscheidungen, also die sog. Alterung, s. Kapitel 3.1. Ausgewählte Schliffe wurden daher nach der Untersuchung des Grundgefüges neu präpariert und mit der Fry-Ätzung behandelt. Dieses Ätzmittel greift speziell Nitrid-Ausscheidungen an, so dass diese dann lichtoptisch nachgewiesen werden können, wenn sie groß genug sind. Derart nachweisbare Nitride bewirken eine Versprödung der betreffenden Stähle. Unter anderem wird durch ihre Anwesenheit die Tieflage der Kerbschlagzähigkeit zu höheren Temperaturen verschoben.

Nitride konnten an mehreren Proben beobachtet werden. Der Nachweis der Nitride wird im Folgenden exemplarisch an Hand der Probe 1536-M27-21 dargestellt. Hierbei handelt es sich um einen Querschliff durch einen Teil des 6 mm starken Blechs einer Diagonale, Bild 85. Die Probenstelle befand sich in der gleichen Zone des Profils, aus der auch die Zug- und Kerbschlagproben genommen wurden. Der Schliff zeigt nach der Ätzung deutlich die Seigerungszone im Mittelbereich des Blechs. Zudem sind sog. Fließfiguren (auch Kraft-Wirkungs-Figuren oder Lüders'sche Linien genannt) zu erkennen, in Bild 85 als helle Strukturen, in Bild 86 als dunkle Strukturen, die jeweils von der Oberfläche des Blechs ausgehen. Hierbei handelt es sich um Bereiche mit erhöhter Versetzungsdichte, die irgendwann einmal eine plastische Verformung erfahren haben. Bei hoher lichtmikroskopischer Vergrößerung werden neben den sonstigen Gefügestrukturen auch Nitridausscheidungen aufgelöst, Bild 87 und Bild 88. Diese ca. 1000-fache Vergrößerung genügt nicht, um die Morphologie der Ausscheidungen sicher erkennen zu können, weshalb der Schliff im REM im VP (Variable Pressure)-Modus genauer untersucht wurde.

Bild 89 zeigt denselben Schliff in einer REM-Aufnahme bei einer vergleichbaren Vergrößerung wie die der zuvor gezeigten lichtmikroskopischen Aufnahmen. Es ist nun zu erkennen, dass die Ätzung die Nitride aufgelöst hat, so dass an deren Stelle Löcher entstanden sind. Nitride befanden sich demnach sowohl innerhalb der Ferrit-Körner als auch an deren Korngrenzen. Bei hoher Vergrößerung (ca. 30.000-fach) ist zu erkennen, dass die Ausscheidungen offenbar kleine Scheibchen sind, die sich auf 3 zueinander senkrechten Kristallebenen ausgeschieden haben, Bild 90 und Bild 91. Die Scheibchen haben Durchmesser in der Größenordnung 1 µm und einer sehr geringen Dicke von unter 100 nm. Teilchen der 3 Scharen durchdringen sich zum Teil gegenseitig und bilden räumliche Gebilde.

Die Korngrenzen sind ebenfalls mit Ausscheidungen belegt, vermutlich vom selben Typ.

Auf Grund der gefundenen Morphologie ließ sich nach Literaturbeispielen der Typ der Ausscheidungen bestimmen, z.B. [37]. Es handelt es sich demnach bei den Scheibchen um Teilchen vom Typ α'' -Fe₈N, die sich parallel zu den Würfel Flächen des α -Eisens ausscheiden. Eine kristallographische Analyse könnte nur mit Hilfe des Transmissions-Elektronenmikroskops (TEM) vorgenommen werden. Diese Untersuchung wäre aber relativ aufwändig und erscheint an dieser Stelle nicht notwendig, da die Unterscheidung auf Grund der Morphologie eindeutig ist. Unterhalb ca. 200 bis 250 °C scheidet sich offenbar nur das metastabile α'' -Nitrid mit der Zusammensetzung Fe₈N bzw. Fe₁₆N₂ aus [38][39]. Es hat eine tetragonal raumzentrierte Kristallstruktur. Die Gitterachsen liegen, wie schon erwähnt, parallel zu denen des α -Eisens, und die Teilchen sind Plättchen parallel zu den {100}-Flächen des α -Eisens. Andere Nitride wie γ' -Fe₄N werden erst bei Temperaturen oberhalb ca. 200 bis 250 °C gebildet. Diese hätten andere Formen, die von den hier gefundenen Plättchen deutlich unterscheidbar wäre [37].

Bei einigen Schliffen konnten Nitride nachgewiesen werden, bei anderen zeigt das Fehlschlagen der Ätzung schon makroskopisch wie auch mikroskopisch ein negatives Ergebnis an.

Nitrid-Ausscheidungen wurden nur bei den St 37.12-Varianten aus den Jahren 1951 und 1960 gefunden. Es handelt sich dabei jeweils im Korninnern um scheibchenförmige Teilchen mit Durchmessern in der Größenordnung 1 µm und einer sehr geringen Dicke, sowie um Ausscheidungen an den Korngrenzen. Wenn in einer Probe Nitride vorhanden waren, dann waren sie über die gesamte Probe verteilt. Lokale Unterschiede in Morphologie und Verteilung wurden nicht bewertet. Über die Tatsache, dass Nitride auch an den Korngrenzen vorhanden sind, erklärt sich das Auftreten von interkristallinen Anteilen an den Spaltbrüchen der betreffenden Proben.

Die Ergebnisse dieser Teiluntersuchung sind im Folgenden zusammengefasst:

α'' -Fe₈N Nitridausscheidungen wurden gefunden bei

- BL1536-M27-21 (1951), Eckstiel, St 37.12
- BL1503-M65-02A-02 (1960), Eckstiel, St 37.12
- BL1503-M65-04-01 und -01-01 (1960), Diagonale, St 37.12

Nitride wurden **nicht** gefunden bei

- BL1503-M73-13-01 (1960), Diagonale, St 52-3
- BL1536-M22-31-01 (1991), Diagonale, St 37-2
- BL1536-M22-30-02 (1991), Eckstiel, St 52-3

4.5 Fraktographie an den gebrochenen Prüfstücken

5 Bruchflächen wurden im Detail untersucht. Dies sind alle u. E. relevanten Bruchflächen an den beim Ortstermin sichergestellten Prüfstücken. Die Bruchflächen waren auf Grund der langen Liegezeit im Freien nach dem Schadenseintritt schon zu einem gewissen Grad korrodiert. Um eine fraktographische Analyse zu ermöglichen, mussten die Bruchflächen jeweils mit verdünnter Zitronensäure gereinigt werden. Es gelang damit, die Rostschichten weitgehend zu entfernen, ohne die Feinstruktur der Bruchflächen unkenntlich zu machen. Die Bruchflächen wurden anschließend visuell, im Stereomikroskop und im Rasterelektronenmikroskop (REM) untersucht.

Zunächst soll die Untersuchung einer typischen Bruchfläche exemplarisch beschrieben werden. Bei dem Bauteil handelt es sich um die Diagonale M65-04 des Masts 65 der Freileitung 1503. Die Bruchfläche verläuft durch ein Loch, Bild 58 und Bild 59. Mit „Loch“ ist in diesem Zusammenhang ein Stanzloch oder eine Bohrung zur Aufnahme einer Niet- oder Schraubverbindung gemeint. Visuell ist zu erkennen, dass der Bruch besonders im Bereich der Ecke des Profils verformungsarm verlaufen ist. An den beiden Enden des Profils sind die plastischen Verformungen etwas größer gewesen.

Ein Teil der Bruchfläche wurde für die Untersuchung im REM abgetrennt und gereinigt, Bild 60. Die Rostschicht konnte zum größten Teil entfernt werden. Schon visuell, deutlicher aber im Stereomikroskop, konnten nun verschiedene Zonen auf der Bruchfläche erkannt werden, Bild 61. Der größte Teil der Bruchfläche steht senkrecht zur Profillängsachse und zeigt ein reflexionsstarkes Glitzern, das auf einen Spröbruch hindeutet. Nur ein schmaler, in Richtung des Profilendes breiter werdender Saum zeigt eine mattgraue Farbe und ist gegenüber der vermutlichen Spröbruchfläche in Form einer Scherlippe geneigt.

Die Feinstruktur der eben beschriebenen Zonen der Bruchfläche wurde im REM untersucht. Bild 62 zeigt den Saum an der Oberfläche des Profils. Die beiden unterschiedlichen Bereiche sind bereits deutlich zu erkennen. Bei höherer Vergrößerung sind der Spaltbruch im Mittelbereich, Bild 63, und der duktile Wabenbruch im Randbereich, Bild 64, eindeutig identifizierbar. Der duktile Saum befindet sich an der gesamten äußeren Oberfläche des Profils bis auf den Lochbereich. Der Spröbruchbereich grenzt von beiden Seiten her direkt an das Loch. Die gefundenen Bruchmechanismen sind in Bild 65 zusammengefasst.

An Mast 65 wurden mehrere Bruchflächen gefunden. Bild 66 zeigt eine weitere Bruchfläche, nämlich diejenige der Diagonale M65-01. Der Bruch ist hier teilweise duktiler verlaufen als bei der oben beschriebenen Diagonalen M65-04. Gleich ist der große Spröbruchanteil im Bereich der Ecke des Profils, der direkt an das Loch grenzt.

Die beiden folgenden Bilder zeigen die Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen an zwei Eckstielen aus St 37.12 von 1951, Bild 67, und 1960, Bild 68. Ersterer ist nicht vollständig durchgebrochen. Die Bruchfläche wurde mit Hilfe eines Brennschnitts freigelegt. Spröbruch ist nur im Eckbereich aufgetreten, während der Bereich zu beiden Seiten des Lochs duktil gebrochen ist. Im anderen Fall ist hingegen der Spröbruchanteil sehr groß, und nur am Profilende jenseits des Lochs befindet sich ein duktiler Bruchbereich mit großer Verformung.

Nur eine Bruchfläche eines St 52-3 von 1991 konnte sichergestellt und untersucht werden, Bild 69. Der betreffende Eckstiel war (ähnlich dem in Bild 67) nicht vollständig durchgebrochen. An Hand der plastischen Verformung des Profils ließ sich erkennen, dass der Bruch keinesfalls von der Ecke des Profils ausgegangen sein konnte, sondern vermutlich von einem der beiden Löcher. Der angerissene Bereich wurde herausgetrennt und zerlegt, Bild 70. Ein Teilstück wurde für die Untersuchung im REM vorbereitet, Bild 71. Im Stereomikroskop ließ sich erkennen, dass in einem im Vergleich zu den zuvor untersuchten Profilen relativ kleinen Bereich in der Ecke des Profils ebenfalls Spröbruch aufgetreten ist, Bild 72. Der Spröbruchbereich ist an der Oberfläche des Profils von einem schmalen duktilen Saum umgeben. Sowohl der Spröbruch, Bild 73, als auch der duktile Bruch, Bild 74, wurden im REM nachgewiesen. Der größte Teil der Bruchfläche ist duktil gebrochen, auch die Bereiche um die beiden Löcher. Diese Ergebnisse sind in Bild 75 in der Übersicht dargestellt.

Zusammenfassung der fraktographischen Befunde:

- Es gibt keine Hinweise auf Schwingbruch. Alle untersuchten Bruchflächen zeigen Gewaltbrüche. Diese sind größtenteils im Bereich von Knotenblechen, d.h. an Nietlöchern, aufgetreten.

- Sprödbereichsbereiche treten an allen untersuchten Bruchflächen auf, unabhängig vom Baujahr und unabhängig von der Stahlqualität, d.h. an Bauteilen von 1951, 1960 (St 37.12) und 1991 (St 52-3). Bei letzterem ist der Sprödbereichanteil gering und befindet sich nur im Eckbereich des Profils. Bei den Bruchflächen von 1951 und 1960 sind die Sprödbereichanteile größer und umfassen teilweise fast die gesamte Bruchfläche.

4.6 Metallographie an Schläffen durch Bruchflächen

Durch eine Bruchfläche einer Diagonale des Masts M65 von 1960 wurden zwei Schläffen, ein Längsschliff und ein Flachschliff (Schliff parallel zur Blechebene) gelegt. Die gefundenen Gefügestrukturen unterscheiden sich nicht grundlegend von denjenigen weiter entfernt von der Bruchfläche. Auf Grund der plastischen Verformung an der Bruchkante wurden einzelne Zwillinge gefunden. Die Sprödbereichsbildung konnte an der im Schliff dargestellten Bruchkante ebenfalls sichtbar gemacht werden. Die Verteilung der Nitrid-Ausscheidungen in diesen Schläffen sind sowohl an der Bruchkante als auch im Bauteilinnern festgestellt worden.

An weiteren Schläffen durch Bruchflächen konnten keine weiteren Zwillinge gefunden werden. Das Phänomen der Zwillingsbildung wurde daher als nicht kritisch eingestuft und nicht weiter verfolgt.

4.7 Auswertung von früheren Bauteilzugversuchen

Eine Auswertung vorliegender Berichte zu Prüfungen von Bauteilen bzw. Diagonalen, Kap. 3.5, ergab, dass die meisten experimentellen Untersuchungen an einzelnen Diagonalen durchgeführt wurden. Zudem sind teilweise entweder die Randbedingungen nicht eindeutig oder Ergebnisse nicht in weiter auswertbarer Form vorhanden, z.B. Festlegungen und Angabe von Versagensarten, Angabe zu geometrischen Größen und Bruchkräfte.

Daher ließen sich aus diesen Ergebnissen nur begrenzt Rückschlüsse auf das Versagensverhalten von Diagonalen und insbesondere ganzer Anschlüsse im Mast 65 ziehen. In den vorhandenen Untersuchungen gibt es nur wenige Ergebnisse von Versuchen an direkt vergleichbaren, im Mast 65 vorhandenen Verbindungen (Winkelprofil L60x9 und 2-Niet-Verbindung mit Nietdurchmesser).

Im Rahmen der Schadensanalyse galt es zudem, diagonal- bzw. bauteilspezifische Untersuchungen für die im Mast 65 vorhandenen Diagonalen und Verbindungen durchzuführen.

Daher sind Bauteilzugversuche an Bauteilen des Masts 65 notwendig.

4.8 BAM-Bauteil-Zugversuche an der Verbindung Diagonale-Eckstiel

4.8.1 Fragestellung, Ziel

Die Bauteilzugversuche hatten im Wesentlichen zwei Ziele. Zum einen galt es, die experimentell ermittelten Belastbarkeiten der real vorliegenden Verbindungen und Diagonalen den nach Normen berechneten Beanspruchbarkeiten gegenüberzustellen.

Zum zweiten sollten auf der Basis experimenteller Untersuchungen und numerischen Analysen, wiederum unter spezifischer Betrachtung des Masts 65, das Versagen und der Schadensablauf untersucht und geklärt werden.

4.8.1.1 Vorgaben für die Prüfstückentnahme durch RWE

Von den beim Ortstermin besichtigten Masten wurden von der BAM für die Entnahme weiterer Prüfstücke durch RWE Mitte Februar 2006 die Masten M65 bzw. M27 und für die Entnahme zusätzlicher Prüfstücke durch RWE Mitte März 2006 der Mast M65 ausgewählt.

Es wurden folgende Vorgaben gemacht:

- Es sollten Prüfstücke oberhalb der Schadensbereiche ausgewählt werden.
- Die Anschlüsse dürfen nicht verbogen sein.
- Der Lack im Anschlussbereich sollte unbeschädigt sein.
- Die Prüfstücke sollen vor der Entnahme eine eindeutige Kennzeichnung erhalten dokumentiert werden.

Für die Entnahme im März 2006 wurden die Positionsnummern der zu entnehmenden Diagonalen mit Anschlüssen und Eckstielen sowie die Trennstellen vorgegeben und von RWE eingehalten.

4.8.2 Rekonstruktion der Positionen der Prüfstücke im Mast 65

Für Bauteilzugversuche wurden der BAM von RWE eine Reihe von Prüfstücken aus dem Schuss 2 des Masts 65 zur Verfügung gestellt. Diese stammen aus dem Horizontalverband der unteren Traverse und dem darunter anschließenden Mastschaft, Bild 100. Dieser Bereich liegt oberhalb des Bereiches, in dem der Mast umgebrochen war. Die Bilder Bild 101 bis Bild 104 zeigen die Ansicht der Wände 1-2, 2-3 und 3-4, aus denen die Bauteile entnommen wurden.

Zusätzlich wurden mehrere, aus dem Mastschaftbereich der oberen Traverse stammenden Diagonalen der BAM zur Verfügung gestellt.

Die Eckstiele im Schuss 2 bestehen aus den Winkelprofilen der Größe 120x120x12 und die Diagonalen sind aus Winkelprofilen der Größe 60x60x6 gefertigt. Im Bereich der Traverse wurden die Diagonalen mit einer 2-Niet-Verbindung mit einem Nietdurchmesser von 21 mm am Eckstiel befestigt, in den anderen Bereichen des Mastschafts im Schuss 2 mit 2 Nieten mit einem Durchmesser von 17 mm.

4.8.3 Mechanisch-technologische und chemische Werkstoffuntersuchungen an den Prüfstücken für die Bauteilversuche

Einer größeren Anzahl von Diagonalen wurden Proben zur chemischen Analyse und für Zugversuche entnommen. Die chemische Zusammensetzung war neben der Art der Verbindung ein Kriterium zur Auswahl der Prüfstücke. Die chemische Analyse und auch die Zugversuche an Proben wurden in gleicher Weise, wie im Kap. 4.3 dargestellt, durchgeführt.

Die Tabelle 15 und Tabelle 16 zeigen eine Zusammenstellung der Ergebnisse.

Die Zugversuche an allen Diagonalen bis auf die verzinkten Diagonalen C1 und E1 liefern Festigkeitswerte, die z.T. dem St 42 zugeordnet werden können. Die meisten Zugfestigkeitswerte liegen dabei im Überschneidungsbereich der Werkstoffnormwerte, nur 3 der 14 liegen darüber. Daher erfolgt die generelle Einordnung in St 37 und lt. VDE 0210 in St 37.12.

Die ermittelten Stickstoffgehalte liegen im Bereich von 0,007 % bis 0,017 %. Die sehr hohen Aluminiumgehalte sowie die leicht erhöhten Werte von Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel der Proben C3 und C7 sind auf zeitliche Einschlüsse zurückzuführen, Bild 105. Nach einer EDX-Analyse handelt es sich bei den Einschlüssen überwiegend um Aluminiumoxid.

4.8.4 Prüfparameter BAM-Bauteilzugversuche

4.8.4.1 Prüfaufbau

Die Bauteilversuche wurden in einer 1 MN-Prüfmaschine durchgeführt, Bild 106. Der geteilte Eckstiel wurde mit einem Halteblech verschraubt, das in einem Kreuzgelenk eingehängt wurde. Die Lasteinleitung in die Diagonale erfolgte mit einem Vierkantprofil, verbunden mit drei Schrauben M16 10.9. Besonderes Augenmerk wurde auf die Ausrichtung des Laststranges in beiden Ebenen gelegt.

Neben der Kraft und dem Kolbenweg wurde in den Versuchen bei Raumtemperatur ein induktiver Wegaufnehmer eingesetzt, der die Verlängerung der Verbindung, gemessen zwischen dem Halteblech und einem Auflager hinter dem inneren Niet oder Schraube, erfasst, Bild 106.

4.8.5 Prüfparameter

Die Bauteilzugversuche wurden bei Raumtemperatur und 0 °C durchgeführt. Die Temperierung der Proben erfolgte außerhalb der Prüfmaschine in einer Kühlbox. Das Bauteil wurde auf -15 °C abgekühlt, etwa 60 min bei konstanter Temperatur gehalten und für den Versuch isoliert in die Prüfmaschine eingebaut. Die Kontrolle der Temperatur erfolgte am Bauteil mittels eines Widerstandsthermometers. Bei -1 °C wurde der Versuch gestartet. Die Temperatur erhöhte sich im Laufe des Versuches um maximal 1 K.

Die Versuche wurden weggeregelt mit einer Geschwindigkeit von 4 mm/min durchgeführt. Die Versuchzeiten lagen dabei zwischen 200 und 700 s.

Zu vergleichenden Zwecken wurden von zwei Diagonalen die jeweiligen Enden geprüft. Die Proben A5 und B5, sowie die Proben M65-07A und M65-07B sind jeweils einer Diagonalen entnommen worden, Bild 102.

In den Bauteilzugversuchen wurden zwei geometrisch unterschiedliche 2-fach-Verbindungen geprüft: eine Nietverbindung mit einem Loch- bzw. Nietdurchmesser von etwa 21 mm aus dem Horizontalverband der unteren Traverse (Bauteilbezeichnungen A.. bzw. B..) und eine Nietverbindung mit einem Loch- bzw. Nietdurchmesser von etwa 17 mm aus einem Bereich des Mastschafts unterhalb der Traverse II (Bauteilbezeichnung C.. bzw. M65-0...). Zu dieser Gruppe gehört auch das Bauteil C1. Tabelle 17 veranschaulicht die Versuchsmatrix.

4.8.6 Prüfergebnisse BAM-Bauteilzugversuche

Die Ergebnisse der Bauteilversuche sind in Tabelle 18 und Tabelle 19 zusammengestellt. Die in der Tabelle angegebenen Querschnitte A_{net} und Normbruchkräfte, bezeichnet mit N_{sk} als charakteristischer Wert der Beanspruchbarkeit, sind zur Vergleichbarkeit mit anderen Prüfberichten (Kap.3.5) nach VDE 0210:1985 ermittelt worden. Die Abweichung der im Versuch bestimmten Maximalkraft $F_{\text{max, exp}}$ von der Normbruchkraft wurde als prozentualer Wert zu $ABW = (F_{\text{max, exp}} - N_{\text{sk}}) / N_{\text{sk}}$ berechnet und wurde nicht für Niet- oder Schraubenversagen angegeben, da dieses eine andere Versagensart darstellt.

Die Kraft-Kolbenweg-Kurven sind in den Bildern Bild 107 bis Bild 109 zusammengefasst. In den Bildern wird deutlich, dass in Fällen duktilen Versagens ein Kraftmaximum erreicht wird und danach die Kraft mit zunehmender Verformung bis zum endgültigen Versagen bei Bruchkraft abnimmt, z.B. Proben B3, B4 und M65-07B. In den folgenden Betrachtungen wird daher der Maximalwert $F_{\text{max, exp}}$ als der charakteristische Wert verwendet.

Das Versagen der Bauteile mit großem Lochdurchmesser von 21 mm erfolgte duktil. Die bei Raumtemperatur geprüften Bauteile B3 und B5 versagten durch Aufreißen in Längsrichtung am Diagonalende (sog. Lochleibung) und die bei 0 °C geprüften Bauteile B4 und A5 durch Versagen im Querschnitt des inneren Niets. Ein Einfluss der Prüftemperatur lässt sich aus den Maximalkraftwerten nicht ableiten, die Werte liegen in einem für Bauteilversuche recht kleinem Streuband von

182,5 kN $\pm$ 3,5 %. Die Kurven in Bild 107 zeigen für die Prüftemperatur von 0 °C deutlich höhere Verformungen als die bei 23 °C geprüften Bauteile. Dies erklärt sich aus den unterschiedlichen Versagensarten.

Die Bauteilzugversuche mit dem kleineren Lochdurchmesser von 17 mm zeigen in drei von vier Fällen Versagen der Niete bzw. Schrauben, Bauteile C2, M65-07A und C1. Lediglich M65-07B versagte duktil durch Aufreißen am Diagonalende. Das Bauteil M65-01 (Prüftemperatur 0 °C) wies ebenfalls Nietversagen auf, jedoch mit sprödem/duktilen Anriss am Ende der Diagonalen verbunden mit erheblichen plastischen Verformungen. Bei Niet- bzw. Schraubenversagen zeigten die Kraft-Kolbenweg-Kurven eine vergleichbare Form, wobei nach einem Kraftmaximum ein rascher Kraftabfall zu beobachten war.

Alle bei 0 °C geprüften Bauteile wiesen Sprödbbruchanteile, jedoch in sehr unterschiedlichen Größenordnungen, auf. Die Bauteile mit kleinen Sprödbbruchanteilen zeigten dabei die höheren Maximalkräfte, C7 und C3 mit 164 kN bzw. 158 kN, im Vergleich zu den Proben M65-08A und M65-09A mit 125 kN bzw. 94 kN bei erheblichen Spaltbruch-Flächenanteilen von etwa 65 % bzw. 90 %.

Die Kraft-Kolbenweg-Kurven weisen einen schlagartigen Kraftabfall bei Eintritt des Spaltbruchversagens auf und die verbleibende Tragfähigkeit ist abhängig vom noch tragenden Restquerschnitt.

4.8.7 Vergleich BAM – SLV

In Bild 110a) sind die Ergebnisse der Bauteilzugversuche im Kontext gleicher Bauteilzugversuche an gleichen Verbindungen des Masts 65 [82] zusammengestellt, wobei keine Unterscheidung der Prüftemperaturen, 23 °C und 0 °C, getroffen wurde, jedoch nach verschiedenen Versagensarten unterschieden wurde.

Darüber hinaus sind die nach verschiedenen Regelwerken, Stand 1985 und heute, ermittelten Bemessungswerte für die untersuchte Verbindungsart, 2-fach Verbindungen mittels Nieten oder Schrauben angeschlossenen Diagonale mit einem Profil 60x60x6 dargestellt. Die Normen und Berechnungen sind detailliert in Tabelle 20 dargestellt.

Die Ergebnisse an den Verbindungen mit dem Lochdurchmesser 17 mm zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Kräfte des Scherversagens der Niete bzw. Schrauben liegen jeweils auf einem Niveau, wobei das Schraubenversagen (jeweils in einer S355-Diagonale geprüft) höhere Bruchkräfte zeigten. Darüber hinaus wird deutlich, dass die beobachteten verschiedenen Versagensarten im gleichen Kraftbereich auftreten.

Bei den Bauteilzugversuchen mit einem Lochdurchmesser von 21 mm trat Nietversagen nicht auf.

Die Linien der Beanspruchbarkeit für Querschnittsversagen, gerechnet nach VDE 0210:1985 und DIN EN 50341-1:2002, liegen auf gleichem Niveau. Die nach DIN EN 50341-1:2002 berechneten Nettoquerschnitte sind geringer, jedoch ist die zu berücksichtigende Zugfestigkeit nach Werkstoffnorm etwas höher (360 MPa statt 340 MPa). In der DIN EN 50341-3-4:2002, dem nationalen Teil -3-4 erfolgt eine Minderung der nach Teil 1 berechneten Werte um 10 %. Für die folgende Diskussion der Abweichung der experimentell ermittelten Maximalkraft (Ist-Zustand) vom Querschnittsbeanspruchbarkeitswert (Mindestsoll nach Norm) bleibt dieses zu beachten.

Die Kurve der Beanspruchbarkeit für Lochleibungsversagen liegt für den berechneten Fall unterhalb der Kurven der Querschnittsbeanspruchbarkeitswerte. In den Bauteilzugversuchen trat Lochleibungsversagen häufiger auf. Lediglich die Bauteile mit sprödem Querschnittsversagen liegen noch niedriger in der Bruchkraft. Mit einer Erhöhung des Lochabstandes vom hinteren Ende der Diagonale von 30 mm auf 35 mm erhöhen sich die Beanspruchbarkeitswerte für Lochleibungsversagen um durchschnittlich 24 kN und liegen oberhalb des Niveaus der

Querschnittsbeanspruchbarkeitswerte nach VDE 0210 bzw. EN 50341-1, Bild 110a.

Die Maximalkräfte der Verbindung mit 17 mm Lochdurchmesser mit Diagonalversagen liegen unterhalb der Kurve der Beanspruchbarkeitswerte für Querschnittsversagen bzw. erreichen diese gerade. Das heißt, es ist eine Minderung der Maximalkräfte gegenüber dem Mindest-Normenwert, zu beobachten, Bild 110a. Für die Bauteilzugversuche mit einem Lochdurchmesser von 21 mm ist das scheinbar nicht der Fall. Der Grund liegt in den deutlich höheren Festigkeitswerten dieser Diagonalen, die einem St 42 entsprechen. Dagegen basieren die Kurven auf einer Mindestzugfestigkeit für St 37 von 340 MPa bzw. 360 MPa. Mit einer Mindestzugfestigkeit für St 42 von 410 MPa berechnet, würde die Kurve der Querschnittsbeanspruchbarkeit nach VDE 0210:1985 genau durch die eingetragenen Werte verlaufen, Bild 110b). In diesem Bild liegt der Wert der Beanspruchbarkeit für Scherung deutlich über den anderen Beanspruchbarkeitswerten; ein Scherversagen trat in diesen Bauteilzugversuchen auch nicht auf.

4.9 Einordnung der BAM-Ergebnisse in die SAG /SLV-Versuchsergebnisse

Im Zuge der Analyse des Einflusses der Versprödung auf das Versagensverhalten alter Masten wurden die in vielen Prüfberichten [72][74][76][77][78][82][86] und [87] vorhandenen Daten zusammengetragen und gemeinsam ausgewertet, s. Kap. 3.4 und 3.5. Nur so ist eine gesicherte statistische Aussage möglich. Aufgrund der Datenlage und den zur Verfügung stehenden Informationen wurde keine Unterscheidung der Versagensarten (spröde, duktil, Lochleibung) vorgenommen, jedoch alle anderen Versagensarten, wie z.B. Nietversagen, ausgeschlossen.

Aus den vorhandenen experimentellen Daten wurden analog zu bisher durchgeführten Datenanalysen aufgrund der verschiedenen geprüften Profilgeometrien, der Diagonalwerkstoffe und der Verbindungsarten die Abweichung ABW der experimentell ermittelten Maximalkraft $F_{\max, \exp}$, in den Berichten meist als Bruchkraft bezeichnet, gegenüber dem Wert der Beanspruchbarkeit nach Norm N_{sk} , in den Berichten meist als Normbruchkraft bezeichnet, ermittelt und auf diese normiert,

$$ABW = \frac{(F_{\max, \exp} - N_{sk})}{N_{sk}} \text{ in } \%$$

Für negative Werte liegt der experimentelle Wert unterhalb des Wertes der Beanspruchbarkeit, bei 0 % wird dieser gerade erreicht.

Insgesamt konnten 215 Datensätze in die statistische Analyse einbezogen werden.

Bild 111 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Abweichung, die auf den nach VDE 0210:1985 berechneten Querschnittsbeanspruchbarkeitswerten basiert. Die Häufigkeitsverteilung liegt deutlich im negativen Bereich mit einem Mittelwert von -11,2 %. Etwa 76 % aller Diagonalen zeigen eine niedrigere Versagenskraft als die berechnete Beanspruchbarkeit (Mindest-Normwert). Das 5 %-Quantil liegt bei -39,8 %, d.h. 5 % aller Diagonalen zeigen sogar eine Minderung von mindestens 40 %.

Bei Stählen höherer Festigkeit z.B. St 42 statt St 37 wird die Kurve in einem nicht bekannten Maße zur positiven Seite hin verschoben. Daher wurden die vier Ergebnisse der in der BAM geprüften Bauteile mit einem Lochdurchmesser von 21 mm, die eine höhere Festigkeit aufwiesen, im Bild 111 markiert.

Die Verteilungsfunktion der Häufigkeitsverteilung ist in Bild 112 dargestellt. Zusätzlich wurden, aufgrund der in den verschiedenen Regelwerken unterschiedlich

berechneten Beanspruchbarkeitswerte, wie anhand des Bild 110a) oben schon diskutiert, die Verteilungsfunktionen der Auswertungen nach DIN EN 50341-1 bzw. DIN EN 50341-3-4 vergleichend dargestellt. D.h. die selben experimentell ermittelten Werte wurden auf die unterschiedlichen Berechnungen der Beanspruchbarkeitswerte (Mindestnormwerte) bezogen.

Da es keine wesentlichen Unterschiede in den Beanspruchbarkeitswerten nach VDE 0210:1985 und DIN EN 50341-1:2002 gab, (gleiches Niveau in Bild 110a)) liegen die Verteilungskurven fast übereinander. Legt man jedoch die Beanspruchbarkeitswerte nach DIN EN 50341-3-4:2002 zugrunde, dann rutscht die Kurve um etwa 10 % nach rechts. Der Mittelwert der so berechneten Abweichungen ABW liegt jetzt bei -1,3 %. Grund dafür ist die in der Norm geforderte 10%-ige Minderung der Beanspruchbarkeit gegenüber der DIN EN 50341-1.

4.10 Fraktographie: Vergleich der Bruchflächen der Bauteilversuche mit denen der Schadensteile

Die Bruchflächen der Bauteilversuche 1503-M65-08A und 1503-M65-09, die die geringsten Bruchkräfte aufwiesen, gleichen makroskopisch mit Abstand am besten den vorgefundenen Brüchen der Diagonalen M65-01 und M65-04. Um dies zu verdeutlichen, wurden je eine Schadensbruchfläche und eine Bruchfläche aus dem Bauteilversuch einander gegenübergestellt, Bild 76 und Bild 77. In den beiden Bildern sind die vorgefundenen Brucharten, also (duktiler) Wabenbruch und (spröder) Spaltbruch, eingezeichnet. Die beiden Bruchflächen in Bild 76 zeigen auf der kurzen Strecke vom Loch bis zum Rand des Profils einen duktilen Bruch, während dies bei den beiden Bruchflächen in Bild 77 nicht der Fall ist. Bei letzteren ist der Spaltbruchanteil größer.

4.11 Fazit

Die beiden Bauteilversuche 1503-M65-08A und 1503-M65-09 zeigen schadensäquivalente Spaltbruchanteile. Sie sind aus fraktographischer Sicht hervorragend mit den vorgefundenen Schadensbrüchen vergleichbar. Somit kann den Schadensbrüchen eine konkrete Kraft zugeordnet werden. Bruchkräfte bis herunter auf 94 kN können auftreten. Nach der Verteilung in Bild 112 sind auch noch geringere Beanspruchbarkeiten wahrscheinlich.

5 Einwirkungen, Belastungen

5.1 Vergleich der Lastannahmen in den verschiedenen Ausgaben der Freileitungs-Normen

In Tabelle 21 sind wesentliche Ausgaben aus der Historie des Regelwerkes VDE 0210 gegenübergestellt. Der Vergleich zielt insbesondere auf die anzusetzenden Einwirkungen aus Wind und Eis und wird in den Diagrammen in Bild 113 und Bild 114 an Hand von Beispielannahmen illustriert.

Beim Vergleich der als Windlasten zu berücksichtigenden Staudrücke ist ersichtlich, dass diese in der Tendenz in den Ausgaben 1958 bis 1985 weniger hoch anzusetzen sind als nach den Regelwerken aus den Jahren 1930 und 2002.

Die Eislastannahmen gingen nach den Ausgaben der Jahre 1930 und 1958 in den Folgeausgaben geringfügig zurück. In der aktuellen Ausgabe des Regelwerkes DIN EN 50341:2002 [53] (seit 2004-01-01 Nachfolger der VDE 0210 [43]) werden die Eislasten nach den so genannten Zonen 1 bis 3 angesetzt. Die Bestimmung der Zonen wird nicht gemäß einer geographischen Karte geregelt, sondern ist vom Bauherrn festzulegen.

Aus einer großen Anzahl von Bildern der Fotodokumentation des Störfalls, beispielsweise Bild 38, ist zu entnehmen, dass Leiter mit ihrem extremen Durchhang offensichtlich jegliche Vorschriften hinsichtlich Sicherheitsabstände zwischen Leiter und Boden/Bauwerk verletzen, bevor die Masten versagen. Aus diesen Bildern kann auf eine extreme Einwirkungssituation geschlossen werden. Wie einigen Fotos, auf denen der Schneewalzenquerschnitt zu sehen ist, entnommen werden konnte, muss die Eisummantelung der Leiter die nach den Vorschriften anzusetzenden Eislasten weit überschritten haben. Selbst die Eislastansätze des aktuellen Regelwerkes DIN EN 50341 wurden offensichtlich überschritten, vgl. 5.2.

Neben der Höhe und Art der Einwirkungen wird zudem die Lastkonstellation normativ vorgeschrieben. Auch hier sind Änderungen zu verzeichnen, die in Tabelle 22 dargestellt sind. Hiernach ist zu entnehmen, dass die Masten generell, also mindestens ab dem Regelwerk aus dem Jahr 1930, für den Ausfall eines einseitigen Leiterzuges zu bemessen sind. Dieser Lastfall bedingt eine geringe Torsion des Masts.

5.1.1 DIN 1055-5: Lastannahmen infolge Schnee und Eis

Nach DIN 1055-5:2005-07 [56] ist für filigrane Bauelemente, beispielsweise Seile, die Einwirkung infolge Eis zu berücksichtigen. Hierbei ist zwischen Eis infolge gefrierenden Nebels oder Regens oder infolge Raueis zu unterscheiden.

Nach Tabelle A.4 der DIN 1055-5:2005-07 sind für das Münsterland die Vereisungsklassen G2 und R1 zu untersuchen.

5.1.1.1 Vereisungsklasse G2:

Die Vereisungsklasse G repräsentiert den Ansatz von Eis infolge gefrierenden Nebels oder Regens.

G2 bedeutet hierbei, dass ein allseitiger Eisansatz mit einer Dicke von 2 cm mit der Wichte $\gamma = 9 \text{ kN/m}^3$ zu berücksichtigen ist.

Hieraus ergibt sich eine Eisansatz für den Leiter mit $d = 21,7 \text{ mm}$ von

$$26,2 \text{ cm}^2 \times 9 \text{ kN/m}^3 = 0,024 \text{ kN/m} \approx 2,4 \text{ kg/m}$$

5.1.1.2 Vereisungsklasse R1:

Die Vereisungsklasse R1 repräsentiert den Ansatz von Raueis. Nach Tabelle A.1 der DIN 1055-5:2005-07 ist für R1 mit einer Linienlast von 0,005 kN/m zu rechnen. Nach DIN 1055-5:2005-07 wird bemerkt, dass eine mögliche Rotation des Querschnitts, wie es bei Seilen möglich sein kann, dies beim Eisansatz berücksichtigt werden muss. Daher wird die 4-fache Einwirkung aufgebracht, so dass sich für R1 ergibt:

$$4 \times 0,005 \text{ kN/m} = 0,02 \text{ kN/m} \approx 2,0 \text{ kg/m}$$

5.1.1.3 Fazit

Die nach DIN 1055-5:2005-07 maximal anzusetzende Einwirkung infolge Eislasten beträgt

2,4 kg/m.

Nach der DIN EN 50341-3-4:2001-03 ist mit $d = 21,7 \text{ mm}$ als Eislast folgendes anzusetzen

Eislastzone I	0,7 kg/m
Eislastzone II	1,4 kg/m
Eislastzone III	2,9 kg/m

Die Eislastzonen I und II liefern demnach geringere Einwirkungen als nach DIN 1055-5:2005-07 gefordert.

Die DIN 1055-5:2005-07 bietet den entscheidenden Vorteil der geografischen Zuordnung von anzusetzenden Vereisungsklassen. Daher wäre im Münsterland nach DIN 1055-5:2005-07 2,4 kg/m anzusetzen gewesen. Nach Aussage von RWE wäre im Münsterland nach DIN EN 50341-3-4:2002-03 die Eislastzone I mit 0,7 kg/m in Ansatz zu bringen. Dies entspricht 30 % der nach DIN 1055-5:2005-07 geforderten Einwirkungshöhe.

5.2 Abschätzung der tatsächlich aufgetretenen Eislasten nach [58]

Zur Abschätzung der tatsächlich aufgetretenen Eis- und Schneelasten wurde der Deutsche Wetterdienst (DWD), Abteilung Klima- und Umweltberatung, in Potsdam am 2006-01-09 beauftragt. Das amtliche Gutachten [58] ist am 2006-01-25 eingegangen.

Darin wurden zunächst die untere sowie die obere Lastgrenze abgeschätzt. Als Grundlage zur Bestimmung der minimalen, bzw. der maximalen Schneewichte dienten zwei dem DWD von der RWE Systems Consulting GmbH zur Verfügung gestellte Fotos. Nach [58] kann demnach von einer minimalen Schneewichte von 2 kN/m^3 (Packschnee) und von einer maximalen Schneewichte von $5,9 \text{ kN/m}^3$ (völlig verharschter Altschnee) ausgegangen werden. Der Durchmesser der Schneeablagerung wurde auf Grundlage von Internet- und sonstiger Recherchen zwischen 10 cm und 20 cm ermittelt [58]. Unter Berücksichtigung eines mittleren Leiterdurchmessers von 20 mm ergab sich bei Ansetzung des abgeschätzten minimalen Durchmessers der Ablagerung von 10 cm und einer abgeschätzten minimalen Schneewichte von 2 kN/m^3 für die untere Lastgrenze ein Wert von $15,1 \text{ N/m}$ [58]. Für die obere Lastgrenze ergibt sich unter Verwendung des abgeschätzten maximalen Durchmessers der Ablagerung von 20 cm und einer abgeschätzten maximalen Schneewichte von $5,9 \text{ kN/m}^3$ ein Wert von $183,1 \text{ N/m}$ [58].

Anschließend wurde die bestmögliche Abschätzung der tatsächlich aufgetretenen Eislast durchgeführt. Für diese Berechnung wird von einer Schneedichte von $0,3 \text{ g/cm}^3$ [58] ausgegangen, da es sich bei den aufgetretenen Ablagerungen am wahrscheinlichsten um schweren Packschnee handelt [58]. Basierend auf den Resultaten des Gutachtens von Prof. Schildheuer wurde für die Berechnung ein Wert für den Durchmesser der Ablagerung von $15 \pm 3 \text{ cm}$ angesetzt [58]. Somit ergibt sich nach den vorliegenden Erkenntnissen für die bestmögliche Abschätzung der tatsächlich aufgetretenen Eislast der Wert $51,1 \pm 22,5 \text{ N/m}$ [58].

Aus den von RWE zur Verfügung gestellten Zeugenaussagen von RWE Mitarbeitern ergab sich, dass sich die Wettersituation um 21:00 Uhr bei Wehrendorf nördlich Osnabrück, um 23:00 Uhr bzw. 24:00 Uhr bei Ibbenbüren westlich von Osnabrück beruhigte und das Schneetreiben nach Mitternacht nicht mehr beobachtet wurde. Daraus kann vermutet werden, dass der Zuwachs an Streckenlast der Schneewalzen in den letzten Stunden vor dem Umbruch der Masten der BL1503 um 02:26 Uhr sehr gering war.

5.2.1 Abschätzung des Streckengewichts der Schneewalze auf Foto IMG_7995

Die Abschätzung des Streckengewichts der Schneewalze auf dem von RWE zur Verfügung gestellte Foto "IMG_7995", Bild 116, [64], erfolgte durch Geometrievergleich der auf dem Foto abgebildeten Handschuhen mit den von RWE zur Verfügung gestellten Original-Handschuhen "Winter Tuf-Duk, 31-790, Anselm Edmont, Gr. 10". Das genannte Foto wurde auf dem Bildschirm so skaliert, dass die Abmessungen der auf dem Bildschirm dargestellten Handschuhe in etwa denen der Original-Handschuhe entsprachen. Der anschließend auf dem Bildschirm gemessene maximale Durchmesser der Schneewalze betrug ca. 13 cm. Unter Annahme einer Dichte von 300 kg/m^3 (Nassschnee, [59]) sowie einem Seildurchmesser von 20 mm und einem kreisförmigen Querschnitt der Schneewalze, wurde ein Streckengewicht von ca. $3,9 \text{ kg/m}$ berechnet. Der auf dem Foto in Bild 116 erkennbare dünne Eismantel wurde bei der Berechnung des Streckengewichts nicht berücksichtigt, da „sehr wahrscheinlich davon auszugehen ist, dass sich das Klareis erst in der Nacht zu Montag den, 28.11.2005 gebildet hat“ [59].

5.2.2 Gemessene Luft- und abgeschätzte Masttemperatur

Die Lufttemperatur im Bodenniveau wurde vom DWD gemessen und in [58] zusammengefasst. Zum Zeitpunkt des Schadensereignisses betrug die „Lufttemperatur im Bodenniveau zumeist nicht weniger als $0,1 \text{ °C}$ “ [58]. Da die Luft „zumindest nahezu gesättigt“ [58] war, kann man von einem „vertikalen Temperaturgradienten von max. $0,8 \text{ °C} / 100 \text{ m}$ “ [58] ausgehen. „Dementsprechend ergibt sich in den für die Leiterseile relevanten Höhen bis max. 50 m eine Lufttemperatur nicht unter $-0,3 \text{ °C}$ “ [58].

Bei der Abschätzung der Masttemperatur stellt sich die Frage, ob es durch den starken Niederschlag in Verbindung mit starkem Wind zu einer Kühlung der Masten durch Verdampfung des auf die Strommasten auftreffenden Niederschlags kommen konnte (Prinzip der adiabatischen Kühlung)? Diese Frage wurde im Gutachten von Prof. Zellner [60] beantwortet. Demnach konnte aufgrund der nahezu vollständig mit Wasserdampf gesättigten Umgebungsluft [58], [60] die Kühlung der Strommasten entsprechend dem o.g. Prinzip nicht verstärkt werden [60]. Demzufolge kann davon ausgegangen werden, dass die Masttemperatur in etwa der Lufttemperatur entsprach [60]. Auf Nachfrage hält Prof. Zellner eine Masttemperatur von z.B. -5 °C bei der vom DWD beschriebenen Wetterlage für ausgeschlossen.

5.3 Abschätzung der realen Einwirkungen aus Seildurchhangsrechnungen von RWE

Aus den Fotos der Tage nach den Mastumbrüchen wurde ein Bodenabstand des untersten Leiterseils von 1,2 m bzw. 0 m (=auf dem Boden aufliegend) abgeschätzt, Bild 38. Mittels Seilkurvenberechnung [84] am Abschnitt M60 bis M65 der BL1503 wurde durch Steigerung der Streckenlast versucht, diesen Durchhang rechnerisch nachzuvollziehen. Dazu wurden folgende Parameter verwendet: Ausgangszustand bei -5°C + Zusatzlast gem. Spanntabelle nach DIN VDE 0210:1985-12, Zustand bei 0°C .

Bei einer Belegung 3/5 der Spannweite mit einer Streckenlast 62 N/m nur zwischen M62 und M63 stellt sich ein Bodenabstand 1,2 m (Durchhang von 17,7 m) und eine Seilkraft von ca. 32 kN ein.

Bei einer Belegung 3/5 der Spannweite mit einer Streckenlast 83 N/m nur zwischen M62 und M63 stellt sich ein Bodenabstand 0 m (Durchhang 18,9 m) und eine Seilkraft von ca. 39 kN ein.

Bei einer Belegung der Abschnitte M61-M62, M62-M63 und M63-M64 lässt sich ein Bodenabstand im mittleren Feld M62-M63 nur dann erreichen, wenn in diesem mittig 3/5 der Feldlänge eine Streckenlast von 136 N/m sowie in den beiden angrenzenden Feldern 3/5 der Feldlänge 62 N/m aufgebracht werden. Die Seilkräfte betragen dann ca. 54 kN, ca. 65 kN und ca. 55 kN.

In [85] wird beschrieben, dass Bild 37 von der Freileitung Gronau – Coesfeld, BL1503 stammt. Dies wurde wie in Kap. 5.5.1 beschrieben nachgewiesen. Dieses Feld befindet sich im gleichen Freileitungsabschnitt wie das Foto <IMG_7970> in Bild 38, also im Abschnitt Mast Nr. 80 bis 85. Der zusatzlastbehaftete Stromkreis ist nur abschnittsweise angeeist und zwar vorwiegend in Feldmitte. Dies entspricht der Theorie, dass die Schneewalzen sich in Feldmitte am tiefsten Punkt sammeln und dort durch die ungleiche Zusatzlast zu einer extrem großen Durchhangsvergrößerung führen. Die Schrägstellung der Tragketten weist darauf hin, dass die Zusatzlasten in den Feldern unterschiedlich sind, andererseits sind die Schrägstellung und die Schiefstellung der Ketten nicht extrem.

5.3.1 Folgerungen für die Lastannahmen

Seildurchhang bis zum Boden in einem kompletten Abspannabschnitt würden Streckenlasten erfordern die rechnerisch zu nicht ertragbaren Seilkräften und -spannungen führen [83]. Da Seilbruch nach Angaben von RWE [85] nicht aufgetreten ist, wird diese Lastannahme verworfen.

Werden jedoch, wie auf den ausgewerteten Fotos der Tage nach den Mastumbrüchen zu sehen, Bild 35, 2 bis 3 aufeinander folgende Felder zu 3/5 mit Streckenlast belegt, so lässt sich mit Streckenlasten zwischen 6 und 10 kg/m im mittleren Feld Seildurchhang bis 1,2 m über dem Boden abschätzen. Die sich dabei einstellenden Seilkräfte und -spannungen sind ohne plastische Längung ertragbar, die Ketten der Tragmasten werden zum mittleren, weit durchhängenden Feld hin um bis zu 1,3 m [83] horizontal ausgelenkt. In Bild 37 ist eine Schrägstellung der Ketten zu sehen. Durch Minderung des Belegungsanteils im Feld auf 4/5 käme man vermutlich in die Nähe der für die statischen Berechnungen der Reallastfälle verwendeten Streckenlast 5,3 kg/m. Diese wird daher auch auf Grund der Seildurchhangsberechnungen als plausibel angesehen.

5.4 Fazit Streckenlasten

Für die Berechnung ist es zweckmäßig eine Vollbelegung der Leiter anzusetzen. Hierzu muss jedoch die auf 100% der Leiterlänge anzusetzende Streckenlast auf das Maß der Völligkeit der Leiterbelegung abgemindert werden. Dieses Maß vari-

iert, wie es einigen Bilder entnommen werden konnte, zwischen 3/5 bis 5/5, also 60 % bis 100 %. Aus den vielen zur Verfügung stehenden, o.g. Quellen wurden Streckenlasten und die jeweilige Belegung eines Feldes berücksichtigt, um die Rechenwerte der Streckenlast für die statische Berechnung für eine Vollbelegung der Leiter zu ermitteln, Tabelle 23.

Kombiniert man die Angaben der Seildurchhangsberechnung mit der aus den Bildern abgeschätzten Völligkeit der Leiterbelegung von 3/5, so gelangt man auf Werte zwischen 3,6 und 6 kg/m.

Das DWD-Gutachten [58] gibt beispielsweise einen Wert von 5,3 kg/m an. Dieser Wert gilt für das gesamte Gebiet und wurde zunächst bei der Berechnung der Reallastfälle auf der gesamten Leiterlänge angesetzt.

Die in Kap. 5.2.1 durchgeführte Ermittlung der Streckenlast von 3,9 kg/m erfolgte für Schneewalzen an der BL1503 und kommt den geographischen Lage von M65 am nächsten, gilt jedoch streng genommen nur für eine Stelle.

Um für den Versagenslastfall einerseits eine realistische Annahme der Teilbelegung der Leiter berücksichtigen zu können, und andererseits die geographische Lage genauer in Betracht zu ziehen, wurde für diesen besonderen Lastfall auf der gesamten Leiterlänge anstatt mit 5,3 kg/m mit einer Streckenlast von 3,9 kg/m ausgegangen, Tabelle 23.

5.5 Abschätzung unsymmetrischer Seilkräfte aus der Belegung mit Schneewalzen

5.5.1 Analyse der Eisbelegung der Freileitung BL1503 M82-M90

Für die Analyse des Schadenshergangs spielt die Eisbelegung der Leiter eine wichtige Rolle. Im Bereich der Masten M65 bis M74 ließ sich die Eisbelegung nicht mehr direkt nachweisen, da keine Fotos aus der Zeit kurz vor dem Schadensereignis vorlagen. Es gibt allerdings Fotos von anderen Freileitungsabschnitten der BL1503 in der Nähe, wo die Masten nicht versagt haben. Diese Aufnahmen waren bezüglich ihres Entstehungsorts nicht genau gekennzeichnet. Mit Hilfe der Freileitungspläne, denen eine topographische Karte unterlegt ist, wurde versucht, die Bilder bezüglich Standpunkt und Blickrichtung bestimmten Masten zuzuordnen.

Es gelang schließlich, einige aussagekräftige Bilder dem Freileitungsplan eindeutig zuzuordnen. Bei den aussagekräftigsten handelt es sich um Bilder der Masten der BL1503 südlich von Mast 74, nämlich im Bereich M82 bis M90, Bild 34.

Bild 35 zeigt demnach die Masten M82, 83 ff., aufgenommen von einem Standpunkt auf oder direkt neben einer Landstraße (Diese Landstraße mit der Kennung K 33 ist in Bild 42 abgebildet). In Bild 36 sind der ermittelte Standpunkt und Blickwinkel der Kamera skizziert. Die Zuordnung der Masten wurde an Hand von Geländeinformationen der topographischen Karte wie Straßen, Waldstücke, Gebäude und Geländewellen vorgenommen. Hinzu kamen die farbigen Markierungen an den Masten, an denen zusätzlich die Blickrichtung überprüft werden kann. Bild 38 zeigt denselben Streckenabschnitt, nämlich die Masten M83, 84 ff. in Blickrichtung Südost. Hinzu kommen noch zwei Fotos, die den Mast M89 zeigen, aufgenommen ebenfalls mit Blickrichtung Südost, Bild 40 und Bild 41.

Alle genannten Bilder zeigen übereinstimmend, dass die Leiter auf der linken (östlichen) Seite der Freileitung keinen Eisbehang aufweisen, während die Leiter auf der rechten (westlichen) Seite sowie das Erdseil zwischen den Mastspitzen sichtbare Eispanzer aufweisen. Die unteren Leiter auf der östlichen Freileitungsseite hängen teilweise bis zum Boden durch, wie in Bild 38 zu erkennen ist.

Die Auswertung der zu den Fotos gehörenden Bildinformationen ergab, dass zum Aufnahmezeitpunkt der hier gezeigten Bilder noch kein Eis von den Leitern

abgeschlagen wurde. Mit dem Abschlagen wurde erst danach begonnen, Bild 42 und Bild 43.

Nach Schreiben von RWE vom 2006-02-01 [85] trat Eisabwurf aufgrund des Wetterumschwungs erst ab Montag 28.11.2005 auf.

5.5.2 Auswertung einseitiger Betrieb im Schadensbereich BL1503

Eine Auswertung der Betriebsprotokolle der BL1503 sollte Aufschluss geben über den Stromfluss durch die Leiter im Schadensbereich M65 bis M74. Die entsprechenden Unterlagen wurden von RWE zur Verfügung gestellt und ausgewertet, Bild 44 bis Bild 48.

Die BL1503 ist im Schadensabschnitt elektrisch in ein westliches und ein östliches System getrennt: West Gronau – Dülmen, 1531 sowie Ost Gronau – Coesfeld mit der Nummer 1532, Bild 44. Beide Seiten werden offenbar unabhängig voneinander betrieben. Die Datumsangaben in den Graphiken von RWE sind teilweise inkorrekt, Bild 45 und Bild 46. Gemeint ist offenbar der Zeitraum 25.11. und 26.11.2005. Das Diagramm der elektrischen Belastung des östlichen Systems, Bild 45, zeigt wie erwartet den Ausfall durch Mastschäden am 26.11.2005 um 2:26 Uhr. Das westliche System hingegen, Bild 46, wurde nach Aussagen von RWE um ca. 21:35 Uhr des vorherigen Tages, also ca. 5 Stunden früher, wegen extremen Durchhangs im Bereich von Straßen aus Sicherheitsgründen abgeschaltet.

Bild 47 zeigt die Zusammenstellung der wichtigsten Aussagen der 3 zuvor gezeigten Bilder. Grob genähert wurde das westliche System in den letzten Betriebsstunden mit durchschnittlich ca. 100 Ampere belastet und am späten Abend des 25.11.2005 abgeschaltet, während das östliche System 5 Stunden länger mit ca. 200 Ampere im Schnitt betrieben wurde. Es lag also ein einseitiger Betrieb der beiden Teilsysteme 1531 und 1532 vor.

Eine Aussage darüber, welche Wärmemengen bei diesen Stromstärken frei werden und wie dies die Anlagerung von Schnee an den Leitern beeinflusst, ist ohne weiter gehende Informationen zu diesem Thema nicht möglich und unterbleibt daher.

Die Beobachtung einseitigen Betriebs und die Beobachtung unterschiedlich starker Belegung der beiden Teilsysteme mit Schnee passen jedoch gut zusammen, Bild 48. Mangels besserer Erklärungen wird der kausale Zusammenhang von einseitigem Betrieb und davon erzeugter einseitiger Schneebelegung als Arbeitshypothese betrachtet.

Nach Schreiben [85] vom 1.2.2006 stammt die Aufnahme in Bild 38 vom 28.11.2005. Es wird die Vermutung geäußert, dass die unterschiedliche Schneebelegung der Stromkreise mit den Leiter- und Umgebungsbedingungen bei Beginn der Aneisung zusammen hängt.

5.5.3 Verbiegung C-Bock Mast 1503M82

Bild 49 zeigt Ausschnittvergrößerungen der schon zuvor gezeigten Bilder der Masten M82 und M83. Die Ausschnitte zeigen den Bereich der C-Böcke. Beide C-Böcke haben eine mehr oder weniger starke plastische Verformung erlitten. Dieser Befund belegt, dass das Erdseil, das von den C-Böcken getragen wird, eine hohe und ggf. feldweise ungleiche Schneebelegung gehabt haben muss.

5.6 Versagenslastfall

Auf Grund der oben dargelegten Beobachtungen wird angenommen, dass die Belegung der Leiter im Bereich M82 bis M89 auf den Bereich um M65 übertragbar ist, da dieser Bereich räumlich nicht weit entfernt ist und zudem der Strom-

fluss durch die Leiter derselbe gewesen ist. Zusammen mit den Unterschieden in der Schneebelegung durch unterschiedliche Winkel zum Wind, ergibt sich für den Mast M65 eine Situation, wie sie in Bild 50 skizziert ist. Die beiden auf der östlichen Seite nach Norden bzw. Südosten abgehenden Leiter weisen keine Schneewalzen auf und erzeugen daher nur Zugkräfte auf Grund ihres Eigengewichts. Auf der westlichen Seite sind zusätzlich Schneewalzen vorhanden, die zusätzliche Zugkräfte erzeugen. Die nach Südosten abgehende Freileitung ist stark belegt, da sie fast senkrecht zum Wind stand. Die nach Norden abgehende Freileitung ist nur schwach belegt, da sie fast parallel zum Wind stand. Die aus dieser Situation resultierenden Kräfte auf den Mast werden in Kapitel 6 berücksichtigt.

6 Konstruktive Betrachtungen, statische Untersuchungen

6.1 Bemessungskonzept für Tragwerke

Aufgrund der starken Streuungen der versagensbeeinflussenden Parameter ist es nicht sinnvoll, Schadensfälle nur deterministisch zu betrachten. Ein realitätsnäheres Bild liefert die probabilistische Betrachtung. Bei der probabilistischen Betrachtung werden alle versagensbeeinflussenden Parameter als Zufallsvariablen mit entsprechenden Verteilungen berücksichtigt. Für ein Versagen bzw. für einen Versagenspfad wird eine sog. Grenzzustandgleichung definiert, nach der ein Versagen bzw. ein Ausfall eintritt, wenn die Beanspruchung die Beanspruchbarkeit überschreitet, also

$$R - S < 0$$

gilt, wobei S (= Stress) und R (= Resistance) die sog. Basisvariablen sind. Diese Variablen sind Zufallsgrößen und unterliegen einer Verteilung. Bild 129 zeigt schematisch die Verteilungen der im vorliegenden Fall beiden wichtigsten Basisvariablen Wettereinwirkung und Bauteilbeanspruchbarkeit. Die Verteilungen sollen hier als die endgültige Summe aller Einflussparameter betrachtet werden (bei S: Wind, Schnee, Luftfeuchtigkeit, Temperatur, Geländeverhältnisse etc. und bei R: Materialeigenschaften, Grad der Versprödung, Bauteilabmessungen, Bauausführung, Eigenspannungen etc.). Der Überlappungsbereich der beiden Verteilungen von R und S ist ein Maß für die Ausfallwahrscheinlichkeit. Im Bauwesen wird auf dem Bemessungsniveau auf der Beanspruchbarkeitsseite R die 5 %-Fraktile zzgl. eines Sicherheitsbeiwertes γ_m angenommen. Das bedeutet: man rechnet mit einer Beanspruchbarkeit, die in 95 % der Fälle mindestens gewährleistet ist dividiert durch einen Sicherheitsbeiwert γ_m , der weitere konstruktive Unsicherheiten abdecken soll. Auf der Beanspruchungsseite S wird der Mittelwert der Extremalwerte multipliziert mit einem Sicherheitsbeiwert γ_F berücksichtigt. Daraus ergibt sich insgesamt eine sehr geringe Versagenswahrscheinlichkeit. Für Bauwerke wird in der Regel eine rechnerische Versagenswahrscheinlichkeit von 10^{-6} postuliert.

Während die Versprödung des Materials die Bauteilbeanspruchbarkeit herabsetzt und die R-Verteilungskurve in Bild 129 insgesamt mehr nach links verschiebt, muss die S-Verteilungskurve wegen des seltenen Wetterereignisses von November 2005 insgesamt mehr nach rechts verschoben angenommen werden. Der Überlappungsbereich der beiden Verteilungen wird dadurch größer, daraus resultiert eine größere Ausfallwahrscheinlichkeit, wodurch es zum Schaden kommen kann. Dennoch ist aus dem Bild 129 auch ersichtlich, dass nicht alle Masten bei dem Wetterereignis von November 2005 versagen mussten.

6.2 Baustahl – Anforderungen an die Duktilität

Es ist bekannt, dass Altstähle im Vergleich zu heutigen Baustählen in der Regel eine geringere Zähigkeit oder Duktilität aufweisen. Für den Abbau beispielsweise von Eigenspannungen oder Spannungsspitzen infolge von Kerben, ist es erforderlich, dass der Werkstoff in der Lage ist, durch Fließen Lastumlagerungen zu gewähren. Besitzt der Stahl aufgrund nicht vorhandener Duktilität keine Möglichkeit der Lastumlagerung, würde dieser bei Erreichen der Beanspruchbarkeit nur eines Punktes im Querschnitt infolge Sprödbbruch versagen.

Gängige, messbare Größen zur Beurteilung der Sprödigkeit von Materialien sind die Kerbschlagbiegearbeit A_v und die Bruchzähigkeit K_{IC} .

Für die Beurteilung älterer Baustähle hinsichtlich vorliegender Zähigkeitseigenschaften ist das oftmals verwendete Kriterium der vorhandenen Kerbschlagbiegearbeit nicht zweckdienlich. Durch den beim Kerbschlagbiegeversuch erzeugten Pendelschlag wird auf die zu prüfende und mit einer Kerbe hoher Kerbschärfe versehene Stahlprobe eine mehraxiale Beanspruchung mit hoher Dehngeschwindigkeit induziert, die keinem realen Beanspruchungsverhalten bestehender Stahltragwerke des Ingenieurbaus entspricht. In der Arbeit von [41] wurde die Kerbschlagbiegearbeit A_v und der bruchmechanische Zähigkeitskennwert K_{IC} von Flusstählen vergleichend gegenübergestellt. Es zeigte sich in dieser Untersuchung, dass die analysierten Baustähle trotz Unterschreitung der in Normenwerken geregelten Mindestkerbschlagbiegearbeiten nach bruchmechanischen Ansätzen eine gewisse Zähigkeit ausweisen.

Der gegenüber den bruchmechanischen Versuchen sehr preiswerte Kerbschlagbiegeversuch ist eine geeignete Methode, um Baustähle hinsichtlich ihrer Zähigkeitseigenschaften vergleichen zu können. Für die Bewertung der Mindestzähigkeit eines Baustahls erscheint die Kerbschlagbiegearbeit als zu konservativ.

Im Eurocode 3 [57] werden für den in Tragwerken zu verwendenden Stahl Anforderungen an das Bruchverhalten bei Raumtemperatur gestellt:

- Das Verhältnis Zugfestigkeit zu Streckgrenze soll größer gleich 1,2 sein.
- Der Wert der Bruchdehnung darf nicht kleiner als 15 % sein.
- Die zur Zugfestigkeit gehörende Dehnung muss mindestens dem 20-fachen Dehnungswert der Streckgrenze entsprechen.

Durch die Anforderungen wird sichergestellt, dass der Bruch nicht spröde erfolgt und vor dem Bruch stets ein lokal wirkender plastischer Ausgleich der Spannungen erfolgt. Die Norm geht hierbei davon aus, dass die Beanspruchung bei einer Temperatur stattfindet, die auf der Zähigkeits-Temperaturkurve der Hochlage gehört.

Im Allgemeinen werden die oben genannten Forderungen von Flusstählen erfüllt, obwohl sich diese erfahrungsgemäß bereits bei Raumtemperatur zumeist im Übergangsbereich oder in der Tieflage der Zähigkeits-Temperaturkurve befinden, vgl. [41]. Im Übergangsbereich und in der Tieflage ist mit verminderter plastischer Verformbarkeit zu rechnen – die Gefahr des Sprödbruchs steigt.

6.3 Beschreibung der Masttypen

Nach dem Verwendungszweck sind zu unterscheiden:

- Tragmasten, die lediglich zum Tragen der Seile dienen und nur in gerader Strecke verwendet werden dürfen;
- Winkelmasten, die dazu bestimmt sind, die Leiterzüge in Winkelpunkten aufzunehmen;
- Abspannmasten; die Festpunkte in der Freileitung schaffen sollen;
- Winkelabspannmasten sind dazu bestimmt, Leiterzüge in Winkelpunkten aufzunehmen und Festpunkte in der Freileitung zu schaffen;
- Endmasten, die zur Aufnahme des gesamten einseitigen Leiterzuges dienen;
- Kreuzungsmasten; die bei Kreuzung von Fernmeldeleitungen, von Eisenbahnen des allgemeinen Verkehrs oder der Wasserstrassen aufzustellen sind;
- Abzweig- und Verteilungsmasten, die zum Abzweigen oder zum Verteilen der Freileitungen nach verschiedenen Richtungen dienen.

Infolge der verschiedenen Verwendungszwecke der Masten sind unterschiedliche Einwirkungen in Form der Lastkonstellation und Einwirkungshöhe bei der Bemessung zu berücksichtigen. Dies führt zu unterschiedlichen Ausführungen der Masten. Erwartungsgemäß sind die Abspannmasten stets für eine größere Belastung ausgeführt als Tragmasten.

6.4 Sanierungszustand M65

6.4.1 Soll-Zustand nach RWE-Sanierungskonzept

Aufgrund eines RWE-Sanierungskonzeptes, das infolge aufgetretener Schäden infolge Versprödung von RWE in Auftrag gegeben wurde, wurde u. a. der Mast M65 saniert.

Für den Masttyp A13V WA3 +0,0 120° bis 140° liegen uns folgende statische Berechnungen vor:

- Entwurfstatik von C. H. JUCHO, Dortmund, ohne Datum, auf Basis VDE0210:1958-02
- Statischer Nachweis nach Entwurf GHB 9131-641 von ABB, Mannheim, Mast 88A für Freileitung Pöppinghausen Derne vom 1992-01-08, auf Basis VDE0210:1969-05
- Stahlversprödungsrechnung A13V von C_TEAM vom 2004-10-21 auf Basis VDE0210:1954-05 Zeichnung Mastübersicht A13V WA3M41 + 6,00 von C_TEAM vom 2003-08-13 Berechnungsgrundlage VDE0210:1954-05

Der Sanierungsumfang, also die Anzahl der zu tauschenden oder zu verstärkenden Bauteile, ergab sich aus der statischen Berechnung C_TEAM aus dem Jahr 2003. Die Berechnung erfolgte auf Grundlage des Regelwerkes VDE 0210 aus dem Jahr 1954.

Nach der RWE-Sanierung ergibt sich ein Zustand für den Mast, der nachfolgend als Soll-Zustand bezeichnet wird. Soll-Zustand bezieht sich hierbei auf die Forderungen aus der statischen Berechnung.

Die Berechnung ergab eine Spannungsausnutzung für die Eckstiele von maximal 80 %. Damit ist nach dem RWE-Sanierungskonzept für die Eckstiele kein Austausch oder Verstärkung erforderlich.

In der statischen Berechnung werden feldweise Ausnutzungsgrade für die dort befindlichen Diagonalen und Eckstiele angegeben. Der Begriff Feld bezeichnet hierbei ein Teilsegment des Schusses, bestehend aus einem Paar sich kreuzender Diagonalen, einschließlich zugehöriger Eckstiele in diesem Abschnitt. Die Bezeichnung wurde in der statischen Berechnung im Rahmen des RWE-Sanierungskonzeptes festgelegt, Bild 131.

Diagonalen aus Wand x (Ebene mit Traversen)	Felder 8, 9, 10, 12
Diagonalen aus Wand y (Ebene ohne Traversen)	Felder 8, 9, 10

Dabei werden die Spannungsüberschreitungen und damit zu sanierende Bereiche im Mast ausschließlich feldweise angegeben. Es erfolgt keine Unterscheidung hinsichtlich Bauteile, die auf Druck oder Zug beansprucht werden.

Bei den Feldern 8, 9, 10 handelt es sich um die Bereiche oberhalb der untersten Traverse. Das Feld 12 befindet sich unmittelbar unterhalb der untersten Traverse, Bild 131.

6.4.2 Ist-Zustand nach Fotodokumentation und Ortstermin

Durch Auswertung der Fotodokumentation konnten die Eckstiele, Felder und Wände den jeweiligen Wänden zugeordnet werden, vgl. Bild 17.

Infolge der Anwendung unterschiedlicher Korrosionsschutzsysteme war die Zuordnung alte und neue Diagonalen eindeutig möglich. Die alten Diagonalen besitzen einen mehrlagigen Farbanstrich mit einer grünen Deckschicht. Die neuen Diagonalen hingegen weisen als Korrosionsschutz eine Zinkschicht, ohne weitere Farbanstriche, auf.

6.4.3 Fazit

Nach Auswertung der Fotodokumentation vom Ortstermin und Vergleich mit der von RWE vorgelegten Zeichnung mit der Zeichnungsnummer 03rw001_062186, erstellt von C_TEAM im Jahr 2003, konnten Abweichungen nicht festgestellt werden.

Durch den Vergleich der Zeichnung mit der Zeichnungsnummer 03rw001_062186 mit dem geforderten Soll-Zustand nach dem RWE-Sanierungskonzept muss festgestellt werden:

- Im erforderlichen Feld x-12 wurde nur die Zugdiagonale ausgetauscht und abweichend von der statischen Berechnung die Druckdiagonale belassen.
- Zusätzlich wurden in den Feldern x-13 bis x-20 abweichend von der Statik die Zugdiagonalen ausgetauscht und die Druckdiagonalen belassen.

Beim Einbau neuer Diagonalen wurden die bestehenden Nietverbindungen samt Altstahldiagonale ausgebaut. Die bestehenden Löcher in den Knotenblechen wurden für den Anschluss der neuen Diagonalen mittels Schrauben weiter verwendet.

Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass für den Mast M65 die im Rahmen dieses Gutachtens als Primärversagensbereich detektierten Felder nach dem RWE-Sanierungskonzept nicht getauscht oder verstärkt werden mussten.

6.5 Statische Untersuchungen

6.5.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die für den Winkelabspannmast BL1503 M65 und dem Tragmast BL1503 M66 durchgeführten statischen Berechnungen kurz vorgestellt. Wesentliche Elemente der Statik werden erläutert und die relevanten Ergebnisse diskutiert. Alle Details zu den Berechnungen sind in [88] enthalten.

6.5.2 Statische Systeme Winkelabspannmast und Tragmast

Als Grundlage für das statische Modell wurden die von RWE gelieferten Werkstattzeichnungen der Masten 65 und 66 genutzt, [64][65][66][67]. Den Werkstattzeichnungen konnten alle notwendigen Angaben über die Geometrie und den verbauten Querschnitten einschließlich der Anschlüsse entnommen werden.

Die Modelle des Winkelabspannmasts BL1503 M65 und des Tragmasts BL1503 M66, sind in Bild 117 bzw. Bild 118 dargestellt.

Die Masten wurden als räumliche Stabwerke berechnet. Die Verbindung der Gitterstäbe wird im Rahmen des Berechnungsmodells für den Winkelabspannmast als biegesteif angenommen, da die Diagonalen mit zwei Schrauben / Nieten befestigt sind.

tigt sind. Für den Tragmast wurden für die Diagonalanschlüsse gelenkige Verbindungen angesetzt.

Die Stöße in den Stielen (Wechsel der Querschnittswerte) wurden vereinfachend an den nächstgelegenen Systemknotenpunkten angeordnet.

6.5.3 Lastfälle

6.5.3.1 Allgemeines

Ausgehend von der Zielsetzung ergaben sich drei verschiedene Untersuchungsvarianten.

- Normlastfälle zur Überprüfung der Konformität der Konstruktion mit derzeit gültigen Regelwerken
- Reallastfälle zur Voruntersuchung und Eingrenzung der Schadensszenarien
- Versagenslastfall zur Untersuchung bzw. Aufklärung der Primärschadensursache

Ein zusammenfassender Überblick mit den wichtigsten zugrunde gelegten Parametern ist in Tabelle 24 gegeben. Nachfolgend werden sie kurz erläutert.

Die nachfolgend beschriebenen Lastfälle LG1 bis LG13 sind ausschließlich eine Kombination verschiedener Einzellastfälle LF1 bis LF24 (Eigengewicht, Isolatorgewicht, Wind, etc.), Tabelle 25 und Tabelle 26. Die zugehörigen Kraftansätze sind in Tabelle 25. Die Belegungen der Leiter mit Schneewalzen mit und ohne Wind wurden variiert, und die Einzellastfälle sind Bild 119, Bild 120, Bild 121, Bild 122, Bild 123, Bild 124, Bild 125, Bild 126, Bild 127 bzw. [88] zu entnehmen.

6.5.3.2 Normlastfälle LG1 und LG2

Grundlage bei der Ermittlung der Lastannahmen ist die DIN EN 50341-3-4 (Nationales Anwendungsdokument der im Jahr 2002 eingeführten Norm für Freileitungen DIN EN 50341-1:2002), weil sie den aktuellen und anerkannten Stand der Technik repräsentieren, [53][55].

In den Lastfällen LG1 und LG2 werden die in der DIN EN 50341 angegebenen Lastfallsituationen D und H2 (2. Variante des Lastfalles H) bzw. statt H2 K für den Tragmast untersucht. Diese hieraus resultierenden Beanspruchungen des Schafts werden als bemessungsbestimmend angesehen. Bei der Berechnung wurden entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte nach Norm berücksichtigt.

Als Eisansatz wurde nach Abschnitt 4.3.3 in [55] die Eislastzone 2 für den Winkelabspannmast sowie zunächst die Eislastzone 2 und dann die Eislastzone 3 für den Tragmast angesetzt. Die Freileitung liegt in der Windlastzone 2.

Bei der Berechnung der Gittermasten gemäß DIN EN 50341 sind die zu untersuchenden Lastfälle im Abschnitt DE.1 angegeben. Mit der folgenden Analyse von Normlastfällen sollen schwerpunktmäßig die durch das Wetterereignis (Schnee und Wind) verursachten Schadensfälle der Masten untersucht werden. Daher wurde von der Gesamtheit der in der Norm angegebenen Lastfallsituationen nur eine Teilmenge betrachtet. Situationen mit Temperaturen $> 0^{\circ}\text{C}$ wurden nicht weiter untersucht.

Da die Untersuchungen die Aufklärung der Schadensursache zum Ziel hatten, wurde für die Ermittlung der Lasten infolge der Leiter der tatsächliche Abstand der Masten berücksichtigt und nicht der Abstand, welcher mit 400 m für den Seilanteil der ursprünglichen Typenstatik [89] zugrunde gelegt ist.

6.5.3.3 Reallastfälle LG3 bis LG12

Belastungssituationen, die als mögliche Einwirkungskombinationen angesehen werden, sind in den LG3 bis LG12 enthalten.

Hierbei finden die wahrscheinlich vorgeherrschten Einwirkungen Berücksichtigung. Die Höhe der Einwirkungen aus Schnee und Eis orientiert sich hierbei an dem im Gutachten von Prof. Thierauf angegebenen Schneewalzendurchmesser von 15 cm bei einer Dichte von 300 kg/m³. Der Staudruck wurde aus der Windgeschwindigkeit von 18 m/s errechnet, Tabelle 24. Hier wurde ohne Teilsicherheitsbeiwerte gerechnet.

6.5.3.4 Versagenslastfall LG13

Der Versagenslastfall LG13 berücksichtigt alle aufgrund der vorliegenden RWE-Unterlagen bekannten Gegebenheiten zum Versagenszeitpunkt.

Darüber hinaus wurden die Winddaten aus den Gutachten des DWD angesetzt. Es ergab sich, dass zum Zeitpunkt des Umbruchs ein Wind mit einer Windgeschwindigkeit von 11 m/s aus 200° Richtung wirkte.

Zudem konnte die einseitige Belegung der Leiter mit Schneewalzen rekonstruiert werden, Kap. 5.6. Es ist demnach höchst wahrscheinlich, dass die Leiter im Feld zwischen Mast 65 und M66 und folgende ausschließlich rechts mit Eis belegt waren. Für den Versagenslastfall LG13 werden diese Einwirkungen in der zugehörigen Konstellation nach Bild 128 angesetzt.

Die Leiter werden, wie in Tabelle 23 in Kap. 5.4. angegeben, mit einer Schneewalze von 13 cm auf der gesamten Länge belegt angenommen. Ein ähnlich großer Schneewalzendurchmesser ergibt sich ebenso nach der eingangs beschriebenen Vorgehensweise zur Versagensaufklärung, nach der die Beanspruchung von unten beginnend gesteigert wurde, bis das schwächste Glied in der Kette versagte. Ab einem Schneewalzendurchmesser von 12 cm entstehen in den betroffenen Diagonalen Zugkräfte, die für das Versagen relevant sind. Eine weitere Steigerung der Belastung über 13 cm ist nicht mehr erforderlich, zumal dann auch andere Versagensmechanismen wie Stabknicken auftreten könnten.

6.5.4 Ergebnisse

6.5.4.1 Vorgehensweise

Die statischen Berechnungen erfolgten im Unterauftrag durch das Ingenieurbüro K LW Ingenieure GmbH, Pannwitzstraße 3/5, 13403 Berlin. In der BAM wurden die wichtigsten Lastfallgruppen durch unabhängige Vergleichsrechnungen geprüft sowie alle Eingangsdaten, Lastannahmen und Seilkräfte kontrolliert. Zur Durchführung der Vergleichsrechnungen wurde von der BAM das Programm Rstab verwendet.

Das Ingenieurbüro K LW verwendete für die Berechnung des Masts das Programm Ansys sowie Infograph.

Die berechneten Stabkräfte und Auflagerreaktionen sind in der statischen Berechnung [88] aufgelistet und graphisch dargestellt.

Auf der Grundlage dieser Stabkräfte wird der Grad der Ausnutzung η der Tragstruktur für die unterschiedlichen Lastfälle ermittelt.

$$\eta_i = \frac{\text{Beanspruchung}}{\text{Beanspruchbarkeit}}$$

Hierbei wird zwischen druck- und zugbeanspruchten Stäben unterschieden. Des Weiteren wird bei den zugbeanspruchten Diagonalen überprüft, ob die normative Auslastung im Anschlussbereich oder in den ungeschwächten Diagonalen höher ist.

Während bei den Normlastfällen LG1 und LG2 für die Ermittlung der Auslastung die Bemessungswerte zugrunde gelegt wurden, sind bei den Reallastfällen die

charakteristischen Werte verwendet worden. Bei dem Versagenslastfall wurden experimentell ermittelte Werte der Beanspruchbarkeit herangezogen, Tabelle 16.

Ausnutzungsgrad η_1

Die Beurteilung der Ausnutzung der Spannungen im Bereich der Anschlüsse der Diagonalen erfolgt auf der Grundlage der DIN EN 50341-3-4. Bei der Spannungsermittlung wird die Netto-Querschnittsfläche zugrunde gelegt. Diese ermittelt sich in Abhängigkeit von der Anzahl der Schrauben im Anschluss.

Die hier verwendete Notation der Formeln und Gleichungen wurde [44] und [55] entnommen.

Anschluss mit einer Schraube:	$A_{\text{net}} = (b_1 - d_0) \times t$
Anschluss mit zwei Schrauben:	$A_{\text{net}} = (b_1 - d_0 + b_2/2) \times t$

Winkelabspannmast

Diagonale	L60x6, Anschluss mit 2 Schrauben M16
	$A_{\text{net}} = (6,0 - 1,7 + 6/2) \times 0,6 = 4,38 \text{ cm}^2$

Tragmast

Diagonale	L60x6, Anschluss mit 1 Schraube M20
	$A_{\text{net}} = (6,0 - 2,1 + 6/2) \times 0,6 = 4,17 \text{ cm}^2$

Die Bemessungsspannungen werden nach DIN EN 50341-3-4 Anhang J.4.1 wie folgt ermittelt. Für die Lastfälle LG 1 und LG2 sowie Voruntersuchungen der LG3 bis LG12 wird Stahl S235 postuliert:

$$\sigma_{R,d} = 0,9 \times f_{u,k} / \gamma_M$$

$$\sigma_{R,d} = 0,9 \times 36 \text{ kN/cm}^2 / 1,25 = 25,92 \text{ kN/cm}^2$$

Ausnutzungsgrad Stabanschluss - Normlastfall: $\eta_1 = N_d / A_{\text{net}} / 0,9 \times f_{u,k} / \gamma_M$

Ausnutzungsgrad Stabanschluss - Reallastfälle: $\eta_1 = N_k / A_{\text{net}} / 0,9 \times f_{u,k}$

Für LG13 wurden Bauteilversuche herangezogen: $\eta_1 = N / F_{\text{max, exp}}$

Ausnutzungsgrad η_2

Die Beurteilung der Ausnutzung der Spannungen im Bereich des ungestörten Querschnitts der Diagonalen erfolgt auf der Grundlage der DIN EN 50341-3-4. Bei der Spannungsermittlung wird die Brutto-Querschnittsfläche zugrunde gelegt.

Diagonalen	L60x6
	$A = 6,91 \text{ cm}^2$
Stahl: S235	$\sigma_{R,d} = f_{y,k} / \gamma_M = 24 \text{ kN/cm}^2 / 1,1 = 21,82 \text{ kN/cm}^2$

Ausnutzungsgrad Stabanschluss - Normlastfall: $\eta_2 = N_d / A / f_{y,k} / \gamma_M$

Ausnutzungsgrad Stabanschluss - Reallastfälle: $\eta_2 = N_k / A / f_{y,k}$

Für LG13 wurden Zugversuche herangezogen: $\eta_2 = N / A / R_{eH}$

Ausnutzungsgrad η_3

Als Maß für die Beurteilung einer Stabilitätsgefährdung wird die Druckkraft in Verhältnis gesetzt zur Beanspruchbarkeit nach DIN 18800-2, Abschnitt 3.2.

Zur Ermittlung der Knicklänge wurde wegen der aussteifenden Wirkung der Zugdiagonale die Diagonallänge bis zum Kreuzungspunkt betrachtet. Zusätzlich zu

zahlreichen Bildern, auf denen das Knickverhalten in der „2. Eigenform“ eindeutig erkennbar ist, (vgl. z. B. Bild 15) kann die aussteifende Wirkung der Zugdiagonale ebenso gemäß dem Kapitel 5.1.2.2. der DIN 18800-2 rechnerisch gezeigt werden, [44].

Für das Ausweichen in der Fachwerksebene ist nach dem Element (507) die Netzlänge bis zum Knotenpunkt der sich kreuzenden Stäbe anzunehmen. Die Diagonalen bestehen aus L 60 x 6, und es wird die Knickung um die schwächere Hauptachse ζ , welche mit der Fachwerksebene einen Winkel von 45° einschließt, betrachtet. Konservativ wird hier der Knicklängenbeiwert β für die Knickung senkrecht zur Fachwerksebene nach dem Element (508) ermittelt. Gemäß Tabelle 15 der Norm ergibt sich β zu

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{Z \cdot L}{N \cdot L_1}}{1 + \frac{I_1 \cdot L^3}{I \cdot L_1^3}}} \quad \text{jedoch } \beta \geq 0,5 \text{ (unverschiebliches, gelenkiges Widerlager)}$$

darin bedeuten

Z..... die Zugkraft der aussteifenden Diagonale

N..... die Diagonalendruckkraft

L und L_1 die Längen der Zug- bzw. Druckdiagonalen

I und I_1 ... die Trägheitsmomente der Zug- bzw. Druckdiagonalen

Die Längen bzw. die Trägheitsmomente der Druck- und Zugdiagonalen sind gleich und kürzen sich aus der Gleichung heraus. Ein Zahlenbeispiel für den kritischsten Stab im Versagenslastfall LG13 mit den Kräften $Z = 79,6$ kN und $N = 80,8$ kN ergibt:

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{79,6}{80,8}}{1 + 1}} = 0,36 \Rightarrow \beta = 0,5$$

Im Versagenslastfall verhalten sich die Zug- und Druckkräfte der sich kreuzenden Diagonalen in allen Wänden etwa 1:1, so dass für alle Diagonalen ein allgemeiner Nachweis des Knicklängenbeiwertes in folgender Form geführt werden kann:

$$\beta = \sqrt{\frac{1 - \frac{3}{4} \cdot \frac{1}{1}}{1 + 1}} = 0,35 \Rightarrow \beta = 0,5 \quad \text{für } \frac{Z}{N} \geq \frac{1}{1,5}$$

Danach darf bis zu einer Druckkraft, die bis zu 50 % über der zugehörigen Zugkraft liegt, mit einem β von 0,5 gerechnet werden. Dieses Kräfteverhältnis ist für die Diagonalen im Versagenslastfall, aber auch in anderen Lastfällen gegeben. Zum gleichen Ergebnis kommt man bei der Beachtung der DIN EN 50341-1-J.6.3.3. Daher wurde die Stablänge bis zum Kreuzungspunkt als Knicklänge angenommen.

Da zur Befestigung der Diagonalen 2 Niete verwendet wurden, kann durch die Berücksichtigung der Teileinspannung der Stabenden die Knicklänge bis zum Kreuzungspunkt noch weiter reduziert werden. Das Element (503) der DIN

18800-2 sieht hierfür den Faktor 0,9 vor, der eine praktische Vereinfachung der Forderung von DIN 4114, Abschnitt 6.3.1 (Vorgängernorm der DIN 18800-2) darstellt, nach welcher nicht die Netzlänge der Stäbe angesetzt werden braucht, sondern der Abstand der Anschlüsse an den Stabenden, [42]. Streng genommen gilt der genannte Faktor für das Ausweichen in der Fachwerksebene. Im vorliegenden Fall erfolgt das Knicken weder in der Fachwerksebene, noch aus dessen Ebene heraus (45° wegen der schwachen Hauptachse ζ). Wie jedoch aus Bild 14 bzw. Bild 15 hervorgeht, sind die Steifigkeitsunterschiede zwischen dem Eckstiel und der schwachen Hauptachse der Diagonalen so groß, dass hier die Teileinspannung der Druckdiagonalenenden berücksichtigt werden kann. Die plastischen Gelenke in den Anschlussbereichen der geknickten Diagonalen im Bild 15 ohne jegliche Verformung des Eckstielschenkels belegen dies. Auch in Anhang J.6.3.3 DE.1 aus DIN EN 50341-3-4 wird eine Reduktion der Knicklänge zur Berücksichtigung von Teileinspannungen von Winkelprofilen von 0,9 vorgeschlagen.

Ausnutzungsgrad Stabilität - Normlastfall: $\eta_3 = N_d / N_{Rd}$

mit $N_{Rd} = \kappa \cdot A \cdot f_{y,k} / \gamma_M$ und $\kappa = 1 / (\phi + (\phi^2 - \lambda^{*2})^{0,5})$ $\lambda^* = \lambda / \lambda_a$

Ausnutzungsgrad Stabilität - Reallastfälle: $\eta_3 = N_k / N_{Rk}$

mit $N_{Rk} = \kappa \cdot A \cdot f_{y,k}$ und κ wie oben

Ausnutzungsgrad Stabilität – Versagenslastfall: Wie Reallastfälle, jedoch unter Berücksichtigung der experimentell ermittelten Werkstoffkennwerte, vgl. Tabelle 16

6.5.4.2 Ergebnisse der Lastfalluntersuchungen

Die wesentlichen Ergebnisse der Lastfalluntersuchungen sind in der Tabelle 27 zusammengestellt. Dort sind jeweils zu LG1 bis LG13 die kritischsten Ausnutzungsgrade aus allen Bauteilen des Mastschafts für die oben vorgestellten Versagensarten mit η_1 , η_2 , η_3 angegeben. Insbesondere wurden für LG13 die kritischsten Stabkräfte in Tabelle 28 und Tabelle 29 ausgewertet.

Der Winkelabspannmast erträgt die „Winterlastfälle“ D und H2 nach der DIN EN 50341 (LG1 und LG2), wenn als Werkstoff ein heutiger S235 angenommen wird.

Der Tragmast erträgt die „Winterlastfälle“ D und K nach der DIN EN 50341 (LG1 und LG2), wenn als Werkstoff ein heutiger S235 angenommen wird. Dabei ist darauf zu achten, dass die Masten im Rahmen der Schadensfalluntersuchung mit ihren tatsächlichen Feldlängen untersucht wurden und nicht mit den Seillastlängen (Gewichtsspannweiten), so dass das Ergebnis nur auf gleich lange wie in BL1503 bzw. kürzere Spannweite übertragbar wäre.

Die als Voruntersuchung gedachten Reallastfälle führen zum Teil auf unrealistisch hohe oder derart kleine Auslastungen der Tragstrukturen, so dass die Schadenumstände nicht widerspruchsfrei erklärt werden können.

Der Versagenslastfall kann den Schaden widerspruchsfrei erklären. Hier liegen sowohl der η_1 -Wert, als auch der η_3 -Wert nur knapp über eins. Da jedoch zu ihrer Ermittlung völlig verschiedene Konzepte zugrunde gelegt werden mussten, bedarf ihrer realistischen Bewertung einer Diskussion im folgenden Kap. 6.5.5. Die Knickgefahr wurde mit Hilfe der oben unter Kap. 6.5.4 angedeuteten Ersatzstabverfahren nach DIN 18800-2 [44] abgeschätzt und enthält, trotz der Verwendung von realen Werkstoffdaten, gegenüber der Realität noch die großen Sicherheiten aus den zugrundegelegten Europäischen Knickspannungslinien. Die

Bauteilzugbeanspruchbarkeit entstammt dagegen aus Laborversuchen, die sich in die Voruntersuchungen von SAG einfügen und die Realität widerspiegeln.

6.5.5 Diskussion der Ergebnisse des Versagenslastfalls

Die Bewertung der Berechnungsergebnisse zieht neben der Betrachtung der Sprödbbruchgefahr ebenso die Möglichkeit des Stabilitätsversagens der Einzelstäbe in Erwägung. Bei der Beurteilung der Versagensursache ist nämlich von Bedeutung, ob zuerst das Ausknicken eines Druckstabs zum Versagen des dort kreuzenden Zugstabes geführt hat oder umgekehrt. Im erstgenannten Fall könnte dann die Materialalterung nicht als Primärschadensursache betrachtet werden.

Für die Stabilitätsuntersuchung wurden ausgehend von den zur Verfügung stehenden Schadensbildern mögliche Knickformen in Betracht gezogen. Folgende Überlegung ist dabei von entscheidender Bedeutung:

Wie unter Kap. 6.5.4.1 gezeigt steift die Zugdiagonale in der Regel die Druckdiagonale im Kreuzungsbereich aus und halbiert etwa deren Knicklänge. Somit gibt es im Falle, dass die Zugdiagonale nicht zuerst versagt, Knickfiguren in der „2. Eigenform“ des Stabes. Dies geht aus dem Bild 14 bzw. Bild 15 besonders deutlich hervor. Der betroffene Mast wurde nach dem Versagen demontiert und mit einem Kran vorsichtig abgelegt, somit wurden an den Diagonalen keine weiteren Beschädigungen nachträglich verursacht. Der Mast war aus modernem Baustahl, hier trat kein Sprödbbruch auf, sondern ein Stabilitätsversagen einzelner Druckdiagonalen.

Eine völlig andere Situation zeigt Bild 130. Die Druckdiagonalen sind in der „1. Eigenform“ ausgeknickt, ein Hinweis darauf, dass zum Knickzeitpunkt die aussteifende Wirkung der Zugdiagonale nicht vorhanden war, weil die Zugdiagonale vorzeitig durch Bruch versagte.

In der Tabelle 28 ist das Ergebnis des Stabilitätsnachweises für alle kritischen Stäbe aus dem LG13 aufgelistet. Der kritischster η_3 -Wert in der Tabelle 28 beträgt $\eta_3 = 1,28$. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass die für das Ersatzstabverfahren zugrunde gelegten Europäischen Knickspannungslinien sehr große Sicherheiten enthalten, so dass bei $\eta_3 = 1,28$ in Wirklichkeit noch lange kein Knicken stattfinden muss. Die Knickspannungslinien entstammen aus mehr als 1000 Großversuchen an zentrisch gedrückten Stützen, die vor ca. 35 Jahren weltweit stattfanden. Aus jeweils einer größeren Anzahl von Versuchswerten mit gleicher Schlankheit wurden Mittelwert m und Standardabweichung S ermittelt. Damit ließ sich eine $m - 2 \cdot S$ -Fraktile als Funktion von Schlankheit angeben [90]. Dieses Fraktile bedeutet, dass 97,7 % der Versuche eine höhere Knicklast haben, als mit Hilfe der Knickspannungslinie ermittelt. Mit anderen Worten, die Wahrscheinlichkeit, dass bei $\eta_3 = 1,0$ der entsprechende Stab knickt liegt bei 2,3 %. Bis hin zum Schuss Nr. 5 liegen die η_3 -Werte in der Tabelle 28 um 1,0 bzw. nur knapp darüber. Größere η_3 -Werte gehören den unteren Schüssen an.

Bild 20 zeigt M65 stehend direkt nach dem Schaden. Die ausgeknickten Diagonalen im unteren Bereich bis hin zur Schadensstelle können eindeutig als Sekundärschaden eingestuft werden, da sie systematisch ausnahmslos an ihrer kürzeren, weniger knickgefährdeten Seite ausgeknickt sind. Dies wurde mit großer Sicherheit durch die Torsion des Eckstiels nach dem Versagen im oberen Bereich verursacht, welche zusätzlich zur Normalkraft ein Biegemoment am kürzeren Ende der Stäbe einleitet.

Die Stabilität des in LG13 mit $\eta_3 = 1,28$ kritischsten Stabes wurde in [88] als Einzelstab nach Theorie II. Ordnung unter Ansatz von Ersatzimperfektionen und biegesteifen Anschlüssen nachgewiesen. Auch hierzu ist anzumerken, dass Ersatzimperfektionen nach der DIN 18800-2 [44] angesetzt wurden und diese als Normvorgaben gegenüber dem Realfall Sicherheiten enthalten müssen.

Beim Vergleich von einem η_1 -Wert mit einem η_3 -Wert zur Entscheidung, welche Versagensart wahrscheinlicher ist, wird somit ein tatsächlicher Wert der

Beanspruchbarkeit einer errechneten Größe der Beanspruchbarkeit gegenübergestellt.

6.5.6 Fazit

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass bei dem Versagenslastfall LG13 als Primärschadensursache ein Stabilitätsversagen der Druckdiagonalen im Schadensbereich extrem unwahrscheinlich und im unteren Bereich des Masts auf Grund des in Bild 20 dokumentierten Zustandes auszuschließen ist.

7 Bewertung, Schlussfolgerungen

Im Folgenden wird aus dem Vergleich der Beanspruchung mit der Beanspruchbarkeit die als erstes versagende Diagonale (Primärversagen) identifiziert und daraus auf den weiteren Versagensablauf (Kaskadeneffekt) geschlossen. Nach Kenntnis des Primärbauteils werden die Schadensbilder der Masten der BL1503 erneut ausgewertet mit dem Ziel, die Reihenfolge der Mastumbrüche ableiten zu können. Anschließend wird die Übertragbarkeit der abgeleiteten Hypothese auf andere geschädigte Freileitungen diskutiert.

7.1 Vergleich Beanspruchung – Beanspruchbarkeit

Durch Vergleich der Bruchflächenanteile konnten folgende Zuordnungen erreicht werden, vgl. Kap. 4.10:

- Schadensteil M65-04 entspricht dem Prüfstück M65-09
- Schadensteil M65-01 entspricht dem Prüfstück M65-08A

Aufgrund der Bruchformen lässt sich folgern, dass eine vergleichbare Versagensart vorlag. Da die gleichen Profile vorliegen, kann die Maximalkraft der Prüfstücke 94 kN ... 125 kN auf die Schadensteile übertragen werden, Tabelle 29.

7.2 Primärversagen

Durch die Gegenüberstellung der mit der statischen Berechnung abgeschätzten, im Versagensfall im Schadensbereich wirkenden Kräfte von ca. 113 kN ... 119 kN der Diagonalen mit den in den Bauteilversuchen ermittelten Maximalkräften 94 kN ... 125 kN kann geschlossen werden, dass der Sprödbbruch des Prüfstücks M65-04 das Primärversagen im M65 darstellt. Vermutlich unmittelbar danach versagte dann die benachbarte Diagonale M65-01 ebenfalls spröde.

Mit den oben beschriebenen Schlussfolgerungen kann geschlossen werden, dass zuerst M65 umgebrochen ist (Primärmast) und erst in Folge die Tragmasten versagt haben.

7.3 Untersuchung der Versagensreihenfolge

7.3.1 Einfluss der Windrichtung

Als Grundlage für die folgenden Betrachtungen diene die Freileitungskarte von RWE mit den eingezeichneten Schäden. Demnach traten an 5 Freileitungsabschnitten größere zusammenhängende Schäden an mehreren Masten auf. Dabei handelt es sich um Abschnitte von BL1503, BL1520, BL1525, BL1536 und BL1661. In Bild 28 sind die Lage und die Geometrie dieser Schäden skizziert. Die Skizze ist nicht maßstäblich. Abspannmasten sind einzeln, Reihen von Tragmasten hingegen nur symbolisch eingezeichnet. Die auftretenden Winkel der Freileitungsabschnitte sind auf 5 Grad genau abgetragen. Der Wind kam laut DWD-Gutachten aus 190 bis 220 Grad, also ungefähr aus Richtung Südsüdwest. Dies wurde mit einer einzigen Richtung skizziert. Aus der Betrachtung der Skizze lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Alle 5 beschädigten Freileitungsabschnitte weisen zumindest Unterabschnitte auf, die mehr oder weniger im rechten Winkel zur Windrichtung stehen. Es gibt keine Schadensabschnitte, bei denen dies nicht der Fall ist.

- Die Freileitungsabschnitte, die fast senkrecht zum Wind standen, werden von intakten Abspannmasten bzw. Winkelabspannmasten begrenzt. Dies ist 7 Mal an Enden von Schadensabschnitten der Fall und 2 Mal innerhalb der Freileitung 1536.
- An 3 Stellen werden Schadensabschnitte von intakten Tagmasten begrenzt. Dies ist genau bei denjenigen Unterabschnitten der Fall, die fast parallel zum Wind stehen (Freileitungen 1503 Nordende, 1520 Südende und 1661 Ostende, Bild 28).

7.3.2 Auswertung von Luftbildern

Mit Hilfe der Luftbilder der Freileitungen und weiteren Bildern von Masten wurde versucht, Hypothesen für die Schadensreihenfolge auf den betroffenen Freileitungen aufzustellen. Hierbei interessieren insbesondere die Schäden an langen Reihen von Masten.

- Freileitung 1503: Die Masten 65 bis 73 sind lückenlos beschädigt, Bild 29 und Bild 30. Die Luftbilder zeigen alle Masten im geknickten Zustand.
- Freileitung 1525: Die Masten 43 bis 60 sind lückenlos beschädigt. Die Masten 54 bis 57 waren zum Zeitpunkt der Luftbildnahme bereits abgeräumt, alle anderen Masten wurden vor dem Abräumen fotografiert.
- Freileitung 1536: Masten 16 bis 20 sowie 22 bis 29 sind beschädigt. Bis auf Mast 24 waren alle beschädigten Masten zum Zeitpunkt der Luftbildnahme bereits abgeräumt.

7.3.3 Beschreibung der Schäden an den Masten BL1503, M65-74

Als Voraussetzung wurde zunächst angenommen, dass eine symmetrische, hohe Belastung aller Seile durch Schneewalzen vorlag. Diese Belastung erhöht die vertikale Belastung aller Masten und erhöht die Umlenkkkräfte auf die Winkelabspannmasten.

Die Luftbilder der Masten BL1503 M65-73 zeigen, dass nur der Winkelabspannmast M65 zur Innenseite des Freileitungswinkels gekippt ist, während alle anderen Masten, also die Tragmasten 66 bis 73 in Richtung Mast 74 (also nach Süden) gekippt sind, Bild 30 und Bild 31. Diese Tragmasten sind zum Teil ohne größere Verdrehung des Mastschafts unterhalb der Traversen umgebrochen. Dies wird auch durch die vom Boden aufgenommenen Fotos dieser Masten belegt. Alle Seile befinden sich, außer bei den Masten 66, 70, 71 und 72, noch auf der ursprünglichen Seite der Masten. Zumindest bei den eben genannten 4 Masten liegen die Seile alle auf der westlichen Seite, Bild 32 und Bild 33. Mast 74 ist ein Abspannmast, der auf Grund einer Freileitungskreuzung besonders hoch ist. Dieser wurde im Bereich der Traversen beschädigt, ist aber nicht abgeknickt. Hinweise auf Seilrisse konnten auf den zur Verfügung stehenden Fotos nicht gefunden werden.

Die Oberteile der Masten 66, 70 und 71 sind vermutlich erst zur Seite, also nach Südwesten, abgekippt und haben dabei eine Drehbewegung ausgeführt, so dass manche Leiter nach dem Umbruch nicht mehr auf der ursprünglichen Seite befinden.

7.3.4 Beschreibung der Schäden an den Masten BL1525M22 und M10

Bei den neueren Masten (z.B. BL1525 M22 und M10) trat bei einzelnen druckbelasteten Diagonalen Stabilitätsversagen, nicht aber Bruch auf, Bild 14.

Nach Angaben von RWE entstanden die Schäden beim einseitigen Abschlagen der Schneewalzen, Kap. 2.2.5.2. Durch die entstandene Verdrehung des Mastoberteils konnten sich die Horizontalzüge der Seile so weit angleichen, dass das verbleibende Torsionsmoment auch vom verdrehten, teilweise ausgeknickten

Mastschaft ohne weiteres Versagen ertragen wurde, Bild 15. Die hohen Gewichtskräfte der belegten Seile sind offensichtlich trotz der Verformungen im Mastschaft ertragen worden.

Aus diesen Schäden wird deutlich, dass symmetrische Belastungen des Mastschafts offensichtlich ertragen werden, wohingegen die Ungleichheit und evtl. auch Einseitigkeit der Streckenlast durch Schneewalzen auf das Versagen der Abspannmasten einen hohen Einfluss gehabt hat.

7.3.5 Beschreibung der Schäden an den Masten BL1536

In der BL1536 befanden sich innerhalb der Schadensbereiche 2 Masten jüngerer Datums. Beide Masten konnten auf den Luftbildern identifiziert werden:

- M24, Baujahr 2000, Freileitungsplan Bild 51
 - M1058, Baujahr 2004, teilweise als M58 bezeichnet, Freileitungsplan, Bild 54
- M24 blieb – so weit auf dem Luftbild zu erkennen – weitgehend unbeschädigt, Bild 52. Die benachbarten Masten waren zum Zeitpunkt der Bildnahme schon größtenteils entfernt und durch Hilfsmasten ersetzt worden. Nur der direkt benachbarte Mast 25 stand noch, Bild 53.

Bei M1058 fehlt der gesamte obere Teil mit den Traversen. Dieser wurde vermutlich beschädigt und war zum Zeitpunkt der Bildnahme schon entfernt worden, Bild 55. Ein Luftbild des benachbarten Masts 59 lag nicht vor. Die benachbarten Masten 57, 56, ff. wurden bis auf das Fundament entfernt.

7.4 Schadenshypothesen und Übertragbarkeit auf andere BL

Der Winkel der Freileitungen zum Wind spielte offenbar eine ausschlaggebende Rolle. Innerhalb dieser Abschnitte hat sich an den Seilen vermutlich besonders viel Schnee angelagert und so besonders schwere Schneewalzen gebildet. Dies spricht unabhängig von den konkreten Schadensbildern dafür, dass alle Schäden an Masten in Abschnitten initiiert wurden, die mehr oder weniger senkrecht zum Wind standen.

7.4.1 Schadensablauf BL1503

Bei der Freileitung 1503 erscheint es unwahrscheinlich, dass einer der Tragmasten 66 bis 73 zuerst versagt haben könnte. Damit ließen sich die Kipprichtung und die Schadensbilder der restlichen Tragmasten nicht erklären.

Einzig plausibel ist im Falle von BL1503 ein Kaskadeneffekt ausgehend vom Winkelabspannmast 65, Bild 56. Dieser versagte bei einseitiger und ungleicher Zugbelastung durch Umbruch in den Leitungswinkel hinein. Die angrenzenden Tragmasten 66ff wurden daraufhin nur noch einseitig und ungleich belastet und brachen in Richtung des verbleibenden Leiterzugs, also von Mast 65 weg, zum Mast 74 hin. Die Kaskade kam am nächsten Abspannmast, also Mast 74 zum Erliegen, weil dieser offensichtlich in der Lage war, den einseitigen und ungleichen erhöhten Horizontalzug aufzunehmen.

Die nördlich an Mast 65 angrenzenden Tragmasten 64, 63 etc. konnten auf Grund der in diesem Abschnitt nicht oder nur unbedeutend vorhandenen Zusatzbelastung durch Schneewalzen dem nach Ausfall von Mast 65 entstandenen feldweise ungleichen Zug standhalten.

Durch Auswertung der Fotos der noch stehenden Masten BL1503 M65-73 wurden die plastischen Verformungen der C-Böcke untersucht. Die daraus ableitbare Versagensreihenfolge steht im Einklang mit dem postulierten Kaskadeneffekt dieser BL.

7.4.2 Übertragung auf andere BL, Zusammenfassung

Die Schadensbilder der Freileitungen BL1520, 1525, 1536 und 1661 sind mit dem vermuteten Ablauf bei Freileitung 1503 kompatibel. Die Ergebnisse zur Untersuchung der Schadensreihenfolge werden folgendermaßen zusammengefasst:

- Der „Kaskadeneffekt“ ist für die Schadensabschnitte der Freileitungen BL1503, 1520, 1661 und den östlichen Teil der Freileitung 1536 plausibel. Auslöser dieser Serienschäden ist demnach jeweils das Versagen eines Winkelabspannmasts, vgl. Bild 28 und Bild 57.
- Bei den Schadensabschnitten der Freileitungen 1525 und im westlichen Teil 1536 sind die Verhältnisse nicht so eindeutig. Möglicherweise hat hier die aufgrund des fast rechten Winkels zum Wind noch höhere Schneelast ausgereicht, Abspann- und Tragmasten zu zerstören.
- Die laufenden Kaskaden kamen - wie in 7.3.3 erläutert - in Freileitungsabschnitten, die senkrecht zum Wind standen, erst an Abspannmasten zum Stehen, Tragmasten reichten hier nicht aus. In Abschnitten annähernd parallel zum Wind reichten auch Tragmasten aus, um die laufende Kaskade zu stoppen, Bild 57.

7.5 Kombination der Schadensursachen

Als Schadensursache für Winkelabspannmasten ist nur die Kombination aus folgenden Faktoren hinreichend:

- Bei ungewöhnlich intensivem Nassschneefall kombiniert mit Starkwind entstanden an vielen Leiterseilen Schneewalzen mit Durchmessern bis zu 15 cm, die zu sehr hohen Streckenlasten und sehr hohen Seilkräften auf die Masten führten. Die Streckenlast lag mit 4 ... 5,3 kg/m deutlich über den nach DIN EN 50341:2002 für die höchste Eislastzone 3 anzusetzende Streckenlast von 2,8 kg/m für einen Leiterdurchmesser von 21,7 mm.
- Vermutlich abhängig vom Winkel zwischen der Leitungsrichtung und der Windrichtung traten diese Schneelasten feldweise ungleich auf, d.h. die Felder vor und hinter dem Mast waren ungleich stark belegt.
- Es stellten sich bei einigen Freileitungsabschnitten einseitige, d.h. rechts- und linksseitig ungleiche Schneelasten ein, vermutlich bedingt durch unterschiedlichen elektrischen Betrieb der beiden Stromkreise rechts und links.
- Die RWE-Sanierung der Masten erfolgte unter Ausnutzung des „Bestandschutzes“ nach VDE0210:1954-05. Demnach konnten einige Original-Bauteile aus Thomasstahl im Mast verbleiben.
- Einige dieser verbliebenen Thomasstahl-Diagonalen sind durch hohen Stickstoffgehalt und Reckalterung versprödet und gegen Zugkräfte deutlich geschwächt.

Nur durch das gleichzeitige Vorliegen aller genannten Faktoren kam es zum Spröbruch der Diagonalen am Anschluss an den Eckstiel und in Folge zum Umbruch der Winkelabspannmasten.

Nach der Auswertung der statischen Berechnungen für die Tragmasten kann geschlossen werden, dass diese vermutlich nur in Folge des Versagens von Winkel- und Abspannmasten umgebrochen sind.

Mit den oben beschriebenen Untersuchungsergebnissen wurde gezeigt, dass das Primärversagen in einem gemäß RWE-Sanierungskonzept sanierten Mast an einer versprödeten Diagonale aus Thomasstahl auftrat. Da die Bruchkraft der gleichen Diagonale aus nicht versprödetem Stahl deutlich höher ist, kann vermu-

tet werden, dass der Mast M65 das Wetterereignis „Münsterland 2005“ überlebt hätte, wenn alle Diagonalen gegen neue ausgetauscht worden wären. Damit hätten mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auch die Tragmasten M66 bis M73 schadensfrei überlebt, wie dies bei den baugleichen Masten derselben Freileitung M82 bis M89 der Fall ist, Bild 35.



8 Beantwortung der Fragen des Auftraggebers

8.1 Antwort 1

Die aus den besichtigten Masten entnommenen Stahl-Proben entsprechen noch heute hinsichtlich der mechanisch-technologischen Eigenschaften den damals zum Zeitpunkt der Errichtung gültigen, relevanten Werkstoffnormen.

In den Masten Bj. 1951 und 1960 sind auch nach der RWE-Sanierung Bauteile enthalten, die aus Thomasstahl gefertigt wurden. Aufgrund von stickstoffbedingter Alterung entstand eine Versprödung, die metallographisch nachgewiesen wurde. Sie hat besonders an den Anschlüssen der Diagonalen an die Eckstiele zu einer Reduktion der Belastbarkeit der Bauteile gegenüber Zugkräften geführt. In Bauteilzugversuchen wurden Minderungen gegenüber der Normbeanspruchbarkeit um bis zu 44 % festgestellt. Die Tragfähigkeit der Masten ist daher geringer als zum Zeitpunkt ihrer Errichtung. Die mit der Thomasstahlversprödung einhergehende Belastbarkeitsminderung ist in nicht trennbarer Kombination mit den außergewöhnlich hohen und vermutlich betriebsbedingt einseitigen Streckenlasten durch Schneewalzen Ursache der Beschädigungen am Mast 65 der BL1503.

8.2 Antwort 2

- Aus Mast M65 wurden Schadensteile geborgen, die makro- und mikrofraktographisch überwiegend Sprödbbruch aufweisen. Metallographisch und im Rasterelektronenmikroskop wurden Eisennitride als Merkmal der Stickstoffversprödung nachgewiesen.
- Beim Ortstermin sowie anhand der Dokumentationen und Prüfstücke wurden offensichtliche Mängel am Instandhaltungs- und Korrosionszustand nicht gefunden.
- Aufgrund des Schadensbildes an BL1503 wurde vermutet, dass der Winkelabspannmast M65 als erstes versagt hat: Primärmast.
- Anhand der Untersuchungsergebnisse konnte durch Vergleich der verbliebenen Zug-Belastbarkeit der versprödeten Diagonalen mit der abgeschätzten Zug-Belastung im Versagenslastfall (Lastgruppe LG13) im Mast BL1503 M65 eine Diagonale (Pos. 3131) in Wand 3-4 am Schussübergang 2-3 (Mastschaft unter den Traversen) als Primärversagensbauteil identifiziert werden. Als Folge traten weitere Brüche an benachbarten Diagonalen (Pos. 3130 und Pos. 3129) auf, die dann zu einem Ausknicken unterhalb des Schussübergangs 2-3 führten. Der Mast M65 konnte den Seilkräften nicht mehr widerstehen und brach in den Leitungswinkel hinein um.
- Aufgrund der dann wesentlich geringeren, an Tragmast M66 ankommenden Seilkräfte entstand dort sehr ungleicher und einseitiger Leiterzug. Nach einander brachen die Tragmasten M66 bis M73 im Kaskadeneffekt um.
- Die Übertragbarkeit dieses Versagensmechanismus auf andere Freileitungen ist ohne Widerspruch denkbar, ein Nachweis ist jedoch nicht mehr möglich.

8.3 Antwort 3

Die Konstruktionen des Winkelabspannmasts M65 und des Tragemasts M66 wurde zur Untersuchung des Schadensfalls „Münsterland 2005“ anhand der heute gültigen Normen für Freileitungsmasten überprüft.

- Gemäß den RWE-Unterlagen erfüllen die Masten die damalige Norm VDE0210:1958.
- Die Konstruktion des M65 erfüllt die hier relevanten Winterlastfälle D und H2 nach der DIN EN 50341 mit der Eislastzone 2, dabei wird von S235 und der tatsächlichen Feldlängen ausgegangen.
- Die bei der RWE-Sanierung verstärkte Konstruktion des M66 erfüllt die hier relevanten Winterlastfälle D und K mit den Eislastzonen 2 und 3 der heutigen Norm DIN EN 50341:2002; dabei wird von S235 und der tatsächlichen Feldlängen ausgegangen.
- Die in M65, M27 und M73 sowie weiteren Masten noch vorhandenen Thomasstähle sind nach heutiger Norm nicht mehr zulässig.
- Bei der Verwendung heutiger Baustähle wäre die hier ursächliche Sprödbruchgefahr vermindert; die Tragfähigkeit der Masten wäre höher und das Ausmaß der Schäden geringer.
- Die nach Eislastzonen 2 und 3 der heutigen Norm zu berücksichtigenden Belastungen sind höher als in früheren Ausgaben des Regelwerks. Gleiche Ausnutzung vorausgesetzt, ergäben sich so „robustere“ Masten mit höherer Tragfähigkeit und damit bei gleichen Einwirkungen, z. B. „Münsterland 2005“, geringere Versagenswahrscheinlichkeit und damit ein geringeres Schadensausmaß.

8.4 Antwort 4

- Bei der Auslegung der Masten BL1503 wurden die einzigen damals in VDE0210:1958 definierten Eislast- und Windzonen angesetzt. Eine Wahl bestand nicht.
- Die aus den Schneewalzen abgeschätzte Streckenlast „Münsterland 2005“ war mit ~5,3 kg/m größer als die in DIN EN 50341:2002 für die höchste Eislastzone 3 anzusetzende Streckenlast von 2,8 kg/m.

Vergleicht man die heutigen Winterlastfälle und Eislastzonen mit den Einwirkungen „Münsterland 2005“ lässt sich feststellen:

- Die im Versagenslastfall für Mast 65 aufgetretene feldweise ungleiche und einseitige Belegung der Leiterseile mit Schneewalzen führte zu größeren Torsionsmomenten auf den Mast, als dies in den heutigen und damaligen Normen durch ungleiche Zusatzlasten oder einseitigen Leiterzug vorgesehen ist.
- Aus den ausgewerteten Quellen geht hervor, dass in den letzten 50 Jahren in der BRD mindestens 780 Strommasten wegen Eislast und Wind umgebrochen sind [61]. Auch Eis- und Schneewalzen mit Streckenlasten bis zu 5,6 kg/m wurden im norddeutschen Flachland dokumentiert, [1].
- Es ist zu vermuten, dass die die Wiederkehrperiode der Witterungsbedingungen „Münsterland 2005“, „Nassschnee mit stürmischem Wind“ kürzer als 50 Jahre ist. Die Wiederkehrperiode sollte z. B. vom DWD realitätsnah ermittelt werden.

9 Empfehlungen

Abschließend werden aufbauend auf den Untersuchungsergebnissen technische Empfehlungen zur Vermeidung von zukünftigen Mastumbrüchen gegeben.

9.1 Vermeidung von feldweise ungleichen und/oder einseitigen Eis-/Schneewalzen

Da einseitige und/oder feldweise ungleiche Streckenlasten zu hohen Biege- und Torsionsmomenten des Masts führen, sollten solche Laststellungen vermieden werden. Speziell bei Nassschnee mit Starkwind sollte die Bildung von einseitigen und/oder feldweise ungleichen Schneewalzen verhindert werden. Dazu könnten die Betriebsweise, aber auch Abtau- oder Abschlagvorgänge angepasst werden.

9.2 Normung

Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse zu den Einwirkungen „Münsterland 2005“ sowie der vorliegenden Berichte früherer ähnlicher Schäden sollte die aktuelle Freileitungsnorm DIN EN 50431-1 und -3-4 weiterentwickelt werden:

- Berücksichtigung feldweise ungleicher und/oder einseitiger Schneelasten in den nachzuweisenden Lastfällen
- Eislastzonen geografisch festlegen, z. B. wie in DIN 1055
- Streckenlasten für Schnee-/Eislasten in der Norm auf die Werte erhöhen, die in der angenommenen Wiederholperiode von 50 a wirklich nur einmal auftreten
- Überprüfung der Wiederholperioden der Norm-Lastannahmen

9.3 Konstruktion, Sanierung der Masten

Aufgrund der Mitwirkung von versprödetem Thomasstahl an den Schadensursachen sollte das RWE-Sanierungskonzept der Masten hinsichtlich folgender Gesichtspunkte überprüft werden:

- Welche Norm-Ausgabe sollte als Basis der Lastannahmen für die statische Nachrechnung angewendet werden?
- Kann bei solch umfangreichem Austausch von Diagonalen und Verstärkung der Eckstiele „Bestandsschutz“ angenommen werden?
- Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse könnten Winkelabspannmasten häufiger versagen. Sie sollten daher mit höherer Priorität und mit höheren Lastannahmen als Tragmasten saniert werden.
- Die Einordnung der Eislastzone für das Schadensgebiet sollte überprüft werden. EN 50341 ordnet dem Münsterland wegen früherer Schäden mindestens Eislastzone 2 zu.

10 Zusammenfassung

Im Münsterland herrschten am 25./26. November 2005 Südsüdwestwind etwa der Stärke 8 und starker Schneefall bei einer Temperatur von etwa 0 °C. Hierbei lagerte sich Schnee an Freileitungen an. Ausgelöst durch diese Belastung versagten insgesamt 82 Hochspannungsmasten und brachen um. Infolgedessen war die Stromversorgung großflächig für mehrere Tage unterbrochen.

Die Zielsetzung der vorliegenden Untersuchung besteht darin, die Ursachen hierfür aufzuklären, die vom Auftraggeber gestellten Fragen zu beantworten sowie Hinweise zur zukünftigen Vermeidung solcher Schäden zu geben.

Der Instandhaltungszustand aller untersuchten Masten bezüglich der Korrosion war in Ordnung, und korrodierte Bereiche, die zu einer Querschnittsverminderung tragender Querschnitte hätten führen können, wurden nicht gefunden. Insofern spielte Korrosion bei dem Versagen der Masten keine Rolle.

Die Wettersituation mit Schneefall und Starkwind aus Südsüdwest führte dazu, dass sich Schnee besonders auf solchen Strecken, die senkrecht zu dieser Windrichtung verlaufen, anlagerte. Hierbei bildeten sich Schneewalzen mit einem Durchmesser von 13 cm und mehr.

Bei Richtungswechseln von Freileitungen werden verstärkte Winkelabspannmasten eingesetzt, die die erhöhten Kräfte an solchen Stellen aufnehmen. In dem betreffenden Zeitraum führte dieser Richtungswechsel dazu, dass an den senkrecht zum Wind verlaufenden Leitern Schneeanlagerungen auftraten, während bei den Leitern, die fast parallel zur Windrichtung verlaufen, solche Ablagerungen nahezu nicht stattfanden. Dieses Schema lässt sich auf nahezu allen Freileitungen, die in der fraglichen Nacht versagten, übertragen. Davon ausgehend wurde für den betroffenen Abschnitt der BL1503 detailliert untersucht, wie es zum Versagen von Masten kommen konnte.

Hierbei handelt es sich um eine 110 kV-Freileitung, auf der insgesamt 7 Leiter montiert sind. 3 Leiter bilden jeweils ein Drehstromsystem auf jeder Mastseite, während der 7. Leiter als Erdseil auf der Mastspitze verläuft. Anhand von Fotos konnte nachgewiesen werden, dass Schneewalzen der genannten Größe auf einem System, also auf der Freileitung einseitig, auftraten, während auf dem System auf der anderen Seite der Freileitung Schnee auf den Leitern nicht vorhanden war. Diese einseitigen Schneelasten könnten durch verschiedene Betriebszustände (rechtes/linkes System) verursacht worden sein, was durch die Betriebsaufzeichnungen nachvollziehbar scheint.

Für den untersuchten Winkelabspannmast M65 bedeutet dieses Szenario, dass auf der durch Schnee belasteten rechten Seite 3 Leiter extrem mit Schnee belegt und die 3 Leiter links nahezu unbelastet waren. Auf den ankommenden Leitern traten aufgrund der Windrichtung Schneebelastungen nicht oder nur in geringem Umfang auf. Diese Zusammenhänge sind anschaulich in Bild 50 dargestellt.

Bei einem Vorort-Termin wurden u. a. gebrochene Diagonalen aus diesem Winkelabspannmast entnommen. Eine Analyse der Bruchflächen zeigte, dass die betreffenden Diagonalen spröde versagten. Weitere Untersuchungen zeigten, dass es sich bei diesen Diagonalen um solche aus Thomas-Stahl handelte und dass sie aus dem unsanierten Teil des Masts stammten.

Anhand der mittels Finite-Elemente-Berechnungen durchgeführten Statik des gesamten Abspannmasts, die die o. g. Belastungen zur Grundlage hatten, wurde nachgewiesen, dass die größten Kräfte im sanierten Teil des Masts auftraten, wo gebrochene Diagonalen nicht gefunden wurden. Aus der Statik wurden ebenfalls die Kräfte in den gebrochenen Diagonalen ermittelt.

Abschließend war nun die Frage zu klären, wie groß die Kräfte wirklich waren, die die gebrochenen Diagonalen ertragen konnten. Hierzu wurden aus dem entsprechenden Mast erneut Diagonalen entnommen und in der BAM mittels Bau-

teilstützversuche geprüft. Diese Ergebnisse fügen sich nahtlos in eine Auswahl umfangreicherer SAG-Ergebnisse ein. Es stellte sich heraus, dass die experimentell ermittelten Zugkräfte bei sprödem Versagen unter den laut Statik auftretenden Werten lagen und dass auch die nach Norm erforderlichen Zugkräfte nicht erreicht wurden.

Die Ursache hierfür ist in der Versprödung des Werkstoffs durch Stickstoff zu finden, der in den Stahl durch das Thomas-Verfahren während der Produktion eingebracht wurde.

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wäre dieser Lastfall ertragen worden, wenn im Winkelabspannmast 65 alle Diagonalen aus Thomasstahl ausgetauscht gewesen wären.

Aufgrund des Versagens einer Diagonale versagten in dem Mast mindestens 2 weitere Diagonalen und in der Folge brach der Winkelabspannmast um. Als Kaskadeneffekt knickten im weiteren Verlauf 8 Tragmasten bedingt durch den Zug auf den Leitern um. Dieses Szenario ist auch widerspruchsfrei auf andere, umgebrochene Freileitungsabschnitte mit ähnlichen Winkeln zum Wind und einseitigem Schneeansatz übertragbar.

Insofern ist das Versagen des untersuchten Abschnittes der Freileitung auf die besondere Kombination aus Wetterlage, Winkel der Freileitung zur Windrichtung, das Verbleiben der seit Errichtung vorhandenen Diagonalen aus Thomasstahl infolge des Bestandschutzes, der Versprödung des Thomasstahls sowie die einseitige Bildung von Schneewalzen vermutlich durch den Betrieb der Freileitungen zurückzuführen.

11 Quellen

11.1 Literatur

- [1] Pohlmann, H.: Dissertation: Schadensanalyse, Resttragfähigkeit und Sanierungskonzepte von Hochspannungs-Feileitungsmasten, Universität-Gesamthochschule Essen (1996)
- [2] Krüger, A.: Windgefrischte Stähle, VDI-Zeitung 99 (1957) 32, S. 1604-1610
- [3] Gemeinfassliche Darstellung des Eisenhüttenwesens, 17. Auflage, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 1971
- [4] Hauttmann, H.: Die Eigenschaften der gewöhnlichen Thomasstähle und ihre Verbesserung durch die Beruhigung mit Silizium und Aluminium, Mitt. Forsch. Anst. GHH-Konzern 10 (1943) 1, S. 1-10
- [5] Daeves, K. und A. Ristow: Vergleich der Verwendbarkeit von Thomas- und Siemens-Martin-Stählen, VDEh Vertraulicher Bericht Nr. 9, Okt. 1940
- [6] Dick, W.: Die Thomasstähle, Härtereitechnische Mitteilungen 2 (1943), S. 100-109
- [7] Köster, W.: Zur Frage des Stickstoffs im technischen Eisen, I. Über den Einfluß des Stickstoffs auf die Eigenschaften des technischen Eisens, insbesondere über seine Beziehung zur magnetischen Alterung, II. Das Wesen der Kraftwirkungsfiguren, Archiv für das Eisenhüttenwesen 3 (1930) Heft 10, S. 637-658
- [8] Wilhelm, H. und J. Reschka: Beitrag zur Frage der Ausscheidungshärtung weicher unlegierter Stähle, Archiv für das Eisenhüttenwesen 13 (1939) 6, S. 273-275
- [9] Althof, F.-C., Endter, H., Krüger, G., Lüdemann, K.-F. und R. Postl: Zur Frage des Einsatzes beruhigten und unberuhigten Stahles, des Sprödbrechens und der Schmelzschweißbarkeit von Stählen, Die Technik 10 (1955) 10, S. 589-604
- [10] Wiester, H.-J., Bading, W., Riedel, H. und W. Scholz: Einfluss der Stickstoffabbildung durch Aluminium auf die Eigenschaften von Baustählen, Stahl und Eisen 77 (1957) 12, S. 773-784
- [11] Schönrock, K.: Richtlinien für die Verwendungsbereiche von Thomas- und Siemens-Martin-Stahl im Stahlbau, VDEh Vertraulicher Bericht Nr. 11, Dez. 1940
- [12] Daeves, K. und H. Hauttmann: Richtlinien für die Verwendung unlegierter Stähle verschiedener Herstellungsverfahren, VDEh Vertraulicher Bericht Nr. 44, Apr. 1943
- [13] Heller, W. und E. Stolte: Stand der Kenntnisse über die Alterung von Stählen, Teil II. Auswirkung der Alterung bei Stählen, Stahl und Eisen 90 (1970) Nr. 17, S. 909-916

- [14] Werkstoffkunde Stahl, Band 1: Grundlagen, Herausgeber: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Springer Verlag, 1984
- [15] Stolte, E. und W. Heller: Stand der Kenntnisse über die Alterung von Stählen, Teil I. Grundlagen, Stahl und Eisen 90 (1970) Nr. 16, S. 861-868
- [16] Köster, W.: Zur Frage des Stickstoffs im technischen Eisen, III. Die Ausscheidung von Stickstoff und Kohlenstoff aus dem α -Eisen als Beispiel des Zerfalls einer doppelt übersättigten festen Lösung, Archiv für das Eisenhüttenwesen 4 (1931) Heft 3, S. 145-150
- [17] Dahl, W. und E. Lenz: Einfluss des Mangangehaltes auf die Abschreck- und Reckalterung von Kohlenstoff und/oder Stickstoff: Archiv für das Eisenhüttenwesen 46 (1975) 2, S. 119-125
- [18] Baehre, R. und R. Käßlein: Zeitabhängige Änderung von Werkstoffeigenschaften bei alten Baustählen, SFB 315 Universität Karlsruhe, Werkstoffeigenschaften alter Baustähle, 1992
- [19] Technologie der Wärmebehandlung von Stahl, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, 1987
- [20] Krzyminski, H.: Aushärtungsvorgänge in der Diffusionszone nitrierter unlegierter Stähle, Härterei-Technische Mitteilungen 23 (1968) Heft 3, S. 198-207
- [21] Werkstoffwissenschaft, Herausgeber: W. Schatt und H. Worch, Wiley-VCH Verlag, 9. Auflage, 2003
- [22] Daeves, K.: Die mechanischen Eigenschaften von Thomas- und Siemens-Martin-Stählen, Stahl und Eisen 50 (1930) 39, S. 1353-1356
- [23] Gilde, W.: Der Stickstoff im Thomasstahl, Chemische Technik 1 (1949) 6, S. 183-185
- [24] Felix, W.: Untersuchung der natürlichen und künstlichen Alterung von allgemeinen Baustählen, Archiv für das Eisenhüttenwesen 36 (1965) Nr. 1, S. 35-40
- [25] Kenyon, R.I. und R.S. Burns: Alterung von Eisen und Stahl, Stahl und Eisen 60 (1940) 30, S. 663-664
- [26] Knüppel, H. und K. Mayer: Zusammenhang zwischen chemischer Zusammensetzung und Alterungs-Kerbschlagzähigkeit unberuhigter Stähle, Stahl und Eisen 73 (1953) 7, S. 401-410
- [27] Dick, W.: Ergebnisse und Folgerungen aus vergleichenden Prüfungen von Blechen aus allgemeinen Baustählen auf Spröbruchneigung, Stahl und Eisen 80 (1960) 22, S. 1588-1602
- [28] Kornfeld, H.: Die Abhängigkeit des Steilabfalls der Alterungs-Kerbschlagzähigkeit von der chemischen Zusammensetzung bei unberuhigten Stählen, Archiv für das Eisenhüttenwesen 24 (1953) 11/12, S. 469-474

- [29] Aurich, D. und E. Martin: Abhängigkeit der Streckgrenze und der Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit von der Abschreckalterung von Baustählen im Vergleich mit der Theorie des Sprödbruchs, Archiv für das Eisenhüttenwesen 40 (1969) 11, S. 875-880
- [30] Lüddecke, F.: Ein Beitrag zur Ertüchtigung bestehender Stahltragwerke unter Berücksichtigung des Fügeverfahrens Schweißen, Dr.-Ing. Dissertation, demnächst
- [31] Altmeyer, G. und H. Fariwar-Mohseni: Einfluss der Kaltverformungsart und der natürlichen und künstlichen Alterung auf die Verschiebung der Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit allgemeiner Baustähle, Archiv für das Eisenhüttenwesen 39 (1968) 12, S. 929-934
- [32] Straßburger, C.: Einfluss der Art der Kaltverformung auf die künstliche Alterung bei der Kerbschlagzähigkeitsprüfung allgemeiner Baustähle, Der Stahlbau (1968) 1, S. 25-26
- [33] Schenck, H. und E. Schmidtman: Der Einfluss von Seigerungen, Kaltverformung und Alterungsbehandlung auf die Kerbschlagzähigkeit unberuhigter weicher Baustähle, Stahl und Eisen 77 (1957) 12, S. 784-791
- [34] Helms, R., Kühn, H.-D. und E. Martin: Sprödbruchsicherheit von Stahlbauteilen mit gestanzten Löchern, Archiv des Eisenhüttenwesens 44 (1973) 12, S. 917-926
- [35] Naumann, F. K.: Die Versprödung der Kanten beim Scherenschnitt von Grobblechen aus Thomas- und Siemens-Martin-Stahl, Teil I: Betriebsversuche, Stahl und Eisen 81 (1961) 21, S. 1404-1409
- [36] Naumann, F. K.: Die Versprödung der Kanten beim Scherenschnitt von Grobblechen aus Thomas- und Siemens-Martin-Stahl, Teil II: Laboratoriumsversuche, Stahl und Eisen 81 (1961) 22, S. 1464-1472
- [37] Ausscheidungsatlas der Stähle, S. 49 ff., Verlag Stahleisen, 1983
- [38] Malinov, S., Böttger, A.J., Mittenmeijer, E.J. Pekelharing, M.I., Somers M.A.J., Phase transformations an phase equilibria in the Fe-N system at temperatures below 573 K, Metall. Mater. Trans. A, 32 (2001) 59-73
- [39] Van Voorthuysen, E.H., Chechenin, N.C., Boerma, D.O., Low-temperature extension of the Lehrer diagram an dthe iron-nitrogen phase diagram, Metall. Mater. Trans. A, 33 (2002) 2593-2598
- [40] H. Schumann: Metallographie, S. 319 ff., VEB Verlag Leipzig, 1962
- [41] Mang, Friedrich; Bucak, Ömer; Tauglichkeit und Lebensdauer von bestehenden Stahlbauwerken. Stahlbau Handbuch. Köln. 1996.
- [42] Lindner, J., Scheer, J., Schmidt, H., Beuth-Kommentare; Stahlbauten, Erläuterungen zur DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Beuth-Verlag, Ernst&Sohn. 1994
- [43] Neuenhaus, D. und U. Kaintzyk: Praktische Bemessung von Stahlgittermasten für Freileitungen nach EN 50341.- Stahlbau 73 (2004) Heft 1 53-58.

11.2 Regelwerke

- [44] DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4. Beuth-Verlag, Ernst&Sohn. 1990
- [45] VDE 0210:1930 - Vorschriften für den Bau von Starkstrom-Freileitungen, 1930
- [46] VDE 0210:1958-02 - Vorschriften für den Bau von Starkstrom-Freileitungen, Feb. 1958
- [47] VDE 0210:1969-05 - Bestimmungen für den Bau von Freileitungen über 1 kV, Mai 1969
- [48] DIN VDE 0210:1985-12 Bestimmungen für den Bau von Starkstrom-Freileitungen... Dezember 1985.
- [49] DIN 1612, Formstahl, Stabstahl, Breitflachstahl. Flusstahl gewalzt, Januar 1932
- [50] DIN 17100, Allgemeine Baustähle. Gütevorschriften, Oktober 1957
- [51] DIN 17100, Allgemeine Baustähle, Gütenorm, Sep. 1966
- [52] DIN 17100, Allgemeine Baustähle, Gütenorm, Jan. 1980
- [53] DIN EN 50341-1: Freileitungen über AC 45 kV. - Teil 1 Allgemeine Anforderungen – Gemeinsame Festlegungen.- Klassifikation VDE 0210 Teil 1.- März 2002
- [54] DIN EN 60652 (VDE 0210 Teil 15): Belastungsprüfungen an Freileitungstragwerken.-Juni 2004
- [55] DIN EN 50341-3-4: Freileitungen über AC 45 kV. - Teil 3 Nationale Normative Festlegungen (NNA).- Klassifikation VDE 0210 Teil 3.- März 2002
- [56] DIN 1055-5:2005-07 Einwirkungen auf Tragwerke Teil 5: Schnee- und Eislasten
- [57] DIN ENV 1993-1:1993-04, Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1: Allgemeine Bemessungsregel, Bemessungsregeln für den Hochbau.

11.3 Voruntersuchungen, Versuchsberichte

- [58] DWD: Amtliches Gutachten über die Witterungsverhältnisse sowie die Schnee- und Eisablagerungsbedingungen vom 25. bis 28.11.2005 im Raum Münsterland (Nordrhein-Westfalen), Gz.: 013/06. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung, Potsdam, 24. Januar 2006
- [59] Deutschländer, T.: Abschätzung der Dichte einer Schneewalze mit Eisummantelung. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima- und Umweltberatung, Potsdam, e-mail vom 19. Januar 2006
- [60] Zellner, R.: Schneelasten auf Stromleitungen im Münsterland im Zeitraum 25. – 26.11.2005. Begutachtung aus physikalisch-chemischer Sicht. Institut für Physikalische und theoretische Chemie, Universität Duisburg-Essen, Essen, 18.01.2006

- [61] Ruhnau, J.: Stellungnahme zur Eislastgefährdung von Hochspannungsmasten.- Schreiben an Bundesminister für Wirtschaft, BNetzA, BMI, 2005-12-18
- [62] Kießling, F.: Maßnahmen an Masten mit Stäben aus spröden Stählen.- RWE Net AG, Nov. 2001
- [63] Kießling, F.: Stellungnahme zur Anwendung neuerer Fassungen der Norm für Hochspannungsfreileitungen auf bestehende Leitungen.- im Auftrag der RWE WVE Netzservice , 2006-01-19
- [64] RWE:
- [65] RWE:
- [66] RWE:
- [67] RWE:
- [68] Prof. Thierauf:
- [69] Pohlmann, H.: Ursachen und Grundlagen der Spröbruchneigung von Maststahl, TESSAG Versuchs- und Technologiezentrum, Vortrag, (2000-12-01)
- [70] Thierauf, G., Ebenau, C.: Gutachten Nr. A8232 / 05 zur Ermittlung der Schadensursache der am 25./26.11.2005 im westlichen Münsterland geschädigten Stahlgittermasten des Hoch- und Mittelspannungsnetzes (2006-02-13)
- [71] Kießling, F.: Maßnahmen an Masten mit Stäben aus spröden Stählen, RWE Net AG (2001-11-06)
- [72] Untersuchung an Diagonalstäben von Stahlgittermasten der 220/380-kV-Leitung
- [73] Untersuchungen an Diagonalstäben und Eckstielen der 220/380-kV-Leitung
- [74] Untersuchungen an ausgebauten Diagonalstäben der Baujahre 1958 bis 1963,
- [75] Kubanek, C.: Versuchsbericht Nr. 98 028: Untersuchung von gestanzten oder gebohrten Schraubenlöchern in Gittermasten, Starkstrom-Anlagen Gesellschaft mit beschränkter Haftung (1998-04/05)
- [76] Untersuchungen zur Bruchkraftminderung an Stickstoff-versprödeten Diagonalstäben aus der 220/380 kV-Leitung

- [77] Zugversuche an stickstoffversprödeten Diagonalenstäben aus BD3-Masten
- [78] Zugversuche an stickstoffversprödeten Diagonalenstäben aus Masten
- [79] Studie über Stickstoffversprödung von Stahlprofilen.- Technische Dokumentation
- [80] Zertifizierung der Vorgehensweise zur Sanierung bestehender Hochspannungsfreileitungsmasten „Projekt Maststahl“,
- [81] Nicolas, K.: Versuchsbericht Nr. 2006-013 B: Zugversuche an Tragrahmen aus dem Münsterland, SAG Versuchs- und Technologiezentrum (2006-01-12)
- [82] Chemische Analysen und Zugversuche an Diagonalen
- [83] Löpenhaus, R.: Seilkurvenberechnung RWE WVE-NS, ERNN-H-LT mit PCSPIDI V2.2 vom 2006-02-24
- [84] Löpenhaus, R.: Seilkurvenberechnung RWE WVE-NS, ERNN-H-LT WIN263, Version 1.64 der Fa. LTB vom 2006-03-08
- [85] Schreiben RWE an BAM zur Beantwortung der Fragen der BAM.- 2006-02-01
- [86] Untersuchungen von Strommasten,
- [87] Gutachten 1994
- [88] K LW Statik vom 10.04.2006
- [89] ursprüngliche Typenstatik, A13V_WA_120-140.pdf
- [90] Petersen, Ch.: Stahlbau, Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig/ Wiesbaden. 1988

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)**12200 Berlin****2006-04-11****(Unterschriften)**

Wir versichern, dass das Gutachten nach bestem Wissen und Gewissen, unparteiisch und frei von Ergebnisweisungen angefertigt worden ist. Die BAM behält sich nachträgliche Änderungen, Ergänzungen und ggf. Widerruf des Gutachtens aus wichtigem Anlass (z. B. wegen wesentlicher, neuer Erkenntnisse) vor.

**BAM**

**Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung**

D-12200 Berlin
Telefon: 030/8104-0
Telefax: 030/8112029

Dieses Dokument darf nur in
vollem Wortlaut und ohne
Zusätze veröffentlicht
werden. Für die veränderte
Wiedergabe und Auszüge
ist vorher die widerrufliche
schriftliche Einwilligung der
BAM einzuholen

Schadensanalyse an im Münsterland umgebrochenen Strommasten

Aktenzeichen: BAM-V.3/442

**Ausfertigung: Elektronische Version von Ausfertigung 1 von 3 vom
2006-04-11, rechtsverbindlich ist ausschließlich die gesie-
gelte Papier-Version**

Tabellen- und Bildteil

GUTACHTEN

12 Tabellen

Tabelle 1: Betroffene BL und Angabe des Baujahres des möglichen Primärmasts

Bauleitnummer		Baujahr Primär-Mast WA
BL1536	Gronau - Metelen	1951
BL1520	Hervest - Dorsten - Stadtlohn	1950
BL1661	Alstätte - Vreden	1984
BL1503	Gronau - Coesfeld	1960
BL1525	Metelen - Roxel	1991

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Anzahl der geschädigten Masten

umgestürzte Masten	
"alt" 1929 - 1960	"neu" 1961 - 2006
55 Stück	29 Stück
65% von 84	35% von 84

Tabelle 3: Besichtigte Masten und entnommene Prüfstücke

BL-Nr.	Mast/Baujahr	Zustand	Prüfstücke-Nr.
1503	65/1960	liegend	01, 02, 02A, 02B, 03, 04
1503	66/1960	liegend	keine
1503	68/1960	stehend	keine
1503	69/1960	stehend	keine
1503	73/1960	liegend	10, 11, 12, 13, 14
1536	27/1951	liegend	20, 21
1536	26/1951	stark beschädigt	keine
1536	22/1951	Schrotthaufen	keine
1525	22/1990	liegend	30, 31
1525	10/1990	verformt	keine
?	„Nünning“	nicht relevant	gekennzeichnet aber nicht entnommen

Tabelle 4: Stickstoffgehalt verschiedener Stahlsorten [7][8][9]

Stahlbezeichnung	Stickstoffgehalt in %
Schweißstahl	0,003 – 0,005
Siemens-Martin-Stahl	0,001 – 0,008
Thomasstahl	0,010 – 0,030
Tiegelstahl	0,001 – 0,008
Elektrostahl	0,008 – 0,016

Tabelle 5: Großstörungen durch Eislasten im Hochspannungsnetz der alten Bundesrepublik [61]

Datum des Störungsbeginns	Störungsgebiet	Beschädigte oder umgebrochene Hochspannungsmasten
28./29.10.1956	Ostbayern, Inngebiet	69 Masten
07./08.12.1967	Ems-/Wesergebiet	127 Masten
29./30.03.1979	Ostbayern	42 Masten
24.04.1980	Ostbayern, Oberschwaben	150 Masten
02.03.1987	Südniedersachsen, Ostwestfalen, Oberschwaben	76 Masten
30.11./03.12.1988	Ostwestfalen	24 Masten
12./13.04.1994	Alpenvorland in Bayern u. Schwaben	172 Masten
25.26./11.2005	Münsterland	83 Masten

Tabelle 6: Angaben zu zulässigen Werkstoffen für Stahlgittermasten in Regelwerken für den Freileitungsbau

Norm	Zulässige Werkstoffe für Stahlgittermasten
VDE 0210:1930 [45]	Flussstahl, St 37/12, Normalgüte
VDE 0210:1958-02 [46]	St 37.12 (nach DIN 1612), St 52
VDE 0210:1969-05 [47]	St 37, St 52
DIN VDE 0210:1985-12 [48]	St 37-2 und St 52-3 nach DIN 17100
DIN EN 50341-1:2002-03 [53]	i.A. muss EN 10025 erfüllt werden
DIN EN 50341-3-4:2002-03 [55]	S235J0, S235J2G3/G4, S355J0 und S355J2G3/G4 nach DIN EN 10025

Tabelle 7: Übersicht der untersuchten Prüfstücke

BL Nr.	Mast Nr.	Baujahr	Bauteil ¹⁾	Prüfstück V.3/442-	Prüfstückbezeichnung	Halbzeugabmaße in mm
1503	65	1960	E / B / S	02A	M65-02A-02	130 x 130 x 12
			E / B / N	02B	M65-02B-02	130 x 130 x 12
			D / B /	04	M65-04-01	60 x 60 x 6
					M65-04-02	
			Mastschaftbereich der unteren Traverse		Bauteile Ax, Bx	Eckstiel 120x120x12
			Mastschaft unterhalb der unteren Traverse		Bauteile M65-01 bis -09	Diagonale 60x60x6
		D / B	Position 9	M65-F, M65-G	60x60x6	
1525	22	1991	E / B / S	30	M22-30	120 x 120 x 8
			D / B / S	31	M22-31	50 x 50 x 5
1503	73	1960	D / Z / S	13	M73-13-01	60 x 60 x 6
					M73-13 R	
			E / B / S	14	M73 14	75 x 75 x 7
1536	27	1951	E / B / N	21	M27-21	100 x 100 x 10

¹⁾ E=Eckstiel D=Diagonale / Z=verzinkt B=Bleimennige / N=vernietet S=verschraubt

²⁾ Kennbuchstabe der entnommenen Proben

Tabelle 8: Übersicht der im Baujahr der Masten und der heute gültigen Normen und Regelwerke

Baujahr	Mast 27	Mast 65, Mast 73	Mast 22	heute aktuell
Regelwerk für den Freileitungsbau	1951	1960	1991	
Halbzeug-Werkstoffnorm	VDE 0210:1930	VDE 0210:1958	VDE 0210:1985	DIN EN 50431-3:2002
Prüfnorm zum Zugversuch	DIN 1612:1943	DIN 17100:1957	DIN 17100:1980	DIN EN 10025:2005-04
	DIN 1605-2:1936	DIN 50146:1951	DIN 50145:1975	DIN EN 10002-1:2001
	DIN 50144:1944 DIN 50146:1951		DIN EN 10002-1:1991	
Probenformen zum Zugversuch	DIN 50125:1940 DIN 50125:1951	DIN 50125:1951	DIN 50125:1986 DIN 50125:1991	DIN 50125:2004
Prüfnorm zum Kerbschlagbiegeversuch	DIN 50115	DIN 50115:1952	DIN 50115:1975 DIN 50115:1991 DIN EN 10045-1:1991	DIN EN 10045-1:1991

Tabelle 9: Ergebnisse der Zugversuche und Normenvorgaben

Mast, Baujahr	Ergebnisse		Werkstoffnorm, Normwerte
	Eckstiel	Eckstiel	
Mast 65 Bj 1960	Entnahmeort Probe	A1	17 Proben aus 16 Diagonalen
	R _{eH} in MPa	276	331 (285...376) ¹⁾
	R _m in MPa	399	422 (389...456) ¹⁾
	A in %	35	38 (29...45) ¹⁾
	Bewertung	St 37	St 37 (St 42)
Mast 22 Bj 1991	Entnahmeort Probe	Eckstiel	Diagonale
	R _{eH} in MPa	B6	B21
	R _m in MPa	418	279
	A in %	571	384
	Bewertung	St 52	St 37
Mast 73 Bj 1960	Entnahmeort Probe	Eckstiel	Diagonale
	R _{eH} in MPa	C21	C25
	R _m in MPa	339	409
	A in %	453	573
	Bewertung	St 42	St 52
Mast 27 B. 1951	Entnahmeort Probe	Eckstiel	Diagonale
	R _{eH} in MPa	D9	D10
	R _m in MPa	279	264
	A in %	373	372
	Bewertung	St 37	St 37
heute	Entnahmeort Probe	Eckstiel	Diagonale
	R _{eH} in MPa	D9	D10
	R _m in MPa	279	264
	A in %	373	372
	Bewertung	St 37	St 37

¹⁾ Angabe Mittelwert (Minimum...Maximum) aus Tabelle 16

Tabelle 10: Bewertung der Ergebnisse der Zugversuche

Baujahr	Mast 65 1960		Mast 22 1991		Mast 73 1960		Mast 27 1951	
	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	
Entnahme Eckstiel/Diagonale								
Regelwerk für Gittermasten zum Zeitpunkt der Errichtung für die Verwendung im Freileitungsbau zugelassene entsprechende Werkstoffnorm Stahlsorte, ermittelt aus den Werten in Tabelle 9	VDE 0210:1958		VDE 0210:1985		VDE 0210:1958		VDE 0210:1930	
	St 37.12	St 37.12	St 37-2	St 37-2	St 37.12	St 37.12	St 37.12	St 37.12
	St 52	St 52	St 52-3	St 52-3	St 52	St 52		
	DIN 17100:1957 DIN 1612:1943		DIN 17100:1980		DIN 17100:1957		DIN 17100:1957 DIN 1612:1943	
	St 37.12	St 37.12	St 52-3	St 37-2	(St 42 als) St 37.12	St 52-3	St 37.12	
Einsortierung in die aktuelle Werkstoffnorm DIN EN 10025-2:2005	S235		S355		(S275) S235		S355	
	S235		S235		S235		S235	

Tabelle 11: Ergebnisse der Kerbschlagbiegeversuche und Bewertung hinsichtlich der Normenforderungen

	Mast Baujahr	Mast 65 1960		Mast 22 1991		Mast 73 1960		Mast 27 1951
		Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel
Messwerte	Probenform	ISO-V-10	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5	DVM-5 ³⁾ ISO-V-5	ISO-V-5
	20°C	13, 13, 16, 17 15	39, 50, 52 47	-	51, 53, 56 53	67, 70, 71 69		30, 36, 51, 66 46
	0°C	-	7, 18, 37 21	38, 39, 40 39	46, 49, 51 49	56, 70, 72 66	56, 59, 61 59 ³⁾ 54, 59, 60 58	9, 7, 8, 19 11
	-20°C	-	5, 6 6	30, 36, 30 32	-		39, 41, 42 41	5, 6, 7 6
Bewertung hinsichtlich der gültigen Normen bei Erreichen	Werkstoffsorte nach Tabelle 10	St 37.12	St 37.12	St 52-3	St 37-2	(St 42 als) St 37.12	St 52-3	St 37.12
	entsprechende Werkstoffnorm	DIN 17100:1957 DIN 1612:1943		DIN 17100:1980		DIN 17100:1957		DIN 1612:1943
	Probenform	Keine Vorgaben	Keine Vorgaben	ISO-V-5	ISO-V-5	Keine Vorgaben	DVM-5	Keine Vorgaben
	Prüftemperatur Kriterium der Normen ¹⁾			-20°C 13,5 J	22°C 13,5 J		0°C 7 kgm/cm ² ²⁾	
Bewertung hinsichtlich aktueller Normen	Normerfüllung	-	-	ja	ja	-	ja	-
	Werkstoff nach DIN EN 10025-2	S235	S235	S355	S235	(S275) S235	S355	S235
	Probenform	ISO-V-10	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5	ISO-V-5
	Kriterium der Norm ¹⁾	27 J	13,5 J	13,5 J	13,5 J	13,5 J	13,5 J	13,5 J
Men	Normerfüllung bei 20°C als SxxxJR	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Normerfüllung bei 0°C als SxxxJ0	-	nein	ja	ja	ja	ja	nein
	Normerfüllung bei -20°C als SxxxJ2	-	nein	ja	-	-	ja	nein

¹⁾ Das Kriterium von 27 J wird auf den Querschnitt bzw. Probenbreite bezogen, d.h. bei B = 5 mm wird der Grenzwert zu 13,5 J berechnet.²⁾ Eine Kerbschlagzähigkeit von 7 kgm/cm² entspricht einer Kerbschlagarbeit von 24 J bei DVM-Proben mit einer Dicke von 5 mm.³⁾ kursive Werte: DVM-5-Proben

Tabelle 12: Ergebnisse der chemischen Analyse und Zuordnung zur Erschmelzungsart „Thomasstahl“

Baujahr	Mast 65 1960		Mast 22 1991		Mast 73 1960		Mast 27 1951
Entnahme	Eckstiel	Mittelwerte aus 12 Diagonalen ¹⁾	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel
Ergebnisse der chemischen Analyse (Massenanteile in %)							
Kohlenstoff	C	0,1690	0,073	0,1990	0,1440	0,0900	0,1780
Silizium	Si	< 0,006	< 0,006	0,2980	0,0080	0,0770	0,4990
Mangan	Mn	0,3680	0,428	1,2140	0,4140	0,6800	1,3520
Phosphor	P	0,0338	0,0698 (0,0395..0,1044)	0,0271	0,0062	0,0621	0,0135
Schwefel	S	0,0267	0,0320	0,0204	0,0504	0,0264	0,0094
Stickstoff	N	0,0120	0,0116 (0,073..0,0168)	0,0060	0,0043	0,0089	0,0045
Aluminium	Al	< 0,003	0,024	0,0114	0,0058	<0,0030	0,0296
Chrom	Cr	0,0210	0,022	0,1650	0,0660	0,0310	0,0700
Molybdän	Mo	< 0,003	0,004	0,0250	0,0150	0,0030	0,0290
Nickel	Ni	0,0310	0,037	0,1420	0,0640	0,0300	0,0280
Kupfer	Cu	0,0330	0,043	0,4140	0,1480	0,0650	0,1220
Zinn	Sn	0,0024		0,0261	0,0112	0,0071	0,0096
0,01 bis 0,03% N ⁽¹⁾	ja	ja	ja	nein	nein	nein/rel. hoch	nein
0,04 bis 0,10 % P ⁽¹⁾	nein/rel. hoch	ja	ja	nein	nein	ja	nein
Thomasstahl [40]	ja	ja	ja	nein	nein	ja	nein

¹⁾ Mittelwerte aus 12 Diagonalen in Tabelle 15 mit Ausnahme Probe C1 (im Zuge der RWE-Sanierung eingebaute Diagonale)

Tabelle 13: Beurteilung der Desoxidationsart unberuhigt oder beruhigt vergossen

Baujahr	Mast 65 1960		Mast 22 1991		Mast 73 1960		Mast 27 1951
Entnahme	Eckstiel	Mittelwerte aus 12 Diagonalen ¹⁾	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel
Ergebnisse der chemischen Analyse (Massenanteile in %)							
Silizium	< 0,006	< 0,006	0,2980	0,0080	0,0770	0,4990	<0.006
Mangan	0,3680	0,428	1,2140	0,4140	0,6800	1,3520	0,3420
Schwefel	0,0267	0,0320	0,0204	0,0504	0,0264	0,0094	0,0704
Aluminium	< 0,003	0,024	0,0114	0,0058	<0.0030	0,0296	<0.0030
Beurteilung der Erschmelzungsart							
Baumann	unberuhigt	unberuhigt	beruhigt	beruhigt	beruhigt	beruhigt	unberuhigt
Gehalt 0,02..0,2 % Si	nein	nein	ja	nein	nein	ja	nein
Gehalt > 0,5 % Mn	nein	nein	ja	nein	ja	ja	nein
Gehalt > 0,04 % S	nein	nein	nein	Ja	nein	nein	ja
Gehalt > 0,02 % Al	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein
chemische Analyse	unberuhigt	unberuhigt	beruhigt	unberuhigt	beruhigt	dopp. beruhigt	unberuhigt

¹⁾ Mittelwerte aus 12 Diagonalen in Tabelle 15 mit Ausnahme Probe C1 (im Zuge der RWE-Sanierung eingebaute Diagonale)

Tabelle 14: Zusammenfassung der Bewertung der untersuchten Werkstoffe

	Mast Baujahr	Mast 65 1960		Mast 22 1991		Mast 73 1960		Mast 27 1951
		Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	Eckstiel	Diagonale	
1	Stahlsorte aus Tabelle 9	St 37.12	St 37.12	St 52-3	St 37-2	(St 42 als) St 37.12	St 52-3	St 37.12
2	Thomasstahl ja/nein aus Tabelle 12	ja	ja	nein	nein	ja	nein	ja
3	Erschmelzungsart aus Tabelle 13	unberuhigt	unberuhigt	beruhigt	beruhigt	beruhigt	doppelt beruhigt	unberuhigt
4	Erfüllung der Werkstoffnormen zum Zeitpunkt der Errichtung							
	Mech.-techn. Untersuchungen	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Chemische Analyse	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
5	Normenerfüllung der heute gültigen Werkstoffnorm DIN EN 10025-2:2005							
	Mech.-techn. Untersuchungen	nein	ja als S235JR	ja als S355J2	Ja als S235J0	ja als S235J0 bzw. S275J0	ja als S355J2	ja als S235JR
	Chemische Analyse ¹⁾	ja	nein	Ja	ja	nein	ja	nein
6	Verwendung der Werkstoffe im Freileitungsbau entsprechend aktuellem Regelwerk DIN EN 50431-3:2002							
	Zugelassene Werkstoffqualitäten sind S235J0 / S235J2 und S355J0 / S355J2							
		nein	nein	ja	ja	nein	ja	nein

1) Die Prüfung der Erfüllung der Normenforderungen erfolgte gegen alle drei Güten –JR, –J0 und –J2

Tabelle 15: Zusammenstellung der Ergebnisse der chemischen Analyse (Massenanteile in %)

Schadensteil bzw. geprüftes Bauteil	B3	B4	A5 B5	C1	C2	C3	C7	M65-01	M65-02	M65-04	M65-07A M65-07B	M65-08A	M65-09A
Probennummer	C_B3	C_B4	C_B5	C_C1	C_C2	C_C3_1	C_C7	M65-01- 02	M65-02- C	M65- 04-C	M65-07-C	M65-08- C	M65-09-C
Kohlenstoff	C 0,071	0,074	0,065	0,174	0,078	0,104	0,126	0,055	0,1327	0,0492	0,0375	0,0453	0,0402
Silizium	<0,006	<0,006	<0,006	0,181	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006	<0,006
Mangan	0,434	0,416	0,413	1,034	0,427	0,423	0,457	0,438	0,452	0,422	0,4	0,447	0,407
Phosphor	0,0453	0,0496	0,0395	0,008	0,0484	0,0581	0,0759	0,1044	0,0723	0,0912	0,0726	0,1036	0,0768
Schwefel	0,0158	0,0175	0,0128	0,0146	0,0152	0,0225	0,0317	0,0594	0,0292	0,0481	0,038	0,0534	0,0406
Stickstoff	0,0076	0,0113	0,0073	0,0119	0,0083	0,0089	0,0121	0,0168	0,0111	0,0147	0,0124	0,0155	0,0137
Aluminium	0,0074	0,0035	0,005	0,0413	<0,003 0	0,0798	0,0447	<0,003	0,006	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003
Chrom	0,03	0,029	0,029	0,258	0,029	0,03	0,031	0,011	0,03	0,011	0,011	0,012	0,011
Molybdän	0,005	0,003	0,004	0,083	0,004	0,004	0,005	0,003	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003
Nickel	0,035	0,033	0,037	0,198	0,035	0,035	0,041	0,038	0,039	0,037	0,035	0,038	0,035
Kupfer	0,058	0,057	0,054	0,5	0,058	0,058	0,06	0,023	0,059	0,023	0,021	0,024	0,022
Thomasstahl ¹⁾	ja	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
Erschmelzungsart ²⁾	unberu higt	unbe- ruhigt	unberu higt	beruhigt	unberu higt	unberu higt	unberu higt	unberu higt	unbe- ruhigt	unberu higt	unbe- ruhigt	unbe- ruhigt	unbe- ruhigt

¹⁾ Bewertung hinsichtlich Thomasstahl mit N-Gehalt: 0,01 bis 0,03% und P-Gehalt 0,04 bis 0,10 %²⁾ Erschmelzungsart: Kriterien: mit Si 0,02...0,2 %; Mn > 0,5 %; S > 0,04 %; Al > 0,02 %

Tabelle 16: Zusammenstellung der Ergebnisse der Zugversuche an Proben des Masts 65

Zuordnung	Proben- bezeichnung	R _{eh} in MPa	R _{el} in MPa	R _m in MPa	A in %	Bewertung ¹⁾
Eckstiel	M65-02A	276	250	399	35	St 37
Eckstiel	M65-02A	289	255	401	35	St 37
Diagonale	M65-04	285	276	389	45	St 37
Diagonale	M65-04	312	298	406	38	St 37
Diagonale	A2	343	326	418	37 ²⁾	St 37
Diagonale	A8	316	312	414	37	St 37
Diagonale	B1	339	305	412	37 ²⁾	St 37
Diagonale	B3	341	324	416	38,5	St 37
Diagonale	B4	376	329	420	35,5 ²⁾	St 37
Diagonale	B5	314	308	411	36,5	St 37
Diagonale	B6	321	308	415	39,5	St 37
Diagonale	B7	335	329	428	36 ²⁾	St 37
Diagonale	C1	454	453	606	28,5	S355
Diagonale	C6	339	323	416	37 ²⁾	St 37
Diagonale	C7	332	316	447	35	St 42
Diagonale	C8	338	330	448	35,5	St 42
Diagonale	E1	456	453	611	29	S355
Diagonale	M65-F	351	337	456	39,5 ²⁾	St 42
Diagonale	M65-G	322	310	428	38,5 ²⁾	St 37
Mittelwert der Diagonalen aus St 37 und St 42		331	315	422		

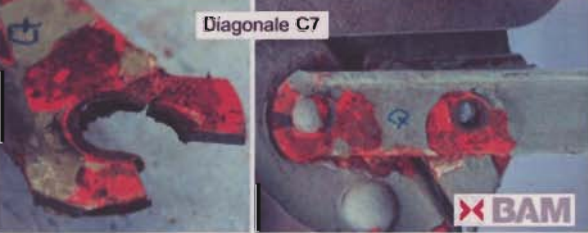
¹⁾ nach DIN 17100:1957 bzw. DIN EN 10025-2:2005²⁾ nach Anhang G der EN 10002-1:2001 ermittelt

Tabelle 17: Versuchsmatrix Bauteilversuche

Profil	Verbindung	Loch- durchmesser	Prüf- temp.	Geprüftes Bauteil	Position im Mast
60x60x6 St 37 (S 42)	2xNiete	21 mm	RT	B3, B5	Bild 102
			0 °C	B4, A5	Bild 101, Bild 102
		17 mm	RT	C2	Bild 101
				M65-07B M65-07A	Bild 102 Bild 102
			0 °C	C7 C3 M65-01 M65-08A M65-09A	Bild 104 Bild 101 Bild 104 Bild 101 Bild 101
	60x60x6 S355	2x Schrauben M16		RT	C1

Tabelle 18: Ergebnisse der Bauteilversuche

Diagonale	Verbin- dungsart	Temp.	Versagens- be- schreibung Kraft- maximum	Bild
B3 60x6 St 42	2 Niete Ø 21mm	RT	Diagonale am Ende duktil ausgerissen, Abscheren des inneren Niet, große Verformungen $F_{\max}$: 188 kN	
B5 60x6 St 42	2 Niete Ø 21mm	RT	Diagonale am Ende duktil ausgerissen, Abscheren des inneren Niet, große Verformungen $F_{\max}$: 177 kN	
B4 60x6 St 42	2 Niete Ø 21mm	0 °C	Diagonale am inneren Loch duktil über den gesamten Querschnitt ausgerissen $F_{\max}$: 185 kN	
A5 60x6 St 42	2 Niete Ø 21mm	0 °C	Diagonale am inneren Loch duktil über den gesamten Querschnitt ausgerissen $F_{\max}$: 182 kN	
C2 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	RT	Abscheren der Niete, keine größeren Verformungen in der Diagonale $F_{\max}$: 137 kN	

Diagonale	Verbindungsart	Temp.	Versagens- be- schreibung Kraft- maximum	Bild
C1 60x6 St 52	2 Schrauben M16 Locher Ø 17 mm	RT	Abscheren der Schrauben, keine größeren Verformungen in der Diagonale $F_{\max}: 156 \text{ kN}$	
M65-07B 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	RT	Diagonale am Ende duktil ausgerissen, Abscheren des inneren Niet, große Verformungen $F_{\max}: 131 \text{ kN}$	
M65-07A 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	RT	Abscheren der Niete, keine größeren Verformungen in der Diagonale $F_{\max}: 143 \text{ kN}$	
C3 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	0 °C	einseitiger Bruch des Querschnittes des angeschlossenen Schenkels, Abscheren des 1. Niet $F_{\max}: 158 \text{ kN}$	
C7 60x6 St 42	2 Niete Ø 17mm	0 °C	Diagonale am Ende spröd ausgerissen, Abscheren des inneren Niet, keine größeren Verformungen $F_{\max}: 149 \text{ kN}$	

Diagonale	Verbin- dungsart	Temp.	Versagens- be- schreibung Kraft- maximum	Bild
M65-01 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	0 °C	Abscheren der Niete, Verformungen des inneren Nietloches, Diagonale am Ende spröd angerissen $F_{\max}$: 170 kN	
M65-08A 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	0 °C	Spaltbruch im Querschnitt des inneren Nietloch $F_{\max}$: 125 kN	
M65-09 60x6 St 37	2 Niete Ø 17mm	0 °C	Spaltbruch im Querschnitt des inneren Nietloch $F_{\max}$: 94 kN	

Tabelle 19: Ergebnisse der Bauteilzugversuche

Bauteil	Profil	Art der Verbindung		Netto- querschnitt A_{net} ¹⁾ in mm ²	R_m Mindestwert der Norm ²⁾ in MPa	berechn. Bruchkraft N_{sk} in kN	Temp. in °C	exp. Maximalkraft $F_{\text{max, exp}}$ in kN	Versagens- beschreibung	ABW ³⁾ in %
		Art Niet Schraube	Anzahl Lochdurch- messer in mm							
B3	60x6	N	2	444	340	151,0	23	188,0	duktil, Lochleibung	24,5%
B5	60x6	N	2	444	340	151,0	23	177,0	duktil, Lochleibung	17,2%
B4	60x6	N	2	445	340	151,3	0	185,0	duktil, Querschnitt	22,3%
A5	60x6	N	2	444	340	151,0	0	182,0	duktil, Querschnitt	20,6%
C2	60x6	N	2	464	340	157,8	23	136,7	Nietversagen	
C1	60x6, St 52	S	2	464	490	227,4	23	155,4	Schraubenversagen	
M65-07B	60x6	N	2	464	340	157,8	23	131,0	duktil, Lochleibung	-17,0%
M65-07A	60x6	N	2	464	340	157,8	23	143,0	Nietversagen	
C3	60x6	N	2	464	340	157,8	0	157,5	sprödd/duktil	-0,2%
C7	60x6	N	2	464	340	157,8	0	164,0	sprödd, Lochleibung	3,9%
M65-01	60x6	N	2	464	340	157,8	0	170,0	Nietversagen	
M65-08A	60x6	N	2	464	340	157,8	0	125,0	sprödd, Querschnitt	-20,8%
M65-09A	60x6	N	2	464	340	157,8	0	94,0	sprödd, Querschnitt	-40,4%

¹⁾ Nettoquerschnitt nach VDE 0210:1985: $A=0,8 \cdot (\text{Gesamtquerschnitt} - \text{Lochquerschnitt})$ ²⁾ nach DIN 17100:1980³⁾ prozentualer Wert der Abweichung zwischen der berechneten Beanspruchbarkeit N_{sk} und der Maximalkraft im Versuch $F_{\text{max, exp}}$

Tabelle 20: Berechnung der Querschnittsbeanspruchbarkeit und der Lochleibungsbeanspruchbarkeit der Diagonale sowie der Scherbeanspruchbarkeit der Verbindungselemente

Beanspruchbarkeit berechnet nach	VDE 0210:1985	DIN EN 50341-1:2002	DIN EN 50341-3-4:2002 (nationaler Teil)
Beanspruchbarkeit des Querschnitts der Diagonalen	$N_{sk} = A_{net} \cdot R_m$	Anhang J.4.1 $N_{sk} = A_{net} \cdot R_m$	Anhang J.4.1 $N_{sk} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot R_m$
Netto- Querschnitts- berechnung	Einfachverbindung $A_{net} = (b_1 - \varnothing D) \cdot t$ Mehrfachverbindung $A_{net} = 0,8(b_1 + b_2 - t \cdot \varnothing D) \cdot t$	Einfachverbindung $A_{net} = (b_1 - \varnothing D) \cdot t$ Mehrfachverbindung $A_{net} = (b_1 + 0,5b_2 - \varnothing D) \cdot t$	
Mindest- zugfestigkeit nach Norm	DIN 17100:1980 St 37: 340 MPa ¹⁾ St 42: 412 MPa ¹⁾ St 52: 490 MPa ¹⁾	DIN EN 10025-2:2005 S235: 360 MPa ¹⁾ S355: 470 MPa ¹⁾	
Lochleibungs- beanspruchbarkeit der Diagonalen		Anhang J11, Tab. J.2 und Bild J.13 ³⁾	
Scher- beanspruchbarkeit	nach DIN 18800 (nicht ausgeführt)	Anhang J.11, Tab. J.2 ³⁾ $N_{sk} = n \cdot 0,6 A_s \cdot R_{m,s}$	

¹⁾ für Halbzeugdicken von 3 bis 100 mm

³⁾ $R_{m,s} = 500 \text{ MPa}$, $R_m = 360 \text{ MPa}$, Skizze zu den Größen

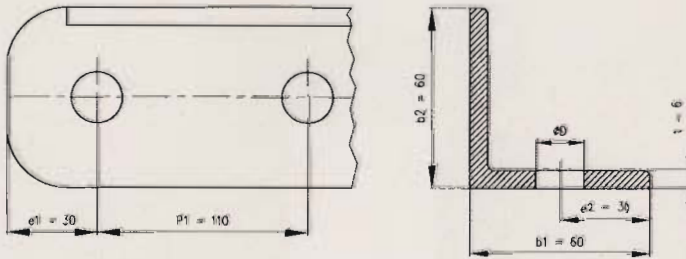


Tabelle 21: Vergleich der Lastansätze nach dem VDE-Regelwerk

Ausgabe	Ständige Einwirkung	Wind auf der Basis $h = 40m$	Bauherrfestlegung	Eis *	Kombination Wind + Eis	Sicherheitsabstand zum Zeitpunkt der Errichtung
	[-]	[N/m ²]		[N/m]	[-]	[-]
2002	Eigengewicht, Isolatorketten, Zubehörteile, Flugwarnkugeln usw.	$q_0 = 1050$ $q = q_0 + 3 \times h$ $q = 1170$	Zone 1	$5 + 0.1 \times d$ d in mm	0.5 Wind + 1.0 Eis	ca. 1.48
			Zone 2	$10 + 0.2 \times d$ d in mm		
			Zone 3	$20 + 0.4 \times d$ d in mm		
1985	Eigenlasten, Ausrüstung, Leiter	$q = 900$ Mast $q = 680$ Leiter	$5 + 0.1 \times d$ d in mm		0.5 Wind + 1.0 Eis	ca. 1.5
1969	Eigenlasten, Ausrüstung, Leiter	$q = 900$ Mast $q = 680$ Leiter	$5 + 0.1 \times d$ d in mm		1.0 Wind + 1.0 Eis	ca. 1.5
1958	Eigenlasten, Ausrüstung, Leiter	$q = 900$ Mast $q = 675$ Leiter	$1.8 \times (d)^{0.5}$ aus Seildurchhangsberechnung		1.0 Wind + 1.0 Eis	ca. 1.65
1930	Eigenlasten, Ausrüstung, Leiter	$q = 1500$ Mast $q = 1250$ Leiter	$1.8 \times (d)^{0.5}$ aus Seildurchhangsberechnung		1.0 Wind + 1.0 Eis	ca. 1.5

$(d)^{0.5}$ bedeutet, dass die Wurzel aus d zu ziehen ist, d = Leiterdurchmesser

Tabelle 22: Vergleich der Lastkonstellationen nach dem VDE Regelwerk (Betrachtung der Winterlastfälle)

Jahr	Traverse links		Traverse rechts	
	vorläufiges Feld	nachläufiges Feld	vorläufiges Feld	nachläufiges Feld
1930	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
	Wind + Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
	Wind + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
1958	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Leiterzüge	Leiterzüge	Leiterzüge
1969	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	Eis + Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Eis + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge
1985	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + 2/3 der einseitigen Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	Eis + Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Wind + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
2002	Eis + 40% der einseitigen Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Eis + 40% der einseitigen Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge	Wind + Leiterzüge
	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge	Wind + Eis + Leiterzüge
	50 % Eis + Leiterzüge	Leiterzüge	50 % Eis + Leiterzüge	Leiterzüge
	Eis + Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Eis + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge
	2/3 Eis + Leiterzüge + Ausfall ein Leiterzug	Eis + Leiterzüge	2/3 Eis + Leiterzüge	Eis + Leiterzüge
	40% (Eis + Leiterzüge)	Eis + Leiterzüge	40% (Eis + Leiterzüge)	Eis + Leiterzüge

Tabelle 23: Zusammenfassung der Streckenlasten aus Schneewalzen und deren Verwendung in der statischen Berechnung

Quelle/Verwendung	Streckenlast	Völligkeit der Leiterbelegung	Rechnerische Streckenlast für rechnerisch
Einheit	kg/m	-	kg/m
DWD, [58]	5,3	-	-
Seildurchhangsberechnung, Kap. 5.3	6 ... 10	3/5, Bild 35	3,6 ... 6
Bild 116, Handschuhe, Kap. 5.2.1	3,9	4/5, Bild 41	3,2
Statik Reallastfälle, Kap. 6.5.3.3	-	5/5	5,3
Statik Versagensfall Kap. 6.5.3.4	-	5/5	3,9

Tabelle 24: Lastansätze

	Parameter	Winkelabspannmast BL1503 M65	Tragmast BL1503 M66
Normlastfälle LG1 - LG2	Eis	Eislastzone 2	Eislastzone 3
	Wind	nach DIN EN 50341	nach DIN EN 50341
	Werkstoff	S235	S235
	Sicherheiten	Teilsicherheitsfaktoren	Teilsicherheitsfaktoren
Reallastfälle LG3 - LG12	Eis	d = 15 cm; $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$	d = 15 cm; $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$
	Wind	v = 18 m/s, in x-Richtung (aus 250°)	v = 18 m/s in x-Richtung
	Werkstoff	S235	S235
	Sicherheiten	-	-
Versagenslastf all LG13	Eis	d = 13 cm; $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$	zu LG 13 passende LG für Tragmast in den Real-lastfällen untersucht oder Fotodokumentation von gleichen Masttypen z.B. BL1503 M82, Bild 37
	Wind	v = 11 m/s, aus 200°	
	Werkstoff	$R_{eH} = 331 \text{ N/mm}^2$	
	Sicherheiten	-	

Tabelle 25: Lastannahmen und Ansatz der Einwirkungen auf die Leiter des Winkelabspannmastes M65 (Hinweis: Lasfall 1-5 beziehen sich auf die Einwirkungen auf den Mast selbst)

LF	Belastung der Leiter und Isolatoren					Bemerkungen	Bild zum Lastansatz
	Traversen		Erdseil				
6	I + II	$F_{Hx,k}$	8,40 kN	$FG_{Hx,k}$	3,14 kN	T = +5°C, Leitergewicht – Symmetrische Belastung	Bild 119
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	2,60 kN	$FG_{Vz,k}$	0,96 kN		
7	I + II	$F_{Hx,k}$	3,70 kN	$FG_{Hx,k}$	2,58 kN	T = +5°C, Wind +X-Richtung – Symmetrische Belastung	Bild 119
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	0,00 kN	$FG_{Vz,k}$	0,00 kN		
8	I + II	G_i	2,00 kN	G_i	2,00 kN	Isolatorenge- wicht mit Eis	-
9	I + II	$F_{Hx,k}$	18,62 kN	$FG_{Hx,k}$	10,80 kN	T = - 5°C, Leitergewicht mit Eislast An- satz A – Symm. Belastung	Bild 120
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	6,48 kN	$FG_{Vz,k}$	4,34 kN		
10	II	$F_{Hx,k}$	9,20 kN	$FG_{Hx,k}$	8,80 kN	T = - 5°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz A	Bild 120
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	0,00 kN	$FG_{Vz,k}$	0,00 kN		
	I	$F_{Hx,k}$	9,20 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	0,00 kN				
11	II	Lastpunkt A				T = - 5°C, Leitergewicht mit Eislast An- satz A - Unsymm.	Bild 121
		$FA_{Hx,k}$	9,31 kN	$FG_{Hx,k}$	7,13 kN		
		$FA_{Hy,k}$	-25,58 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$FA_{Vz,k}$	3,24 kN	$FG_{Vz,k}$	4,34 kN		
		Lastpunkt B,C,D					
		$F_{Hx,k}$	12,29 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	6,48 kN				
	I	$F_{Hx,k}$	12,29 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	6,48 kN				
12	I+II	$F_{Hx,k}$	38,30 kN	$FG_{Hx,k}$	26,40 kN	T = - 0°C, Leitergewicht mit Eislast An- satz B - Symm. Belastung	Bild 121
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	16,64 kN	$FG_{Vz,k}$	15,00 kN		
13	II	$F_{Hx,k}$	3,44 kN	$FG_{Hx,k}$	3,44 kN	T = - 0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B	Bild 122
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$FG_{Hy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	0,00 kN	$FG_{Vz,k}$	0,00 kN		
	I	$F_{Hx,k}$	3,44 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				

LF	Belastung der Leiter und Isolatoren				Bemerkungen	Bild zum Lastansatz	
	Traversen		Erdseil				
		$F_{Vz,k}$	0,00 kN				
14	II	Lastpunkt A,B				T = - 0°C, L- Gewicht mit Eislast Ansatz B – einseitig sym. Belastung	Bild 122
		$F_{Hx,k}$	38,30 kN	$F_{GHx,k}$	26,40 kN		
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	16,64 kN	$F_{GVz,k}$	15,00 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hgx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hgy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vgz,k}$	2,60 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	38,30 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	16,64 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hgx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hgy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vgz,k}$	2,60 kN				
15	II	Lastpunkt A,B				T = - 0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / LF14	Bild 123
		$F_{Hx,k}$	3,44 kN	$F_{GHx,k}$	3,44 kN		
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hgx,k}$	0,00 kN				
		$F_{Hgy,k}$	0,00 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	3,44 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hgx,k}$	0,00 kN				
		$F_{Hgy,k}$	0,00 kN				
16	II	Lastpunkt A,B,C,D				T = - 0°C, L- Gewicht mit Eislast Ansatz B – einseitige Belastung	Bild 123
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN	$F_{GHx,k}$	14,80 kN		
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN	$F_{GHy,k}$	-31,85 kN		
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN	$F_{GVz,k}$	7,98 kN		
	I	Lastpunkt E,F					
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN				
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN				
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN				
17	II	Lastpunkt A,B,C,D				T = - 0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / LF16	Bild 124
		$F_{Hx,k}$	1,72 kN	$F_{GHx,k}$	1,72 kN		
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
	I	Lastpunkt E,F					

LF	Belastung der Leiter und Isolatoren				Bemerkungen	Bild zum Lastansatz	
	Traversen		Erdseil				
		$F_{Hx,k}$	1,72 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
18	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, L- Gewicht mit Eislast Ansatz B – Torsionsbelas-	Bild 124
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN	$F_{GHx,k}$	14,81 kN		
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN	$F_{GHy,k}$	-31,85 kN		
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN	$F_{GVz,k}$	7,98 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN				
		$F_{Hy,k}$	40,81 kN				
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN				
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN				
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN				
		$F_{Hy,k}$	40,81 kN				
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN				
19	II	Lastpunkt A,B,C,D				T = 0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / LF18	Bild 125
		$F_{Hx,k}$	1,72 kN	$F_{GHx,k}$	1,72 kN		
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
	I	Lastpunkt E,F					
		$F_{Hx,k}$	1,72 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
20	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, L- Gewicht mit Eislast Ansatz B – BAM- Lastfall 1	Bild 125
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN	$F_{GHx,k}$	6,36 kN		
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN	$F_{GHy,k}$	-8,63 kN		
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN	$F_{GVz,k}$	2,34 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	2,60 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	23,45 kN				
		$F_{Hy,k}$	-40,81 kN				
		$F_{Vz,k}$	9,62 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	2,60 kN				
21	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, Wind-	

LF	Belastung der Leiter und Isolatoren				Bemerkungen	Bild zum Lastansatz	
	Traversen		Erdseil				
	I	$F_{Hx,k}$	2,21 kN	$F_{GHx,k}$	2,21 kN	last 50° zur +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B/LF20 (für LG13)	Bild 126
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	0,00 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	2,21 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	0,00 kN				
$F_{Hy,k}$	0,00 kN						
22	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, L-Gewicht mit Eislast Ansatz B – BAM-Lastfall 2 (d=13cm) (für LG13) Erdseil ankommend mit 20% Eisbelegung, abgehend ohne Eisbelegung	Bild 126
		$F_{Hx,k}$	20,19 kN	$F_{GHx,k}$	5,71 kN		
		$F_{Hy,k}$	-31,85 kN	$F_{GHy,k}$	-6,86 kN		
		$F_{Vz,k}$	7,87 kN	$F_{GVz,k}$	2,02 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	2,60 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	20,19 kN				
		$F_{Hy,k}$	-31,85 kN				
		$F_{Vz,k}$	7,87 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	8,60 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	2,60 kN				
23	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, L-Gewicht mit Eislast Ansatz B – BAM-Lastfall 2 (10%)	Bild 127
		$F_{Hx,k}$	21,63 kN	$F_{GHx,k}$	7,06 kN		
		$F_{Hy,k}$	-27,88 kN	$F_{GHy,k}$	-3,16 kN		
		$F_{Vz,k}$	8,40 kN	$F_{GVz,k}$	2,55 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	11,48 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	3,66 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	21,63 kN				
		$F_{Hy,k}$	-27,88 kN				
		$F_{Vz,k}$	8,40 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	11,48 kN				

LF	Belastung der Leiter und Isolatoren				Bemerkungen	Bild zum Lastansatz	
	Traversen		Erdseil				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	3,66 kN				
24	II	Lastpunkt A,B				T = 0°C, L- Gewicht mit Eislast Ansatz B – BAM- Lastfall 2 (20%)	Bild 127
		$F_{Hx,k}$	22,97 kN	$F_{GHx,k}$	8,20 kN		
		$F_{Hy,k}$	-24,20 kN	$F_{GHy,k}$	0,00 kN		
		$F_{Vz,k}$	8,92 kN	$F_{GVz,k}$	3,08 kN		
		Lastpunkt C,D					
		$F_{Hx,k}$	14,16 kN				
		$F_{Hy,k}$	0,00 kN				
		$F_{Vz,k}$	4,70 kN				
	I	Lastpunkt E					
		$F_{Hx,k}$	22,97 kN				
		$F_{Hy,k}$	-24,20 kN				
		$F_{Vz,k}$	8,92 kN				
		Lastpunkt F					
		$F_{Hx,k}$	14,16 kN				
$F_{Hy,k}$		0,00 kN					
		$F_{Vz,k}$	4,70 kN				

Tabelle 26: Zusammenstellung und Aufbau der Lastfälle LG_i

LF Nr.	Bezeichnung Lastfall	LF-Faktor Lastgruppe LG1	LF-Faktor Lastgruppe LG2	LF-Faktor Lastgruppe LG3	LF-Faktor Lastgruppe LG4	LF-Faktor Lastgruppe LG5	LF-Faktor Lastgruppe LG6	LF-Faktor Lastgruppe LG7	LF-Faktor Lastgruppe LG8	LF-Faktor Lastgruppe LG9	LF-Faktor Lastgruppe LG10
		Normlastfall Lastfall D	Normlastfall Lastfall H2	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall
LF 1	Konstruktionsgewicht	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LF 2	Isolatorenge­wicht	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 3	Wind auf Gittermast: x-Richt. (Norm)	0,675	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 4	Wind auf Gittermast: x-Richt.	--	--	1,00	--	1,00	--	1,00	--	1,00	--
LF 5	Wind auf Gittermast: 50° x-Richt.	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 6	Leitergewicht – Symmetrische Belastung T=+5°C	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 7	Leitergewicht – Symmetrische Belastung T=+5°C	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 8	Isolatorenge­wicht mit Eis Ansatz A – Sym. Belastung T=-5°C	1,35	1,35	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
F 9	Leitergewicht mit Eis Ansatz A – Sym. Belastung T=-5°C	1,35	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 10	Windlast +x-Richtung auf Eishülle Ansatz A	0,675	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 11	Leitergewicht mit Eis Ansatz A – Unsym. Belastung T=0°C	--	1,35	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 12	Leitergewicht mit Eis Ansatz B – Sym. Belastung d=15cm	--	--	1,00	1,00	--	--	--	--	--	--

Tabelle 26 auf der nächsten Seite fortgesetzt

LF Nr.	Bezeichnung Lastfall	LF-Faktor Lastgruppe LG1	LF-Faktor Lastgruppe LG2	LF-Faktor Lastgruppe LG3	LF-Faktor Lastgruppe LG4	LF-Faktor Lastgruppe LG5	LF-Faktor Lastgruppe LG6	LF-Faktor Lastgruppe LG7	LF-Faktor Lastgruppe LG8	LF-Faktor Lastgruppe LG9	LF-Faktor Lastgruppe LG10
		Normlastfall Lastfall D	Normlastfall Lastfall H2	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall
LF 13	T=0°C, Windlast +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B d=15cm	--	--	1,00	--	--	--	--	--	--	--
LF 14	T=0°C, Leiterrgewicht mit Eis Ansatz B – einseitig sym. Belastung d=15cm	--	--	--	--	1,00	1,00	--	--	--	--
LF 15	T=0°C, Windlast +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 14	--	--	--	--	1,00	--	--	--	--	--
LF 16	T=0°C, Leiterrgewicht mit Eis Ansatz B – einseitig Belastung d=15cm	--	--	--	--	--	--	1,00	1,00	--	--
LF 17	T=0°C, Windlast +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 16	--	--	--	--	--	--	1,00	--	--	--
LF 18	T=0°C, Leiterrgewicht mit Eis Ansatz B – Torsionsbeanspruchung d=15cm	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	1,00
LF 19	T=0°C, Windlast +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 18	--	--	--	--	--	--	--	--	1,00	--
LF 20	T=0°C, Leiterrgewicht mit Eis Ans. B BAM-Lastfall Eisrolle d=15cm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 21	T=0°C, Windlast +X-Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 20	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle 26 auf der nächsten Seite fortgesetzt

LF Nr.	Bezeichnung Lastfall	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe	LF-Faktor Lastgruppe
		LG1	LG2	LG3	LG4	LG5	LG6	LG7	LG8	LG9	LG10	
		Normlastfall Lastfall D	Normlastfall Lastfall H2	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall	Reallastfall
LF 22	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13cm	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 23	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13cm, +10%	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
LF 24	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13cm, +20%	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Tabelle 26 auf der nächsten Seite fortgesetzt

Nr.	Lastfall	Lastgruppe	Lastgruppe	Lastgruppe	Lastgruppe	Lastgruppe
		LG11	LG12	LG13	LG14	LG15
		Reallastfall	Reallastfall	Versagenslastfall	Nebenbetrachtung	Nebenbetrachtung
LF 1	Konstruktionsgewicht	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LF 2	Isolatorenge­wicht	--	--	--	--	--
LF 3	Wind auf Gittermast: x-Richt. (Norm)	--	--	--	--	--
LF 4	Wind auf Gittermast: x-Richt.	--	--	--	--	--
LF 5	Wind auf Gittermast: 50° X-Richt.	1,00	--	1,00	1,00	1,00
LF 6	T=+5°C, Leitergewicht – Symmetrische	--	--	--	--	--
LF 7	Belastung Wind in +X- Richtung – Symmetrische	--	--	--	--	--
LF 8	Belastung Isolatorenge­wicht mit Eis	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
LF 9	T=-5°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz A – Sym. Belastung	--	--	--	--	--
LF 10	T=-5°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz A	--	--	--	--	--
LF 11	T=-5°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz A – Unsym. Belastung	--	--	--	--	--
LF 12	T=0°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz B – Sym. Belastung d=15cm	--	--	--	--	--
LF 13	T=0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B	--	--	--	--	--
LF 14	T=0°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz B – einseitig sym. Belastung d=15cm	--	--	--	--	--
LF 15	T=0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 14	--	--	--	--	--
LF 16	T=0°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz B – einseitig Belastung d=15cm	--	--	--	--	--
LF 17	T=0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 16	--	--	--	--	--
LF 18	T=0°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz B – Torsionsbeanspruchu ng d=15cm	--	--	--	--	--
LF 19	T=0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 18	--	--	--	--	--
LF 20	T=0°C, Leitergewicht mit Eis Ansatz B – BAM-Lastfall d=15cm	1,00	1,00	--	--	--
LF 21	T=0°C, Windlast +X- Richtung auf Eishülle Ansatz B / zugh. zu LF 20	1,00	--	1,00	1,00	1,00
LF 22	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13	--	--	1,00	--	--
LF 23	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13cm, +10%	--	--	--	1,00	--
LF 24	T=0°C, Leitergewicht mit Eis-Ans.B BAM-Lastfall Eisrolle d=13cm, +20%	--	--	--	--	1,00

Tabelle 27: Vergleichende Zusammenfassung der Ergebnisse

Lastfall	LG	Masttyp					
		Winkelabspannmast BL1503 M65			Tragmast BL1503 M66		
		η_1	η_2	η_3	η_1	η_2	η_3
Normlastfälle	1	0,51	0,57	0,86	0,56	0,23	0,92
	2	0,7	0,53	0,91	0,45	0,18	0,78
Reallastfälle	3	0,47	0,67	0,92	0,97	0,49	2,03
	4	0,43	0,6	0,83	0,01	0,01	0,01
	5	0,32	0,4	0,62	0,64	0,32	1,34
	6	0,3	0,36	0,57	0,06	0,03	0,08
	7	0,74	1,1	1,39	1,72	0,88	3,74
	8	0,72	1,06	1,35	1,68	0,85	2,37
	9	1,91	1,83	3,76	6,82	3,46	10,19
	10	1,89	1,81	3,71	6,39	3,24	9,85
	11	1,04	1	2,01	-	-	-
	12	1,04	1	2,02	-	-	-
Versagensla stfall	13	1,2	0,49	1,28	-	-	-

Tabelle 28: Angabe der Ausnutzungsgrade η_3 für die Knicksicherheit im Versagenslastfall für Winkelabspannmast M65

Schuss	Wand	El.-Nr.	Nr. Druckdiago- nale (in Bild 131 von oben gezählt)	Stab- kraft in kN	Stablänge jeweils Anschluss- Kreuzungspkt. in cm	Knicklänge s_k in cm	λ_k mit $i_{min} = 1,17$ in cm	λ_k / λ_a ²⁾ $R_{aH} = 331 \text{ N/mm}^2$ $\lambda_a = 79,1$	κ	η_3 mit $N_{pl} = 228,7$ kN
2	2-3	1159	2	-136,9	94,30	84,87	72,54	0,92	0,59	1,01
		1179		-136,6	98,90	89,01	76,08	0,96	0,56	1,06
		1199	3	-121,3	98,80	88,92	76,00	0,96	0,56	0,94
		1222		-121,6	103,80	93,42	79,85	1,01	0,53	0,99
		1243	4	-122,2	103,60	93,24	79,69	1,01	0,54	1,00
		1263		-122,2	108,60	97,74	83,54	1,06	0,51	1,05
	3-4	1451	2	-123,9	94,30	84,87	72,54	0,92	0,59	0,92
		1455		-123,9	98,90	89,01	76,08	0,96	0,56	0,96
		1459	3	-124,8	98,80	88,92	76,00	0,96	0,56	0,97
		1463		-124,8	103,80	93,42	79,85	1,01	0,53	1,02
		1467	4	-118,2	103,60	93,24	79,69	1,01	0,54	0,96
		1471		-118,2	108,60	97,74	83,54	1,06	0,51	1,02

Fortsetzung der Tabelle 28 auf der nächsten Seite

Schuss	Wand	El.-Nr.	Nr. Druckdiagonale (in Bild 131 von oben gezählt)	Stabkraft in kN	Stablänge jeweils Anschluss- Kreuzungspkt. in cm	Knicklänge s_k ¹⁾ in cm	λ_k mit $i_{min} = 1,17$ in cm	λ_k / λ_a ²⁾ $R_{eH} = 331 \text{ N/mm}^2$ $\lambda_a = 79,1$	κ	η_3 mit $N_{pl} = 228,7 \text{ kN}$
3	2-3	1283	1	-112,9	108,40	97,56	83,38	1,05	0,51	0,97
		1303		-113,0	113,70	102,33	87,46	1,11	0,48	1,03
		1323	2	-109,0	113,40	102,06	87,23	1,10	0,48	0,99
		1349		-109,1	118,90	107,01	91,46	1,16	0,46	1,05
		1373	3	-102,7	118,50	106,65	91,15	1,15	0,46	0,98
		1407		-102,8	124,20	111,78	95,54	1,21	0,43	1,04
		1789	4	-99,1	123,80	111,42	95,23	1,20	0,43	1,00
		1793		-99,2	129,70	116,73	99,77	1,26	0,41	1,07
	3-4	1475	1	-112,6	108,40	97,56	83,38	1,05	0,51	0,97
		1479		-112,6	113,70	102,33	87,46	1,11	0,48	1,02
		1483	2	-106,7	113,40	102,06	87,23	1,10	0,48	0,97
		1487		-106,7	118,90	107,01	91,46	1,16	0,46	1,02
		1491	3	-102,3	118,50	106,65	91,15	1,15	0,46	0,98
		1495		-102,3	124,20	111,78	95,54	1,21	0,43	1,04
		1499	4	-96,3	123,80	111,42	95,23	1,20	0,43	0,97
		1503		-96,4	129,70	116,73	99,77	1,26	0,41	1,04

Schuss	Wand	El.-Nr.	Nr. Druckdiagonale (in Bild 131 von oben gezählt)	Stabkraft in kN	Stablänge jeweils Anschluss- Kreuzungspkt. in cm	Knicklänge s_k in cm	λ_k mit $i_{min} = 1,17$ in cm	λ_k / λ_a $R_{aH} = 331 \text{ N/mm}^2$ $\lambda_a = 79,1$	κ	η_3 mit $N_{pl} = 228,7 \text{ kN}$
4	2-3	1797	1	-92,5	129,20	116,28	99,38	1,26	0,41	0,99
		1801		-92,6	135,40	121,86	104,15	1,32	0,38	1,06
		1805	2	-93,4	134,90	121,41	103,77	1,31	0,38	1,06
		1809		-93,5	141,10	126,99	108,54	1,37	0,36	1,14
		1813	3	-83,1	141,90	127,71	109,15	1,38	0,36	1,02
		1817		-83,3	148,60	133,74	114,31	1,44	0,33	1,09
	3-4	1507	1	-92,8	129,20	116,28	99,38	1,26	0,41	0,99
		1511		-92,8	135,40	121,86	104,15	1,32	0,38	1,06
		1515	2	-90,2	134,90	121,41	103,77	1,31	0,38	1,03
		1519		-90,3	141,10	126,99	108,54	1,37	0,36	1,10
		1523	3	-82,9	141,90	127,71	109,15	1,38	0,36	1,01
		1527		-82,9	148,60	133,74	114,31	1,44	0,33	1,09

Fortsetzung der Tabelle 28 auf der nächsten Seite

Schuss	Wand	El.-Nr.	Nr. Druckdiagonale (in Bild 131 von oben gezählt)	Stabkraft in kN	Stablänge jeweils Anschluss- Kreuzungspkt. in cm	Knicklänge s_k ¹⁾ in cm	λ_k mit $i_{min} = 1,17$ in cm	λ_k / λ_a ²⁾ $R_{aH} = 331 \text{ N/mm}^2$ $\lambda_a = 79,1$	κ	η_3 mit $N_{pl} = 228,7$ kN
5	2-3	1822	1	-80,3	149,20	134,28	114,77	1,45	0,33	1,06
		1826		-80,4	156,50	140,85	120,38	1,52	0,31	1,14
		1830	2	-80,7	159,60	143,64	122,77	1,55	0,30	1,18
		1834		-80,8	167,90	151,11	129,15	1,63	0,28	1,28
		1838	3	-74,7	165,20	148,68	127,08	1,61	0,28	1,16
		1842		-74,8	173,20	155,88	133,23	1,68	0,26	1,25
	3-4	1532	1	-79,0	149,20	134,28	114,77	1,45	0,33	1,04
		1536		-79,0	156,50	140,85	120,38	1,52	0,31	1,12
		1540	2	-78,1	159,60	143,64	122,77	1,55	0,30	1,14
		1544		-78,1	167,90	151,11	129,15	1,63	0,28	1,24
		1548	3	-74,0	165,20	148,68	127,08	1,61	0,28	1,15
		1552		-74,1	173,20	155,88	133,23	1,68	0,26	1,24

¹⁾ $\beta=0,9$ vgl. Kap. 6.5.4.1²⁾ vgl. Tabelle 16

Tabelle 29: Ausnutzungsgrade η_1 für das Zugversagen im Versagenslastfall für Winkelabspannmast M65

Schuss	El.-Nr.	Wand 3-4 Nr. Zugdiagon. (in Bild 131 von oben gezählt)	Rechnerische Stabkraft aus Statik in kN	Versuch $F_{\max, \exp.}$ in kN	η_1	η_2
2	1453	2	128,1	137 -170	< 1	0,56
	1457					
	1461	3	124,9	131,0	0,95	0,55
	1465					
	1469	4	118,0	125,0	0,94	0,52
	1473					
3	1477	1	112,4	94,0	1,20	0,49
	1481					
	1485	2	107,3	137 -170	< 1	0,47
	1489					
	1493	3	101,5	137 -170	< 1	0,44
	1497					
	1501	4	97,6	137 -170	< 1	0,43
	1505					

13 Bilder

13.1 Ortstermin, Zustand der Masten



Bild 1: 1503Mast65, 2005-12-20, Dokumentation, Suche nach Bruchstellen



Bild 2: 1503Mast65, 2005-12-20, Brennschnitte vorheriger Probenahme



Bild 3: 1503Mast65, 2005-12-20, spröd gebrochene Diagonale Prüfstück M65-04

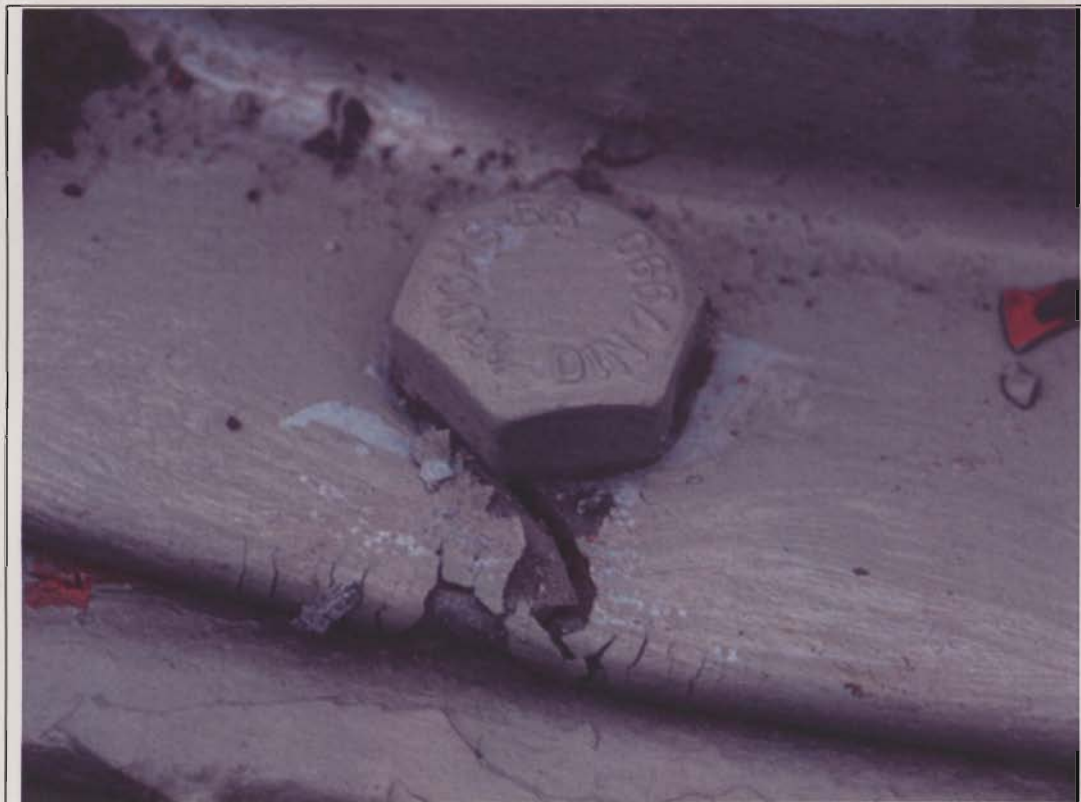


Bild 4: 1503Mast65, 2005-12-20, duktil gebrochene verzinkte, geschraubte Diagonale



Bild 5: 1503Mast65, 2005-12-20, Dokumentation, Kennzeichnung der zu entnehmenden Prüfstücke



Bild 6: 1503Mast66, 2005-12-20, Dokumentation des Mastzustandes



Bild 7: 1503Mast66, 2005-12-20, Seil aufgekorb, Drahtbrüche



Bild 8: 1503Mast66, 2005-12-20, Diagonalenverschraubung ausgerissen

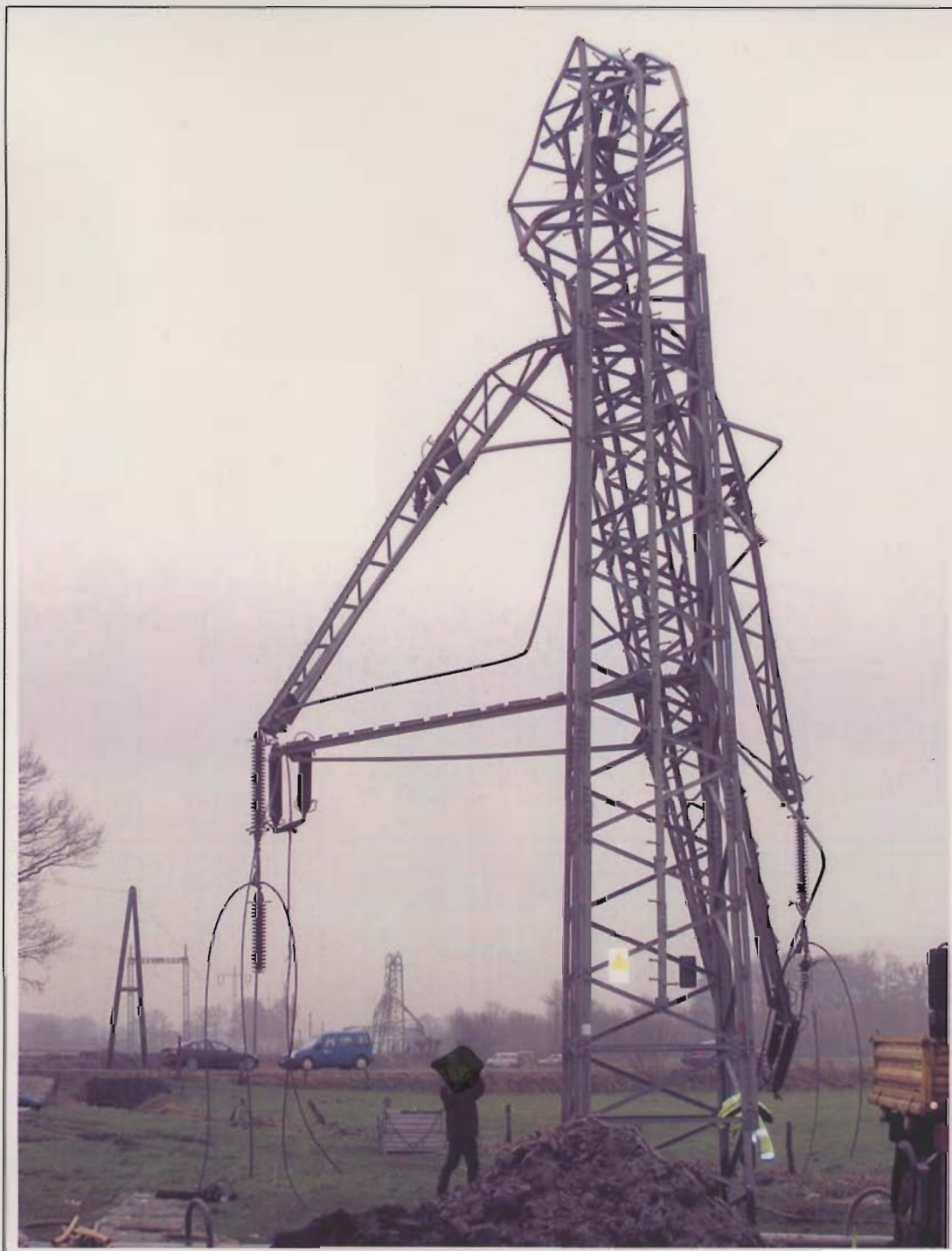


Bild 9: 1503Mast68, 2005-12-20, stehend, Blick in Freileitungsrichtung SO, M69 im Hintergrund



Bild 10: 1503Mast69, 2005-12-20, stehend, Blick in Freileitungsrichtung SO, M70 im Hintergrund



Bild 11: 1503Mast73, 2005-12-20, liegend, Kennzeichnung der Prüfstücke

13.2 Ortstermin M27, M22



Bild 12: 1536Mast27, 2005-12-20, Auswahl der Prüfstücke



Bild 13: 1536Mast27, 2005-12-20, Kennzeichnung der Prüfstücke



Bild 14: 1525Mast 22, Diagonalen geknickt, Bruch einer Diagonale nicht erkennbar: Primärversagen Stabilitätsversagen durch Knickung



Bild 15: 1525Mast 22, 2005-12-20, mehrere Diagonalen in der 2. Eigenform geknickt, Primärversagen Stabilitätsversagen, Auswahl und Kennzeichnung der Prüfstücke

13.3 Zuordnung der Prüfstücke, Probennahme

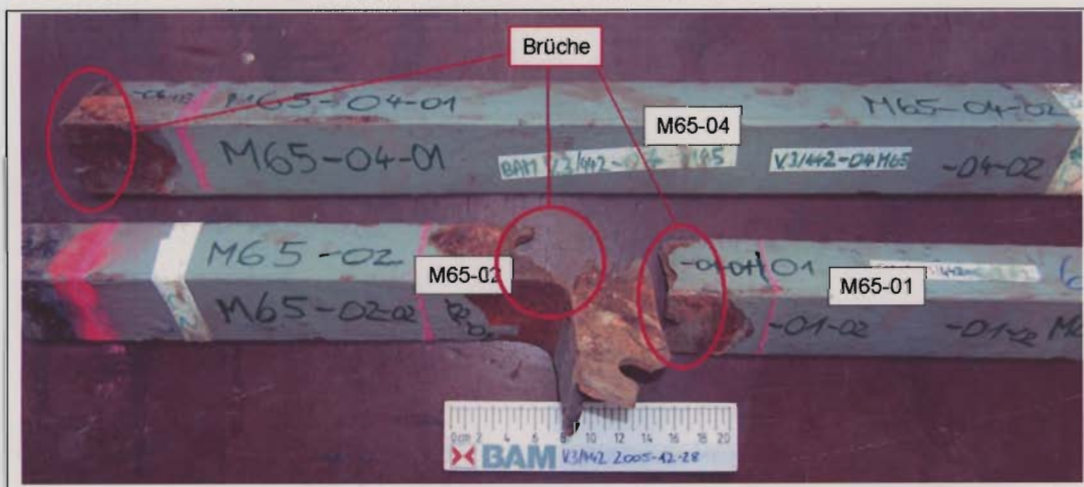


Bild 16: 1503 M65. Die entnommenen Proben M65-01, -02 und -04 nach Anlieferung an die BAM.

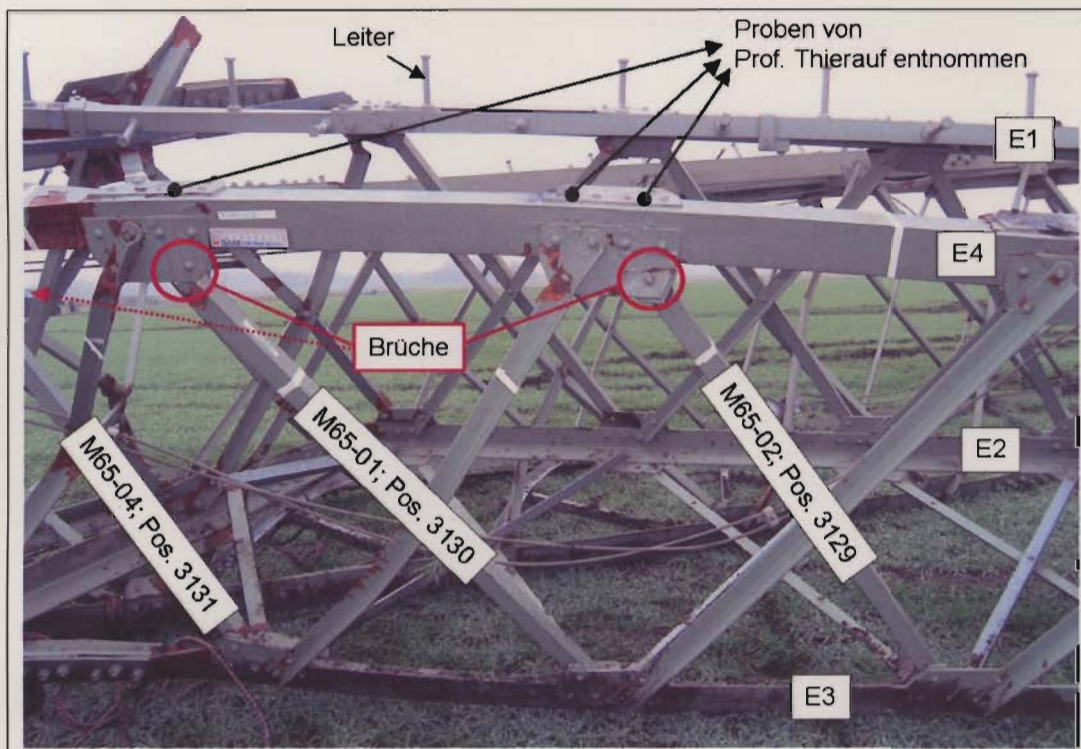


Bild 17: 1503 M65, Zuordnung der entnommenen Proben zu den Fotos. Bild vom Ortstermin 2005-12-20

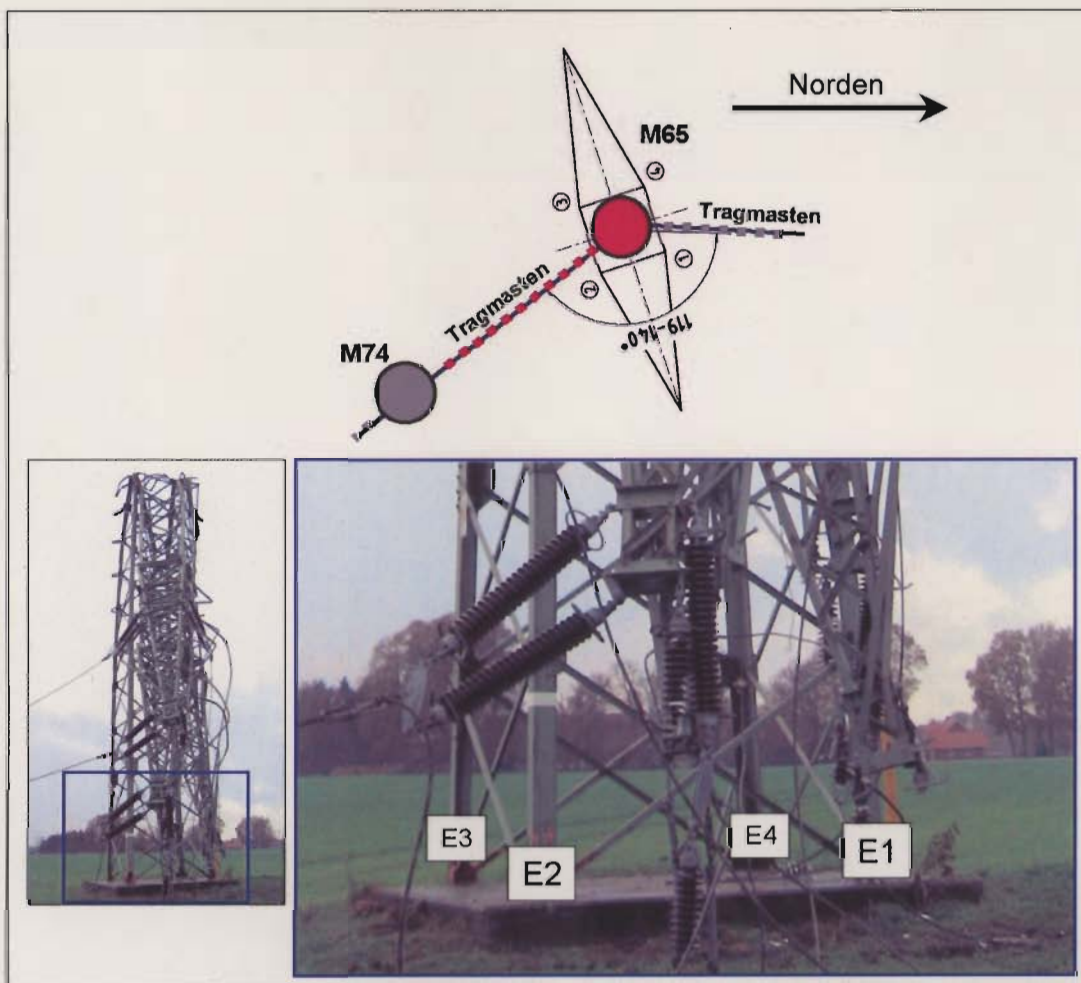


Bild 18: 1503 M65, Zuordnung der Bezeichnung der Eckstiele E1 bis E4.

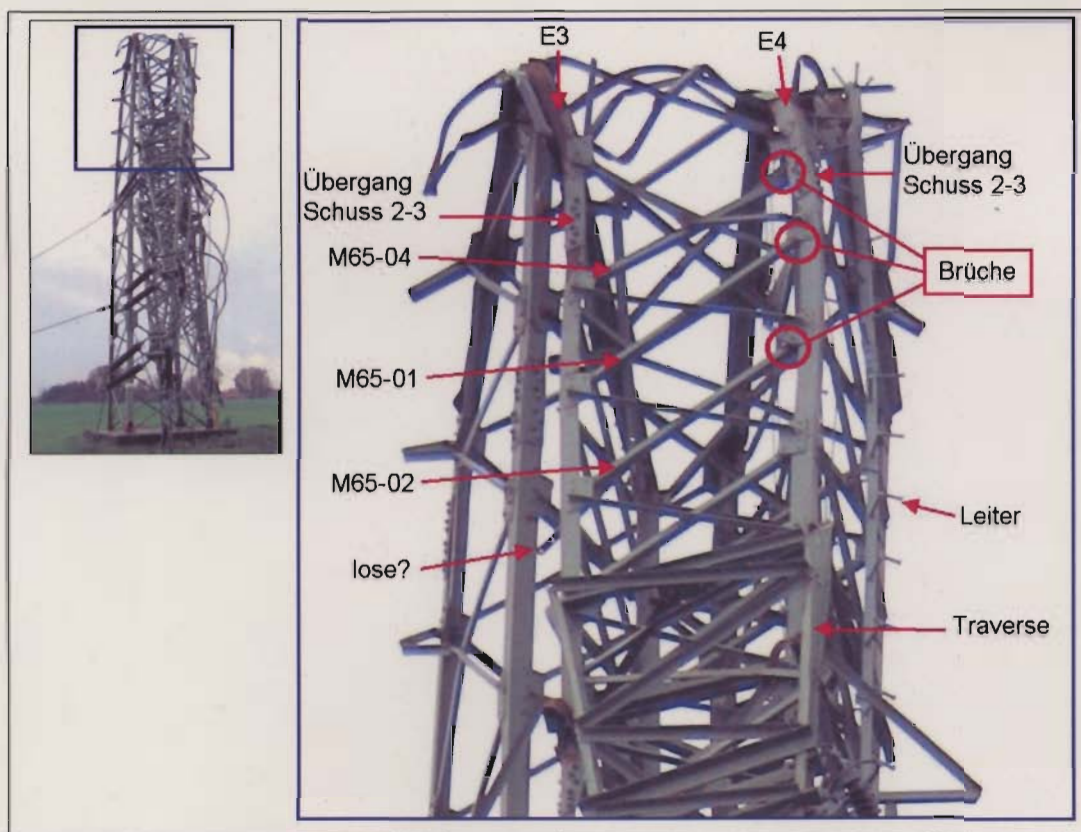


Bild 19: 1503 M65, Zuordnung der entnommenen Proben zu den Fotos.

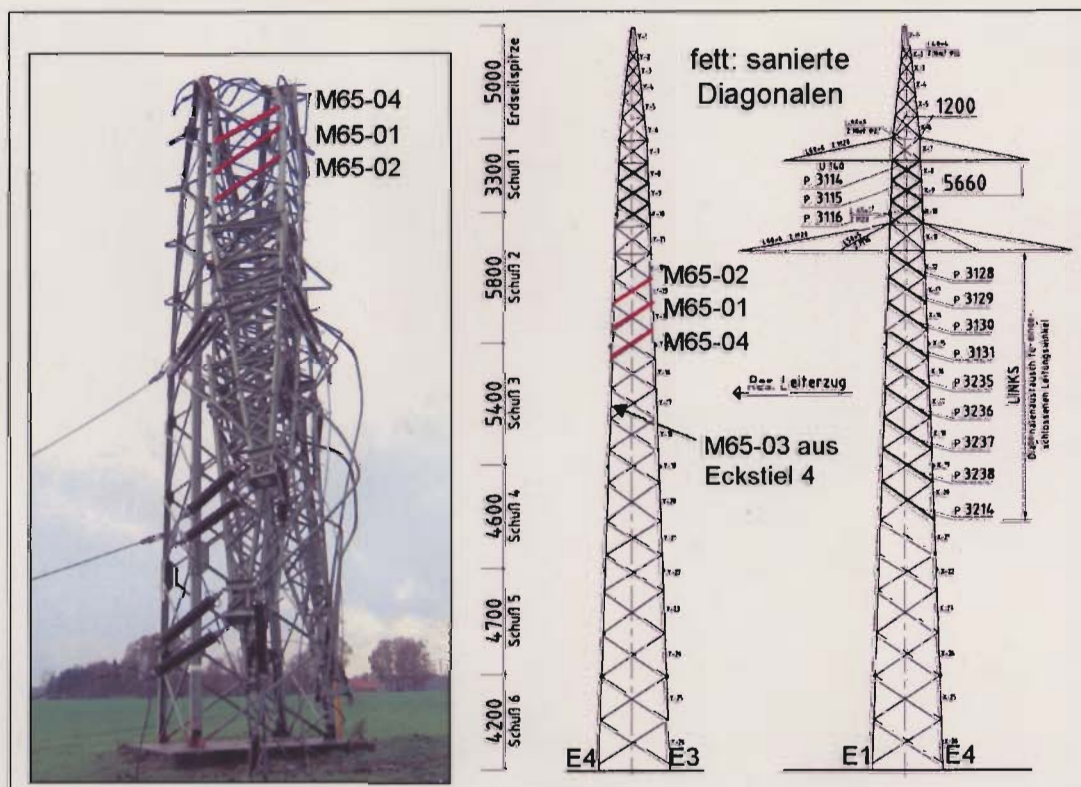


Bild 20: 1503 M65, Zuordnung der entnommenen Proben zu den Fotos.

13.4 Literaturrecherche „Versprödung Thomasstahl“

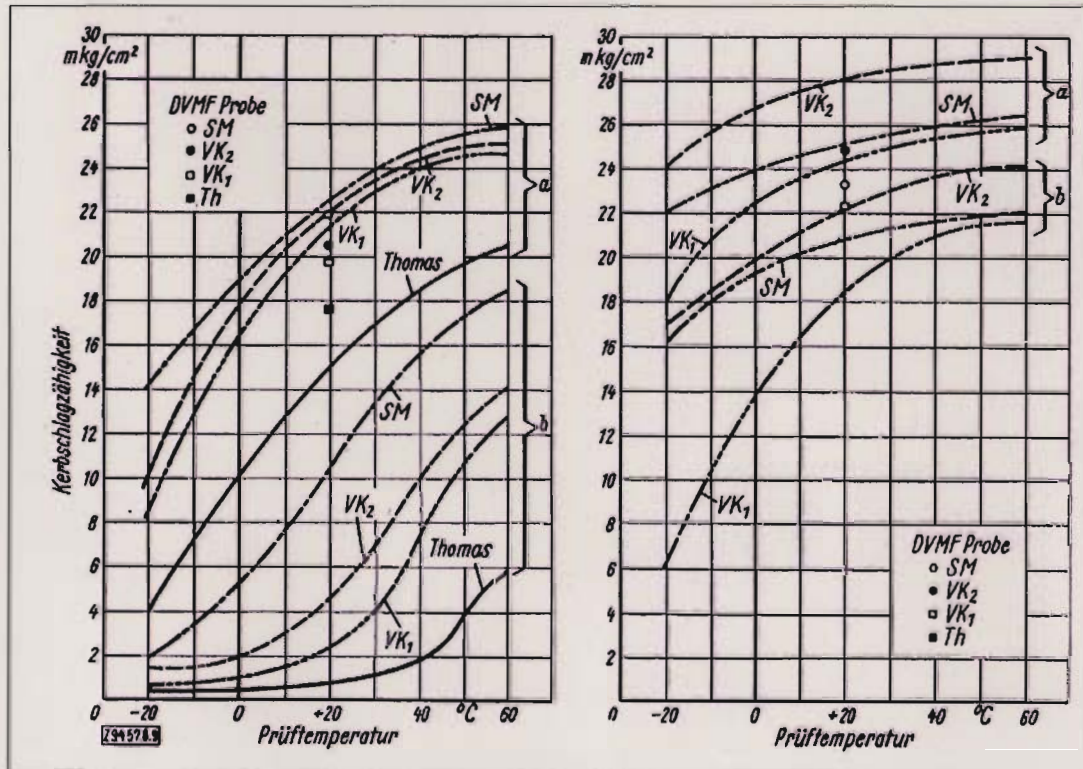


Bild 21: Kerbschlagzähigkeit unberuhigter (links) und beruhigter (rechts) Baustähle im normalgeglühten und im gealterten Zustand in Abhängigkeit von der Prüftemperatur (DVM-Probe), SM - Siemens-Martin-Verfahren, VK₁ - verbesserter Konverterstahl mit O₂ und Wind, VK₂ - verbesserter Konverterstahl mit O₂ und H₂O, Th - Thomas-Verfahren, a - normalgeglüht, b - gealtert (Anm.: Der verbesserte Konverterstahl führt in DIN 17100 auch die Bezeichnung „W“.), [2]

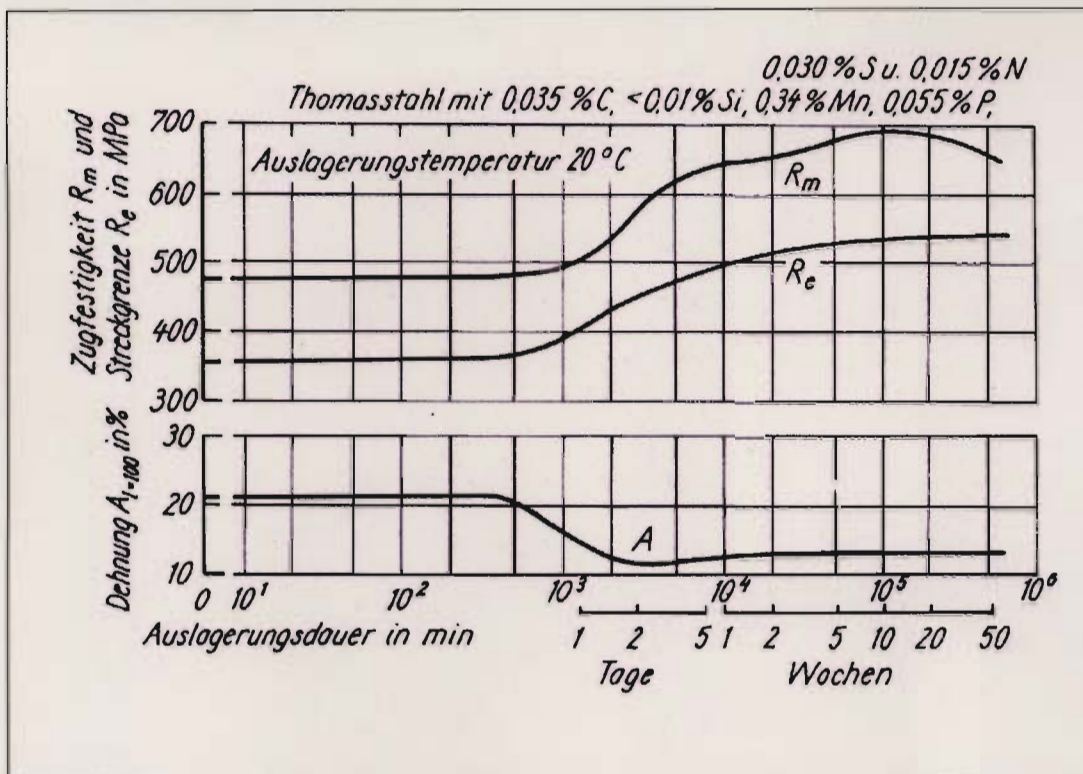


Bild 22: Veränderung der mechanischen Eigenschaften eines Thomasstahls durch Alterung nach beschleunigter Abkühlung, Auslagerungstemperatur 20 °C, [19]

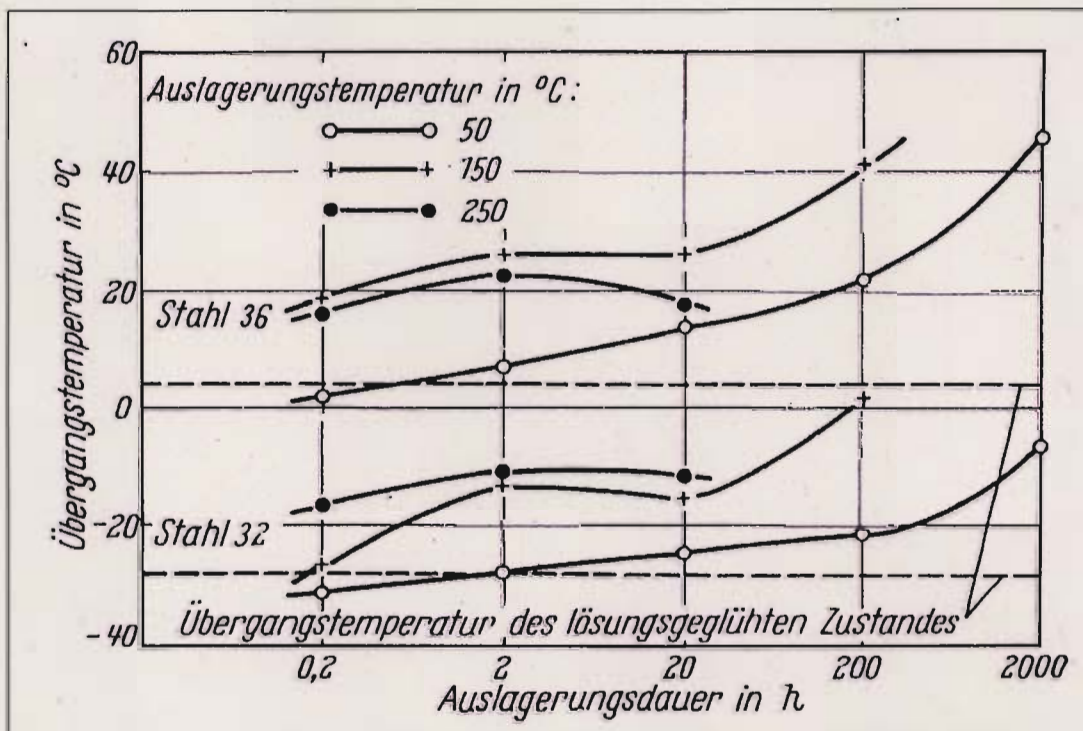


Bild 23: Übergangstemperatur der Kerbschlagzähigkeit in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer bei verschiedenen Auslagerungstemperaturen, keine Vorverformung, Stahl 36 – unberuhigter Thomasstahl, Stahl 32 – Si-beruhigter SM-Stahl, [29]

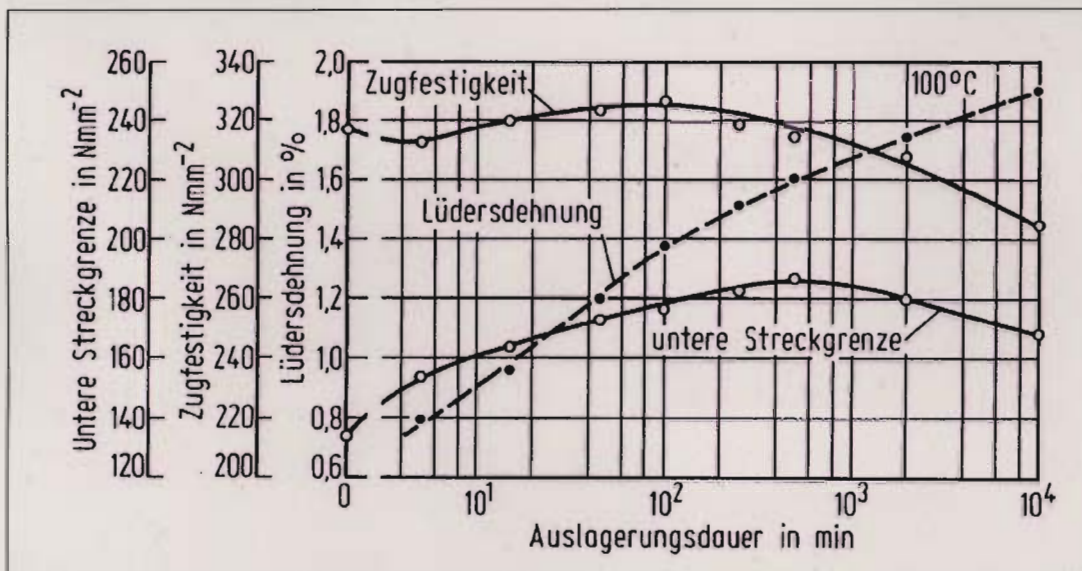


Bild 24: Mechanische Eigenschaften eines Stahls mit 0,022 % Stickstoff und 0,25 % Mangan in Abhängigkeit von der Auslagerungsdauer, Auslagerungstemperatur 100 °C, [17]

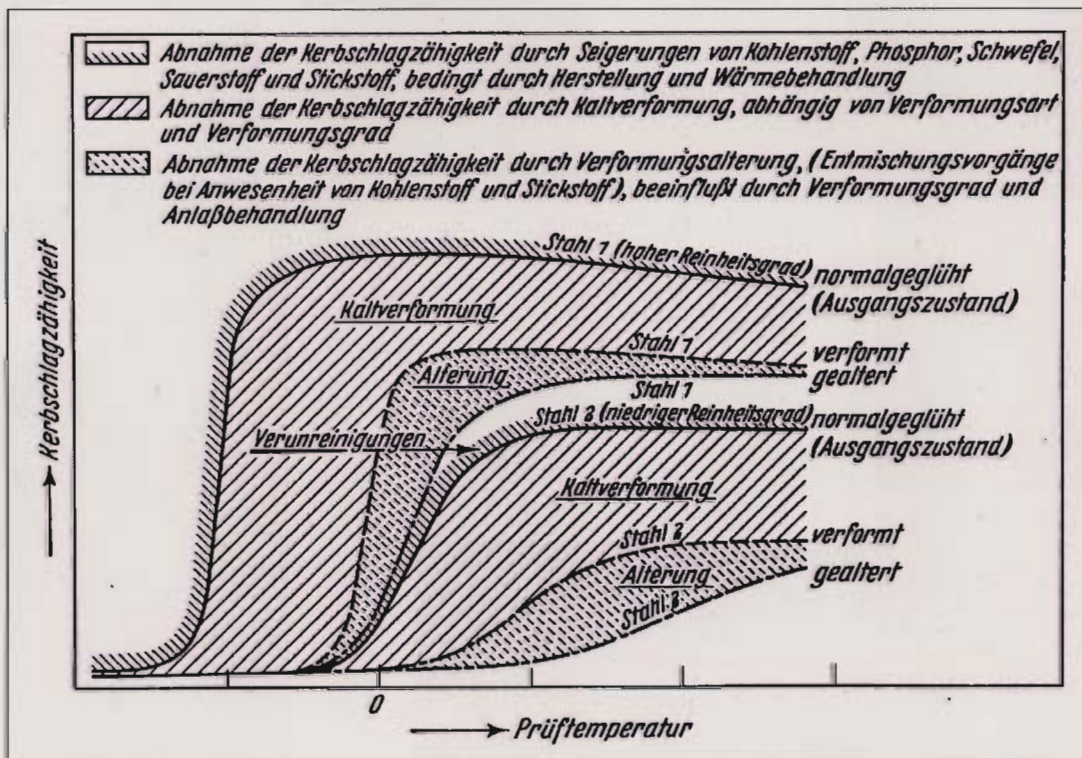


Bild 25: Schematische Darstellung der Einflüsse von Seigerungen, Kaltverformung und Reckalterung auf die Lage der Kerbschlagzähigkeit-Temperatur-Kurven für Baustahl mit niedrigem Kohlenstoffgehalt (Stahl 1 – hoher Reinheitsgrad, Stahl 2 – niedriger Reinheitsgrad), [33]

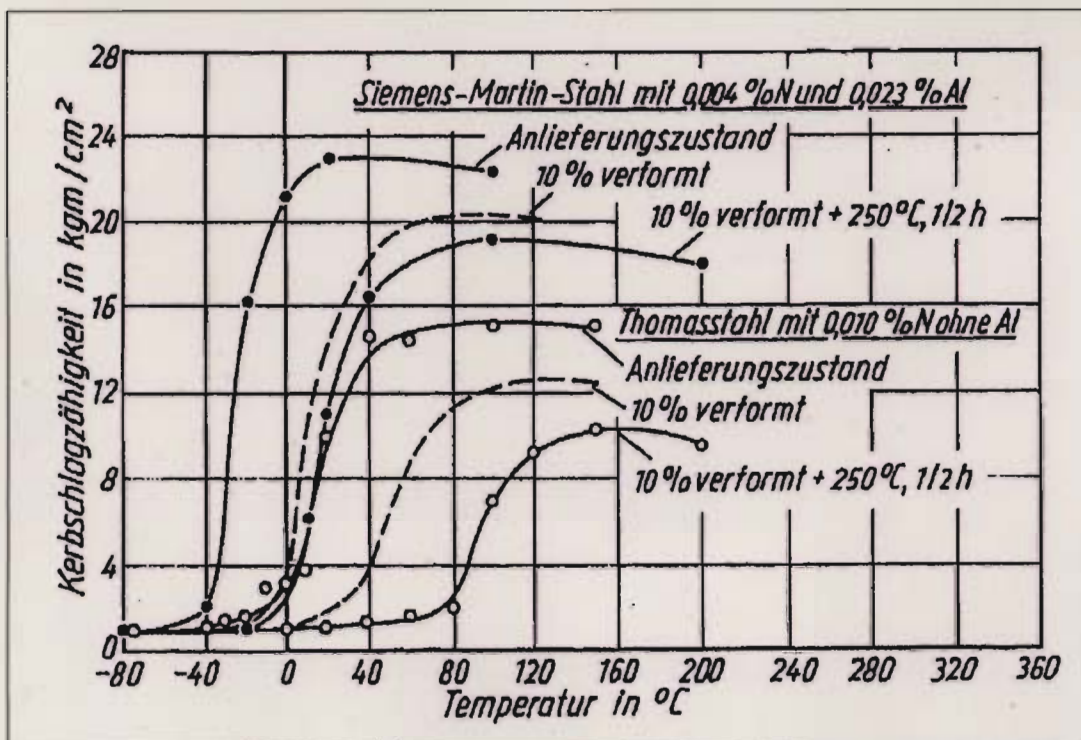


Bild 26: Kerbschlagzähigkeit-Temperatur-Kurven für beruhigten Stahl ohne und mit freiem Stickstoff im Anlieferungszustand, nach Verformung und nach künstlicher Alterung (DVM-Proben), [13]

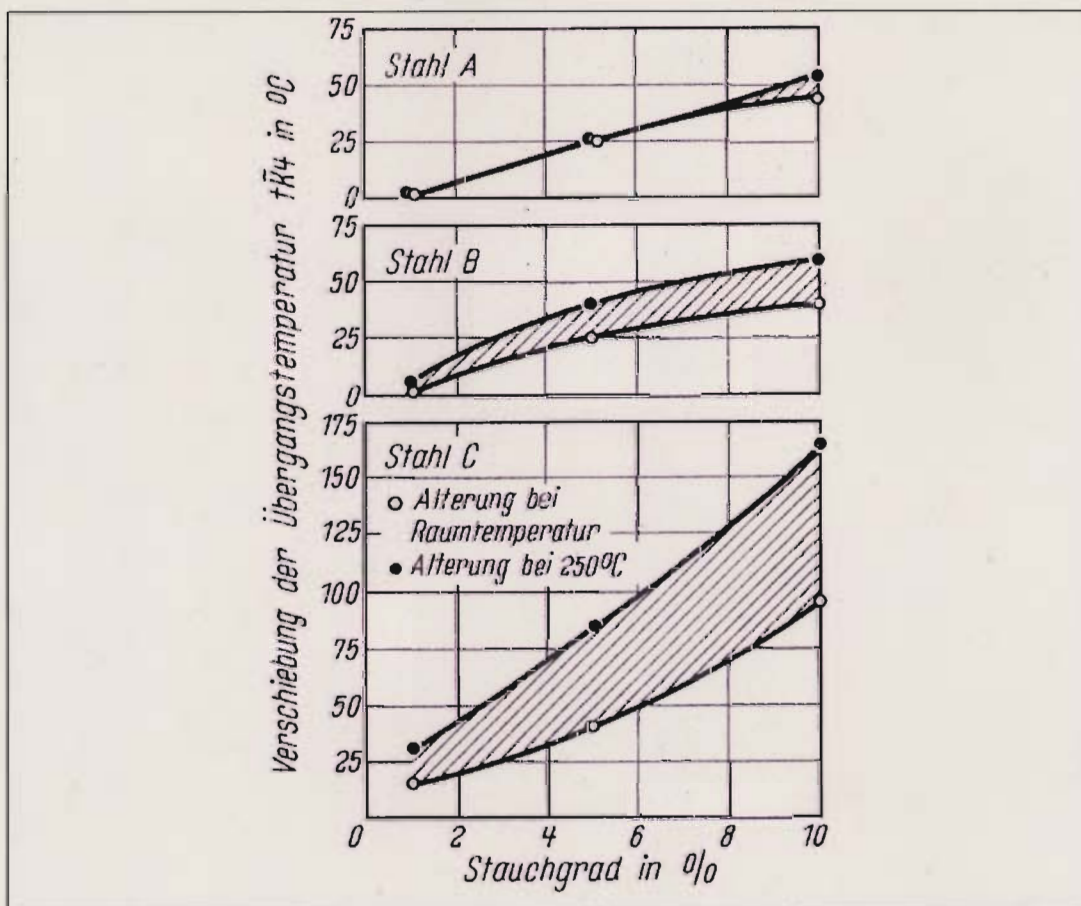


Bild 27: Durch natürliche und künstliche Alterung hervorgerufene Verschiebung der Übergangstemperatur für unterschiedliche Stähle in Abhängigkeit vom Stauchgrad, Stahl A – mit Si und Al beruhigter feinkörniger SM-Stahl, Stahl B – halbberuhigter SM-Stahl, Stahl C – unberuhigter Thomasstahl, [24]

13.5 Reihenfolge des Versagens der Masten

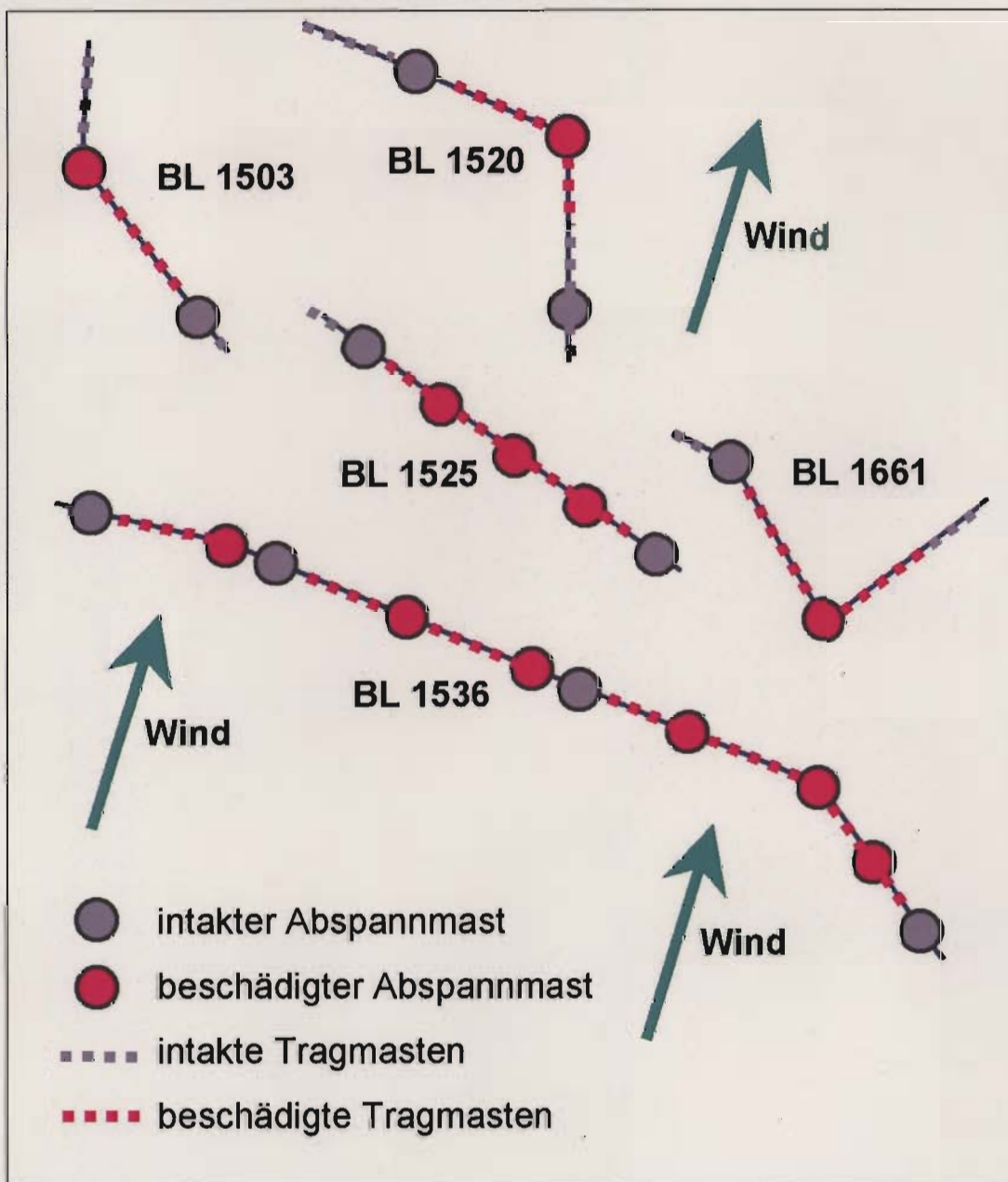


Bild 28: Schematische Übersicht über die zusammenhängenden Schäden an 5 Stromfreileitungen. Die Darstellungen sind nicht maßstäblich. Es ist nur eine gemittelte Windrichtung eingetragen.

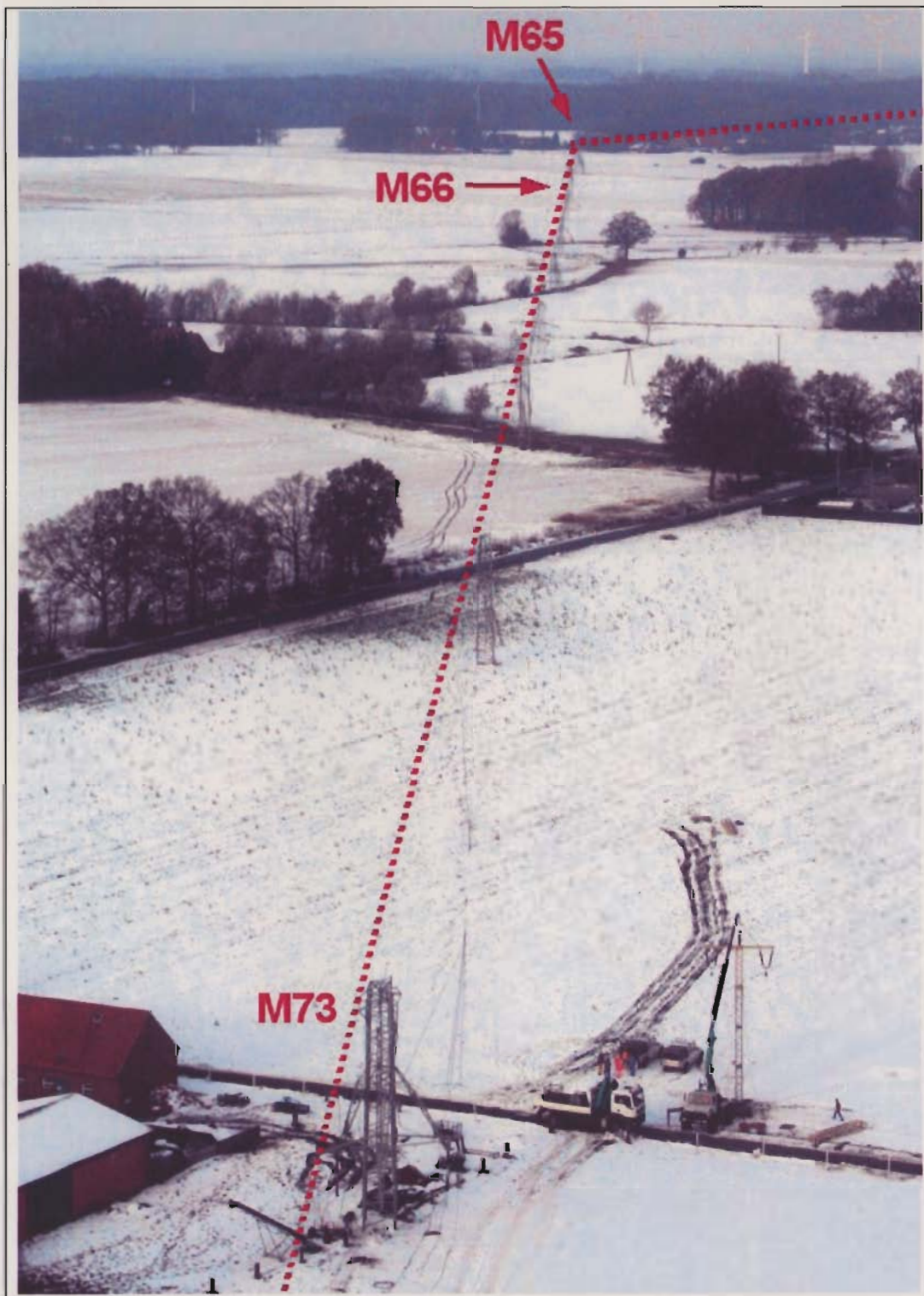


Bild 29: Übersicht über den vom Schadensereignis betroffenen Teil der Freileitung 1503 mit den Masten 65 bis 73. Mast 74 wurde an den Traversen beschädigt, alle anderen sind unbeschädigt. Luftbild RWE.

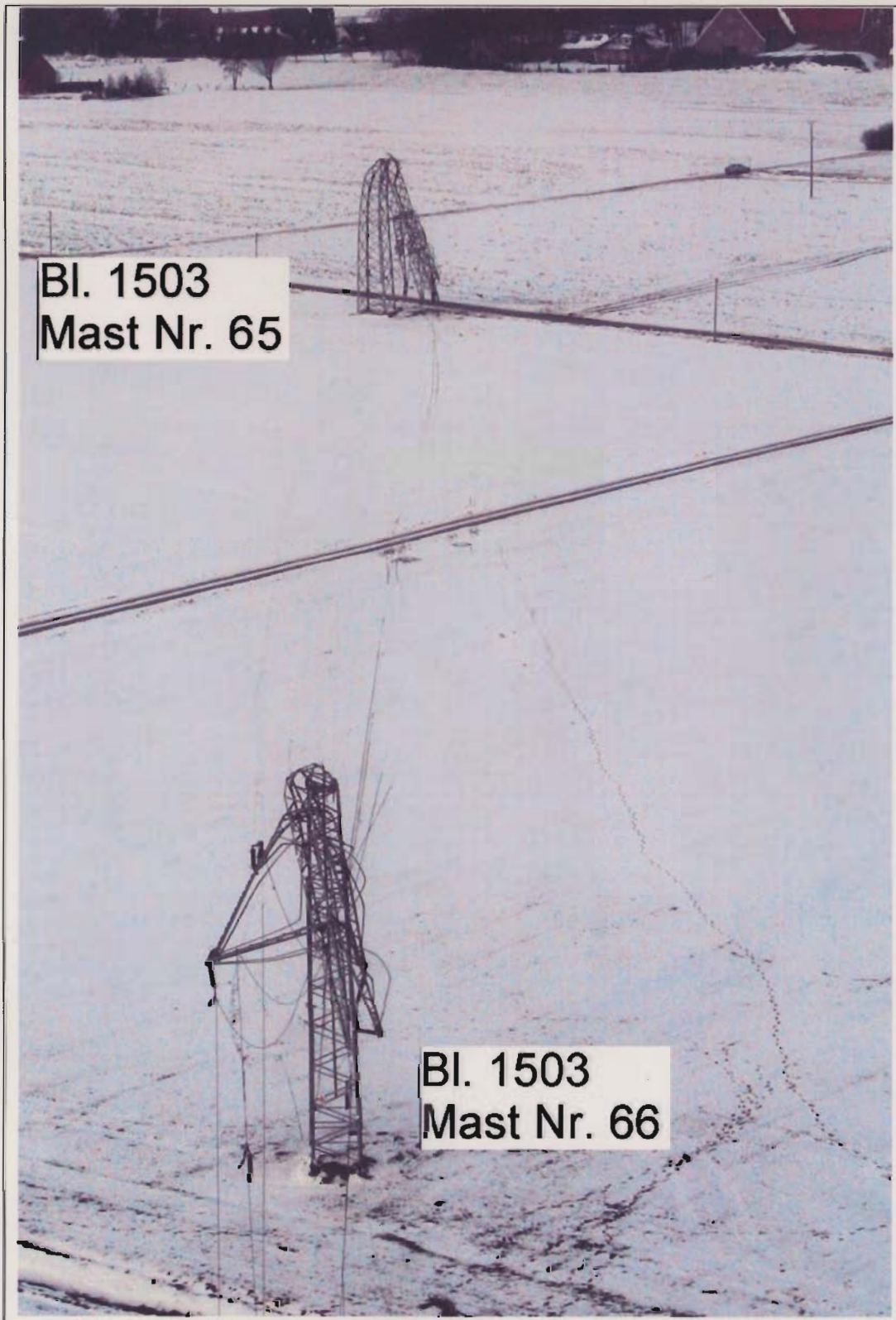


Bild 30: Freileitung 1503, Masten 65 und 66 aus Richtung Süd. Ausschnitt aus Luftbild RWE.

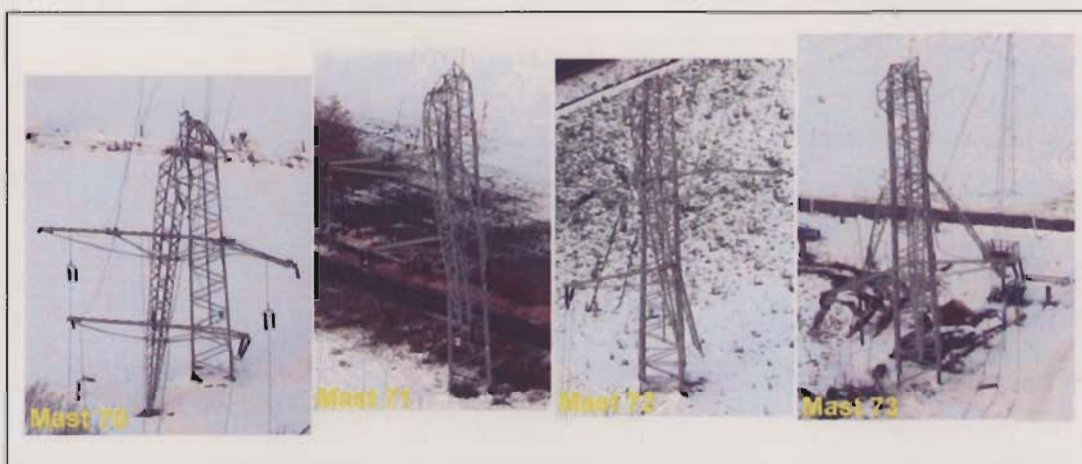
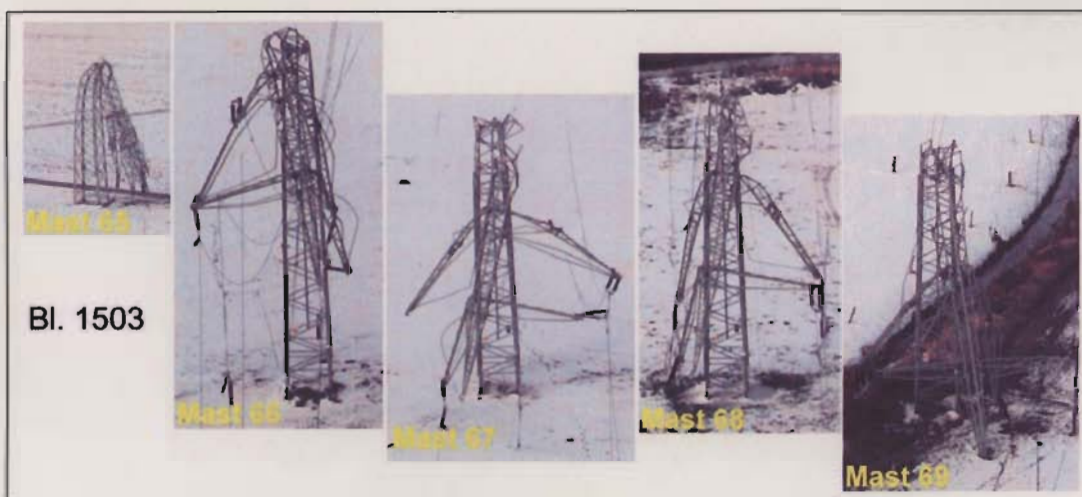


Bild 31: Freileitung 1503, Übersicht über die geknickten Masten, Ansicht von Süden. Vergrößert aus den Luftbildern von RWE. Die Masten 66 bis 73 sind alle Richtung Süden geknickt.



Bild 32: Freileitung 1503, Mast 70, Ansicht von Süd. Die Seile liegen alle auf der Westseite des Masts.



Bild 33: Freileitung 1503, Mast 72, Ansicht von Nord. Die Seile liegen alle auf der Westseite des Masts.

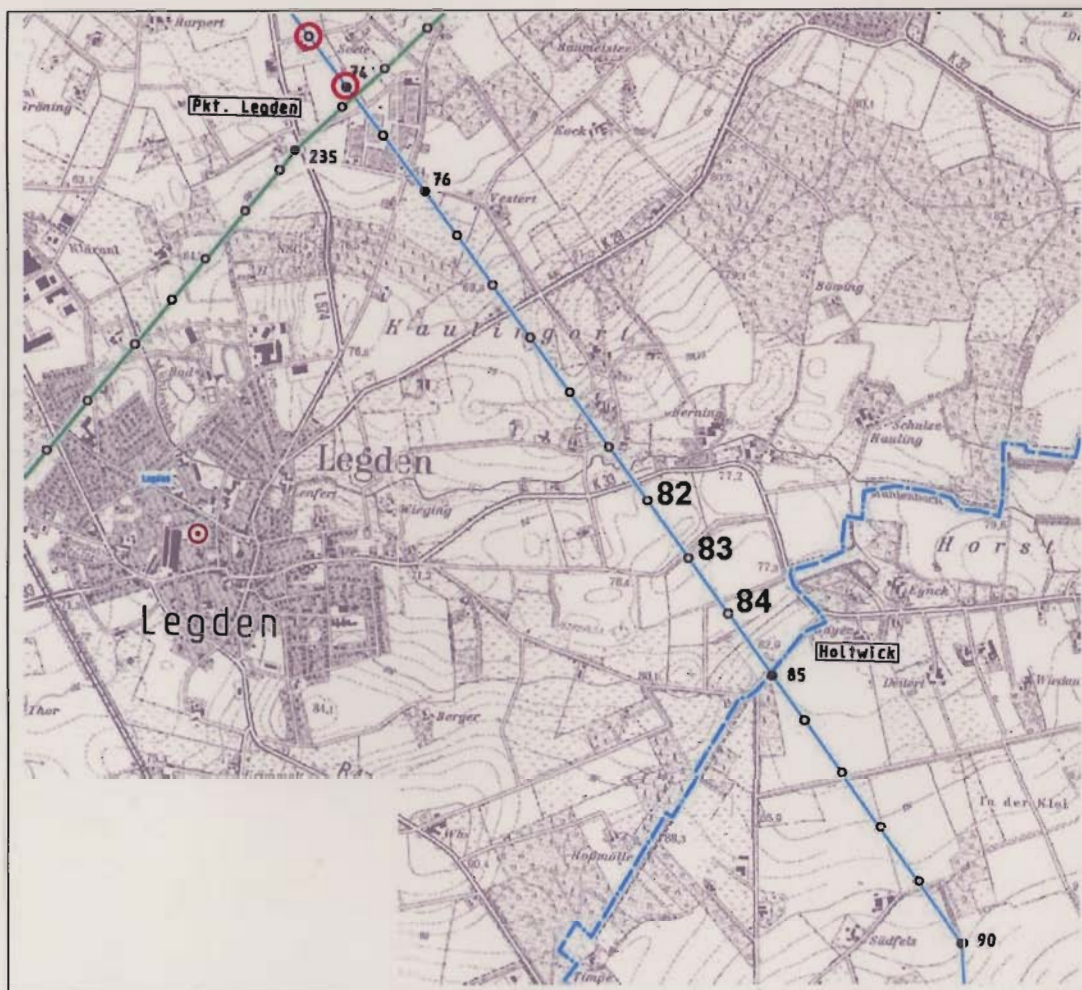


Bild 34: Freileitung 1503, Schadensbereich um die Masten 82 bis 85.



Bild 35: Freileitung 1503, Masten 82, 83 etc., Blick Richtung Süd. Bild RWE, 28.11.2005, 13:51 Uhr, nachbearbeitet.

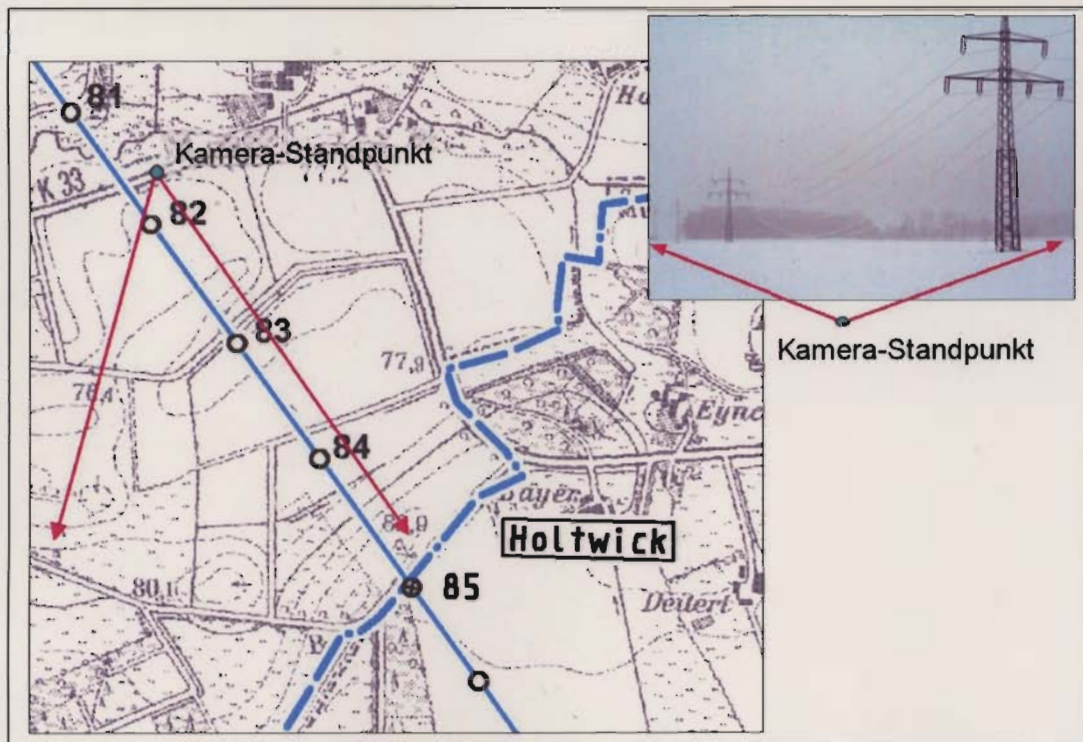


Bild 36: Freileitung 1503, Schadensbereich um die Masten 82 bis 85. Die Pfeile kennzeichnen den Blickwinkel der Kamera in Bild 35.

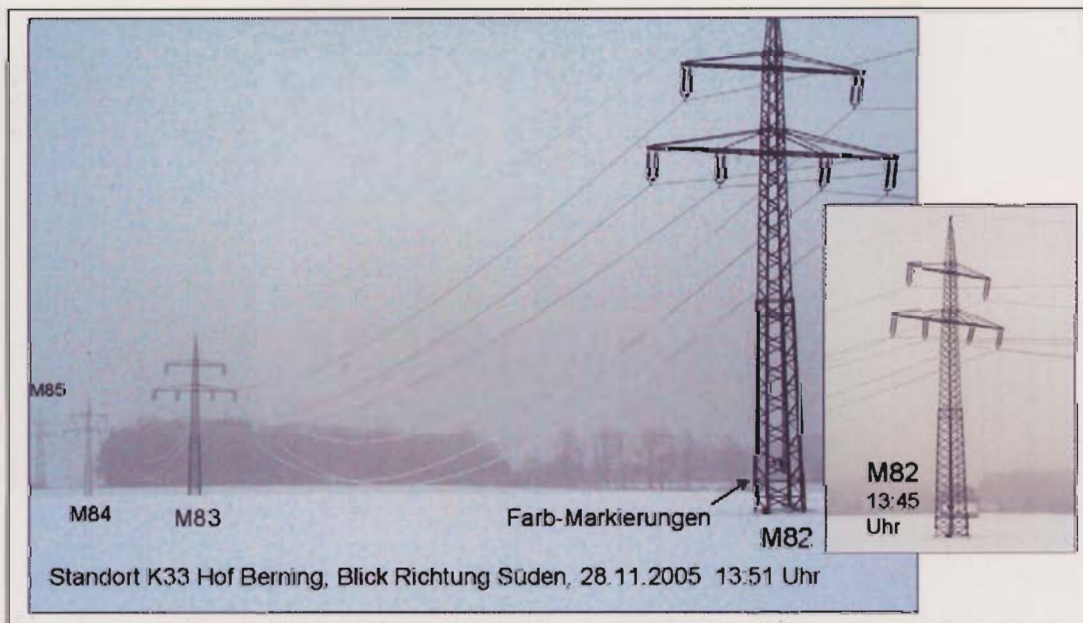


Bild 37: Freileitung 1503, Masten 82, 83 etc., Blick Richtung Süd (großes Bild, RWE, 28.11.2005, 13:51 Uhr, nachbearbeitet). Das kleine Bild zeigt eine weitere Aufnahme, die zur Identifikation herangezogen werden konnte.

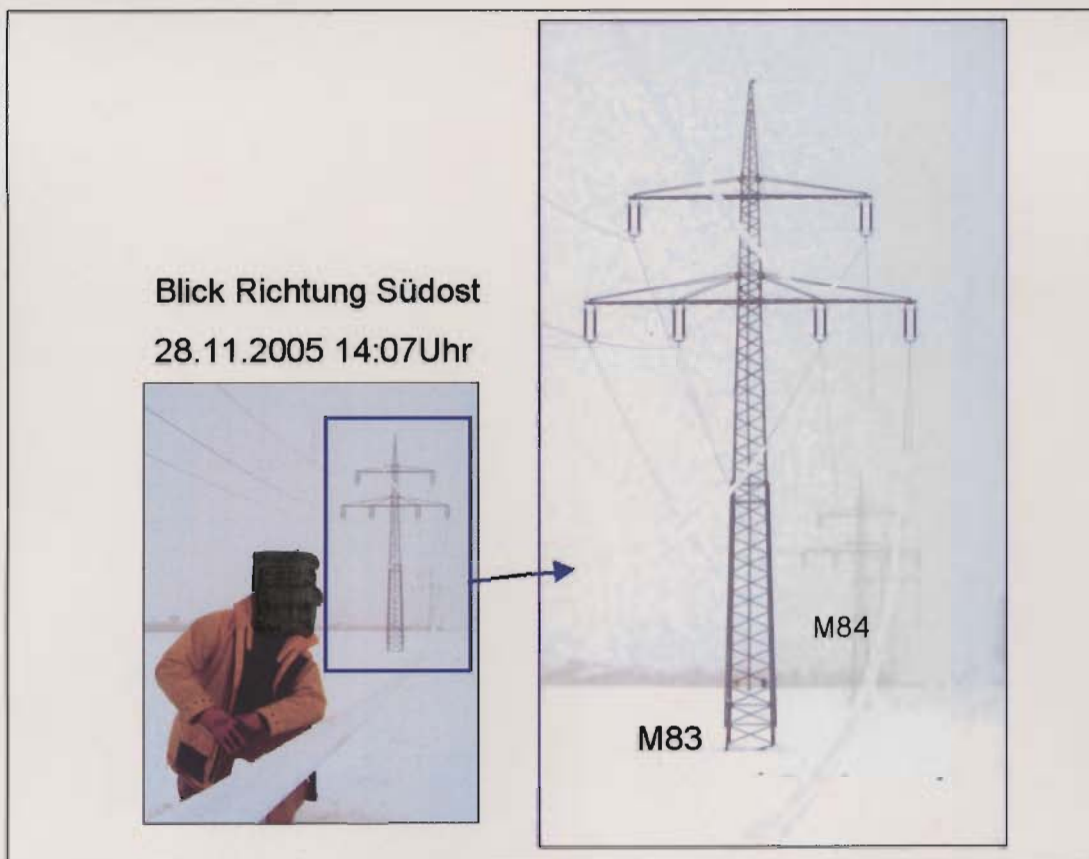


Bild 38: Freileitung 1503, Masten 83, 84 etc., Blick Richtung Südost. Bild RWE, nachbearbeitet.

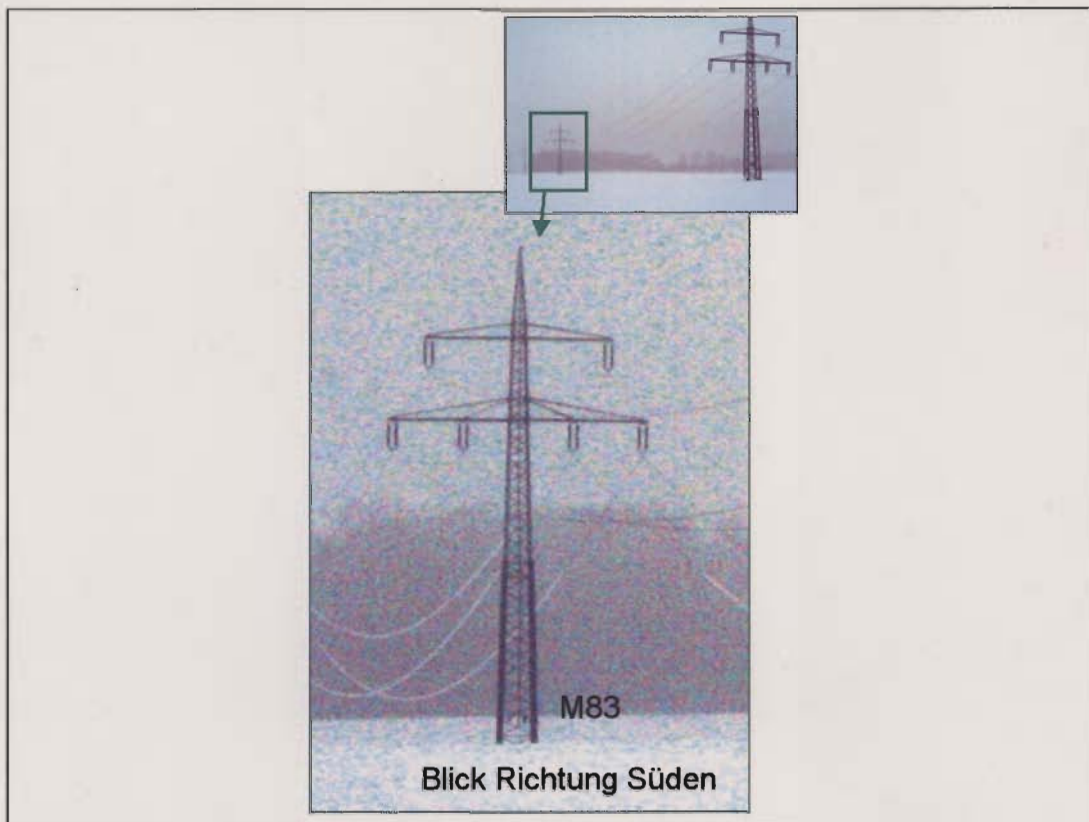


Bild 39: Freileitung 1503, Mast 83, Blick Richtung Süd. Bild RWE, nachbearbeitet.



Bild 40: Freileitung 1503, Mast 89, aus Screencopy aus Gutachten Thierauf (Bild 18, nachbearbeitet und mit Bezeichnungen versehen). Blick Richtung Südost.

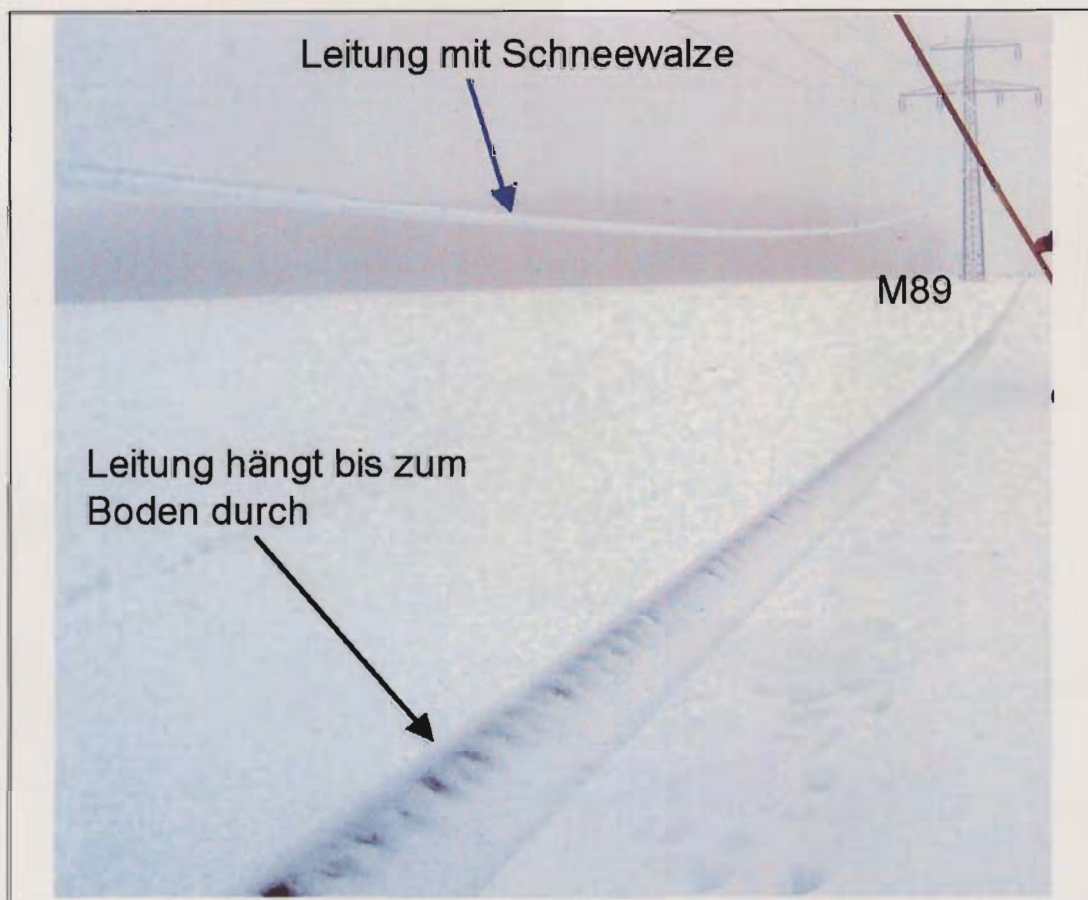


Bild 41: Freileitung 1503, Mast 89, Bild RWE. Blick Richtung Südost. Die Seile liegen an der Oberseite praktisch frei (oberer Pfeil) Einer der unteren Leitungen hängt bis zum Boden durch (unterer Pfeil).



Bild 42: Freileitung 1503, zwischen den Masten M81 und M82, Blick Richtung Osten. Bild RWE, Aufnahme am 28.11.2005, 14:08 Uhr, nachbearbeitet. Die Schneewalzen werden abgeschlagen.



Bild 43: Freileitung 1503, zwischen den Masten M81 und M82, Ausschnitt aus dem vorigen Bild. Die Schneewalzen werden abgeschlagen und lösen sich stückweise.

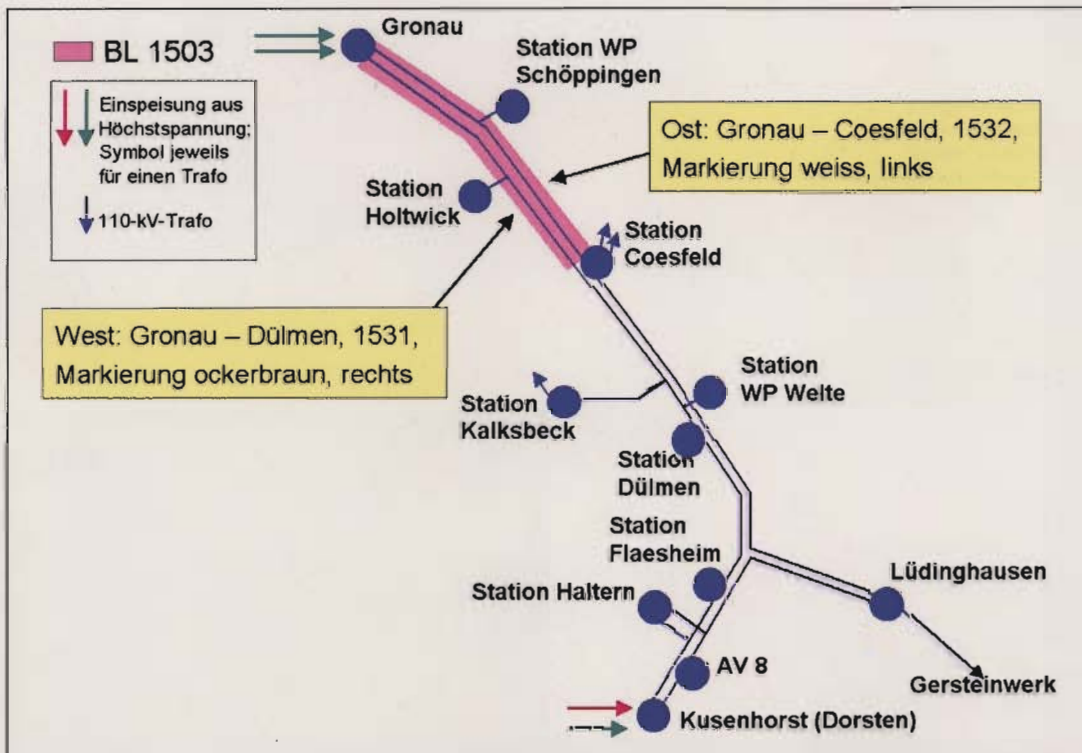


Bild 44: Betriebsführung der BL1503. Die Masten tragen im Bereich der BL1503 2 Teilsysteme, 1531 (links) und 1532 (rechts).

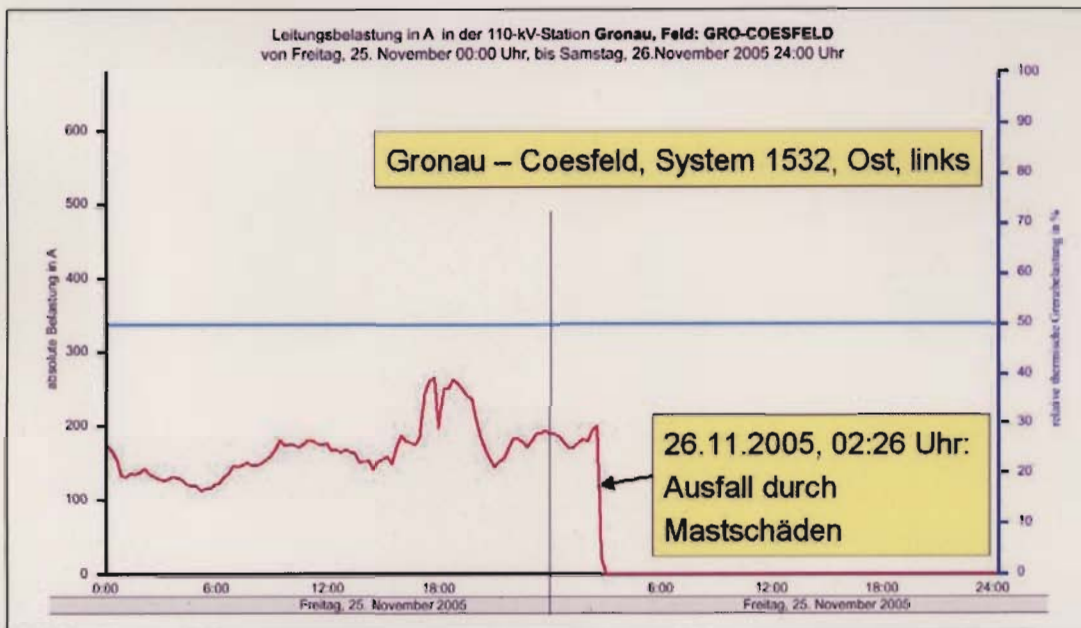


Bild 45: Betriebsführung der BL1503. Belastung des Teilsystems 1532 im Zeitraum des Schadensereignisses.

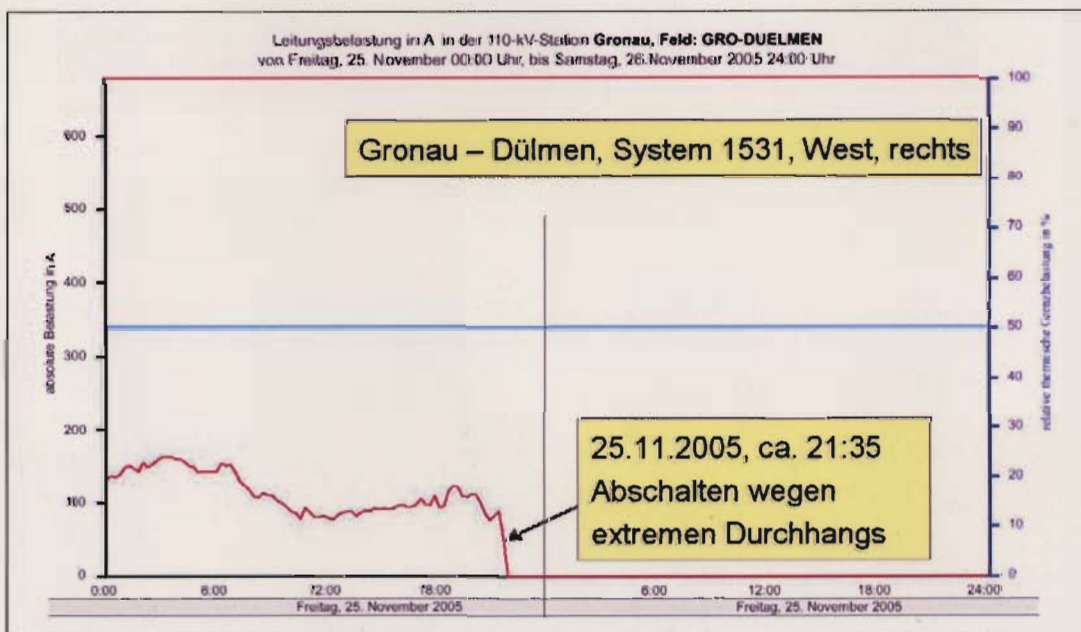


Bild 46: Betriebsführung der BL1503. Belastung des Teilsystems 1531 im Zeitraum des Schadensereignisses.

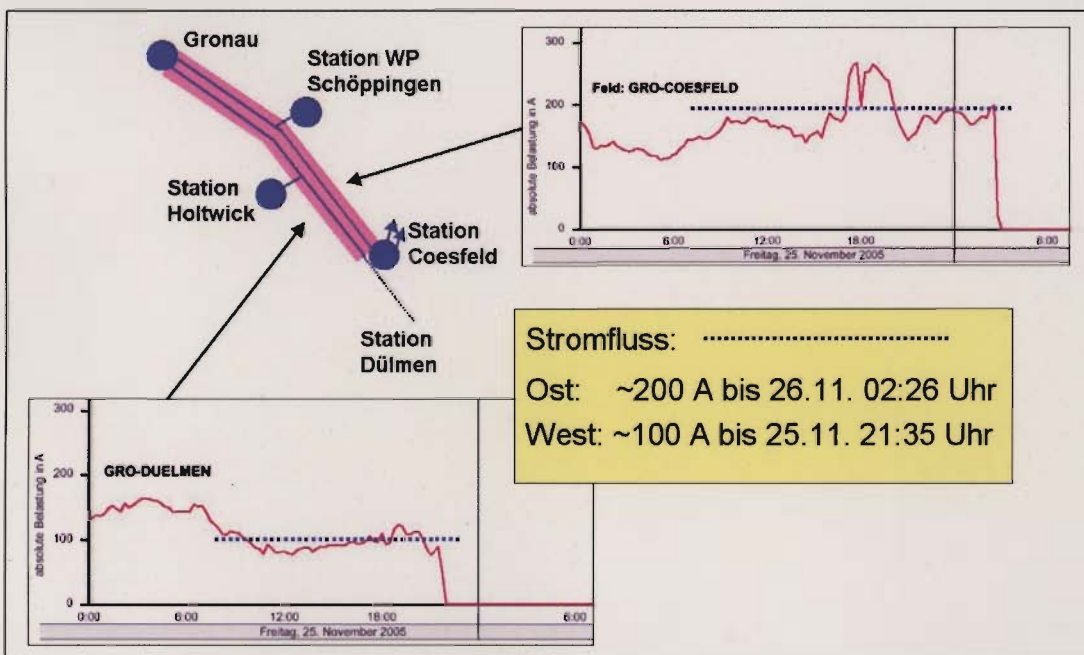


Bild 47: Betriebsführung der BL1503. Abschätzung der mittleren Belastung der Teilsysteme 1531 und 1532 im Zeitraum des Schadensereignisses.



Bild 48: Betriebsführung der BL1503. Gegenüberstellung der mittleren Belastung der Teilsysteme 1531 und 1532 im Zeitraum des Schadensereignisses und der Schneebelegung der Teilsysteme am Mast 83 (vgl. Bild 39).

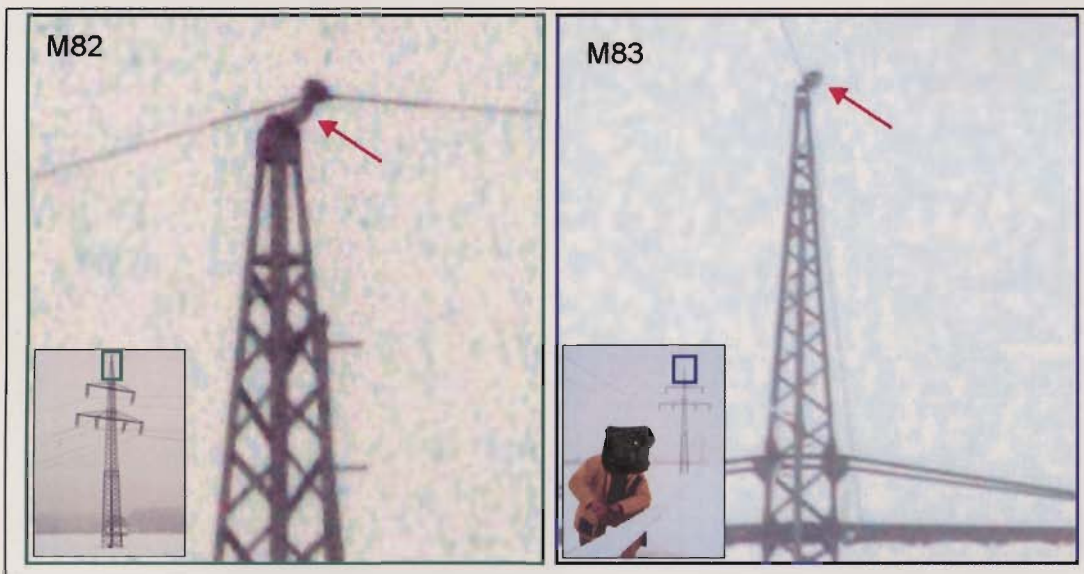


Bild 49: BL1503: C-Böcke M82 und M83. Beide C-Böcke sind verbogen.

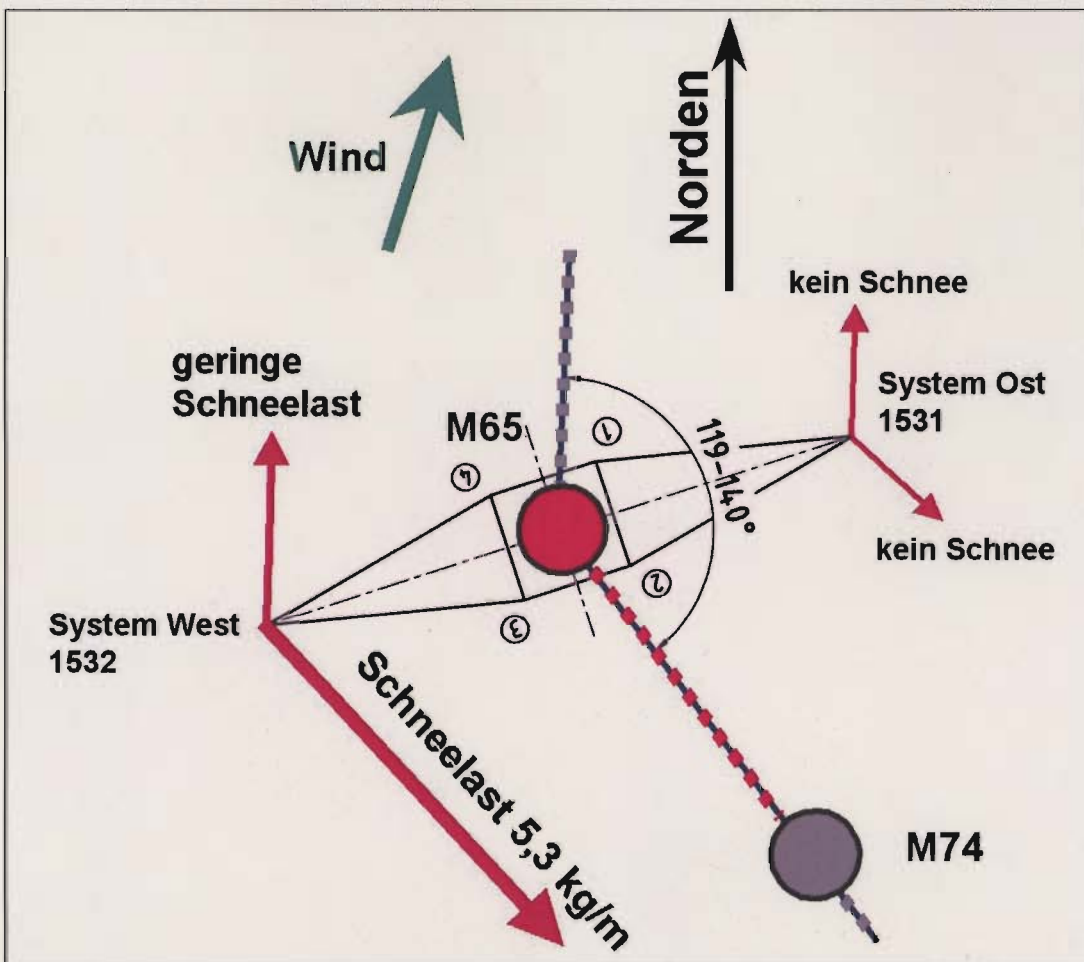


Bild 50: Vermutete Schneebelegung der Freileitung BL1503 im Bereich des Masts M65.

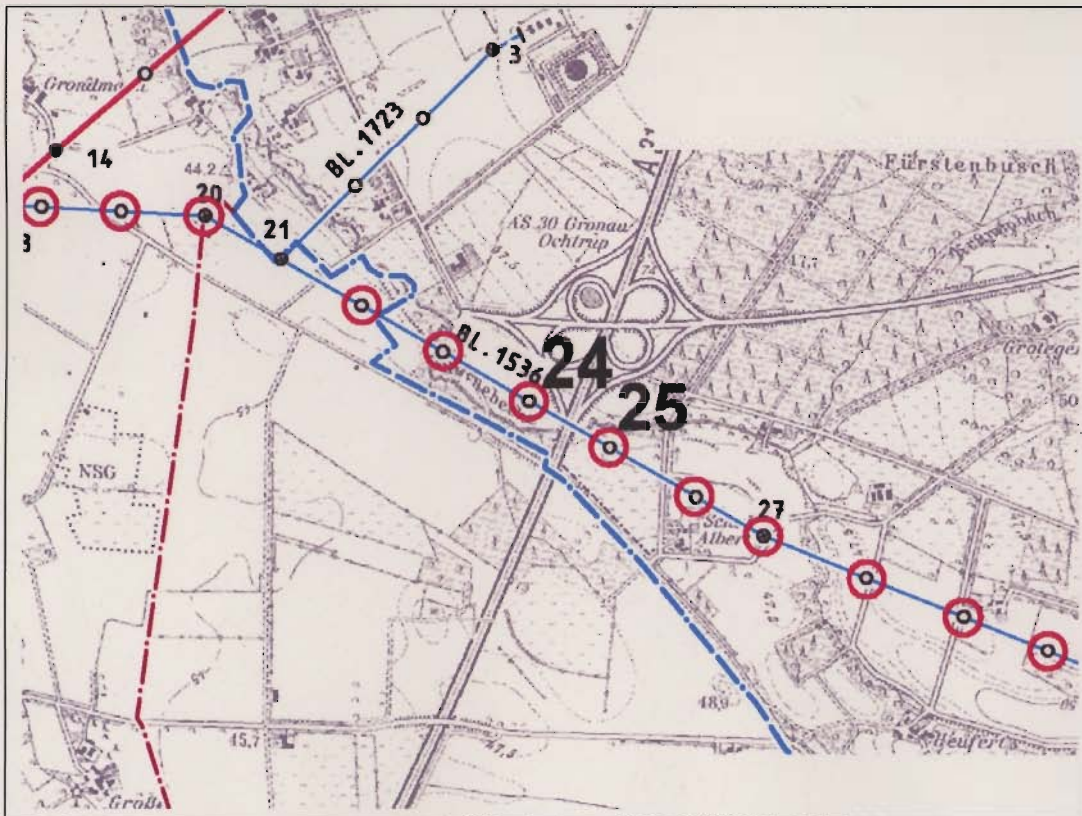


Bild 51: Freileitung 1536, mittlerer Schadensbereich um den Mast 24 mit Baujahr 2000.

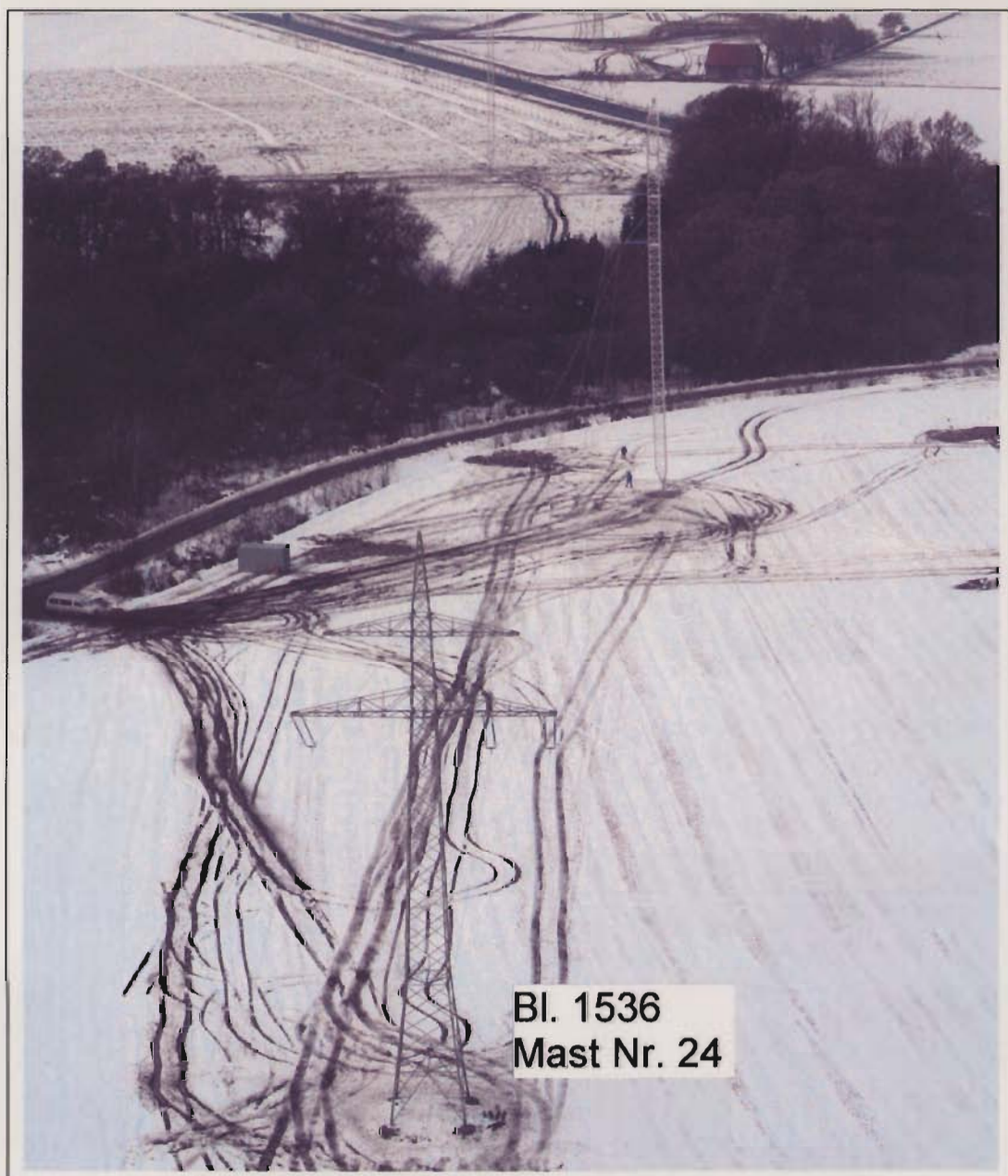


Bild 52: Freileitung 1536, Luftbild Mast 24, Blick Richtung West. Die Masten dahinter (M23 etc.) wurden bereits ersetzt.

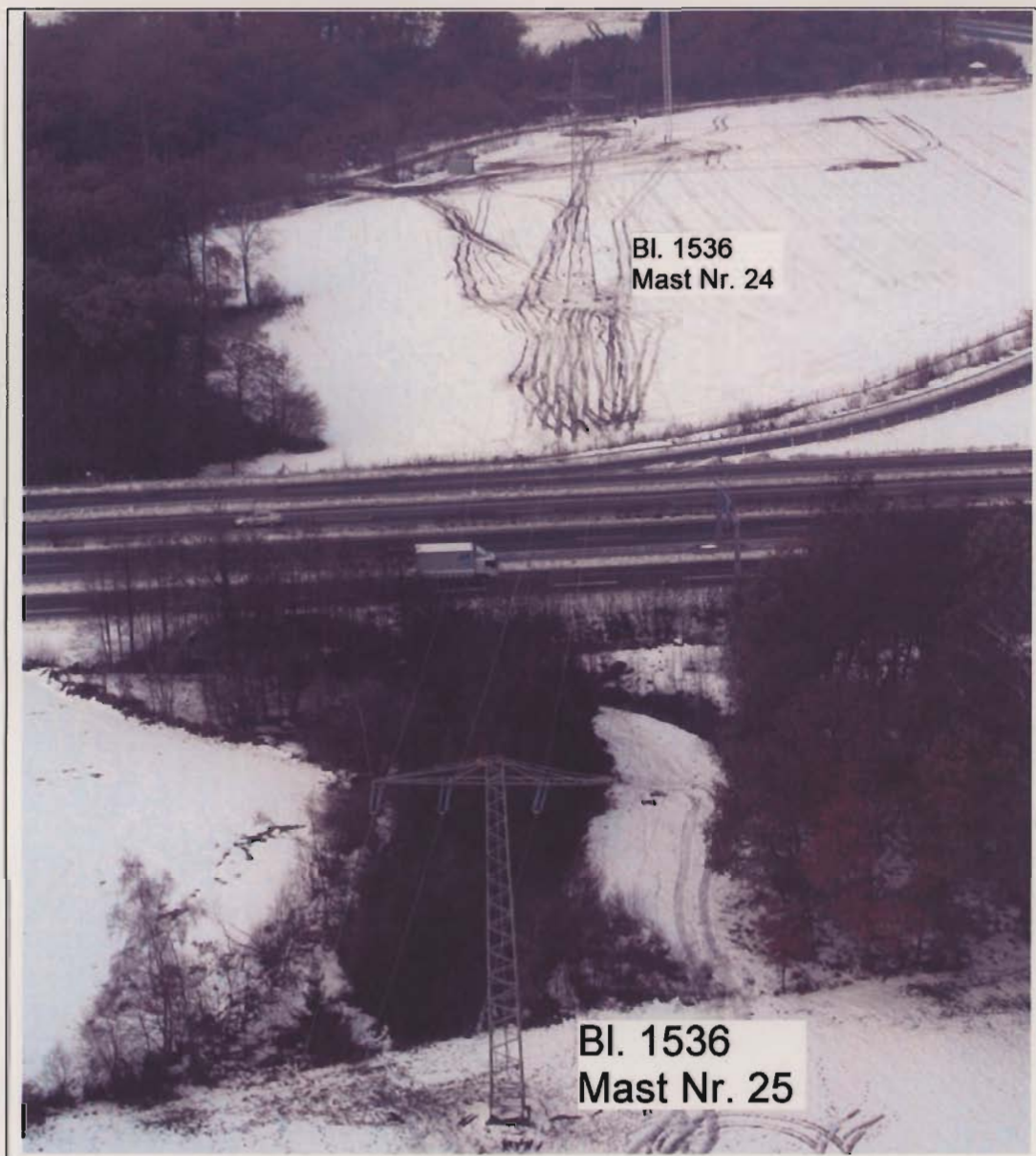


Bild 53: Freileitung 1536, Luftbild Masten 25 und 24, Blick Richtung West.

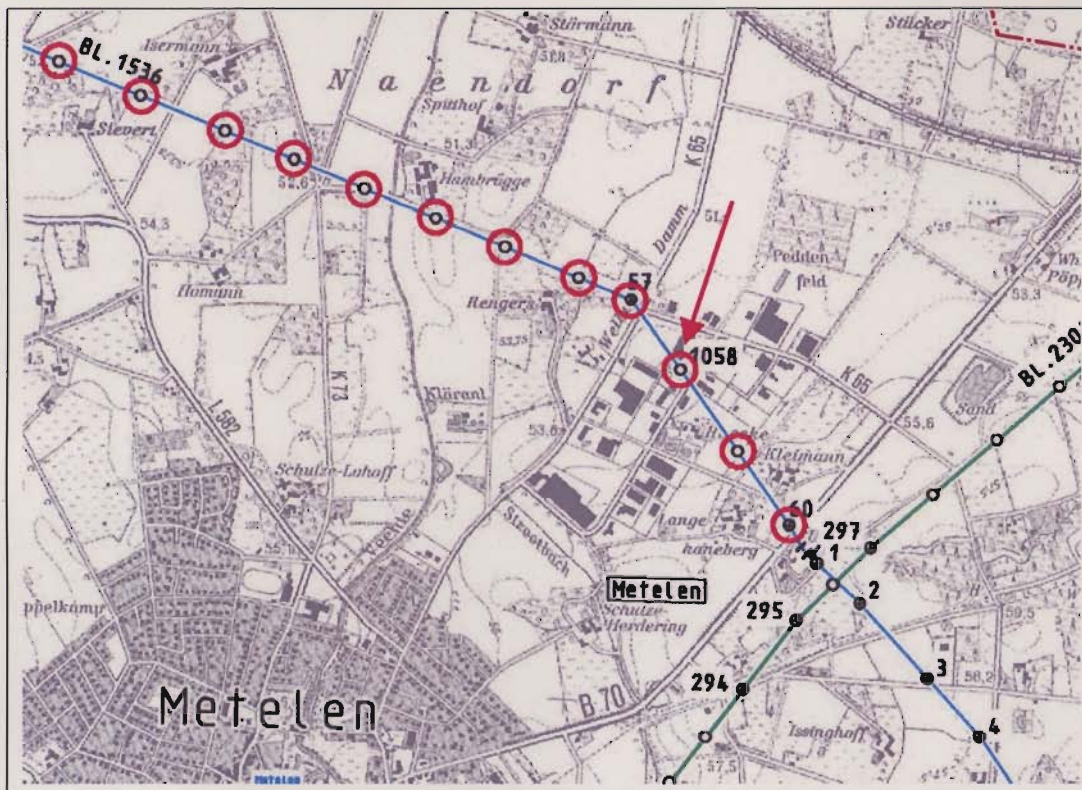


Bild 54: Freileitung 1536, östlicher Schadensbereich um den Mast 1058 mit Baujahr 2004.

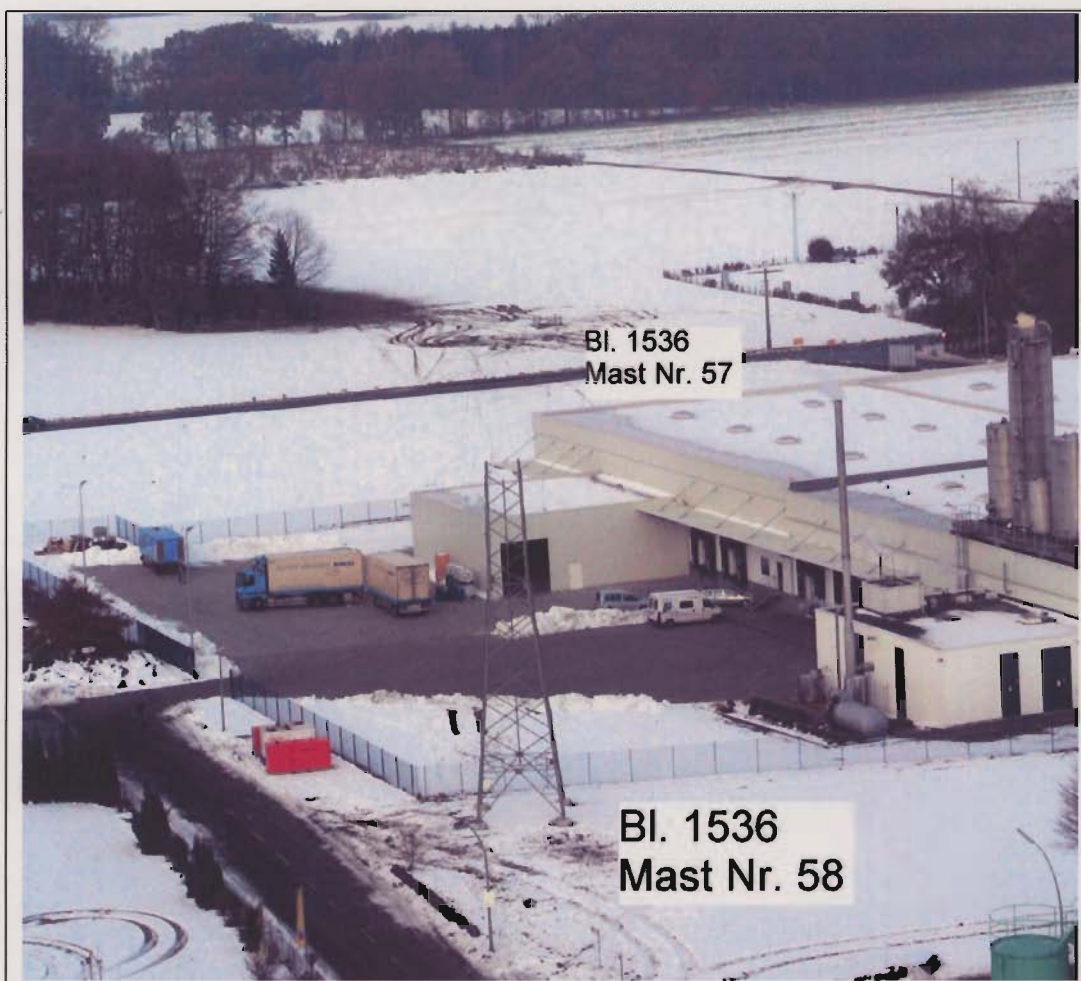


Bild 55: Freileitung 1536, Luftbild Masten 58 und 57, Blick Richtung Nordwest.

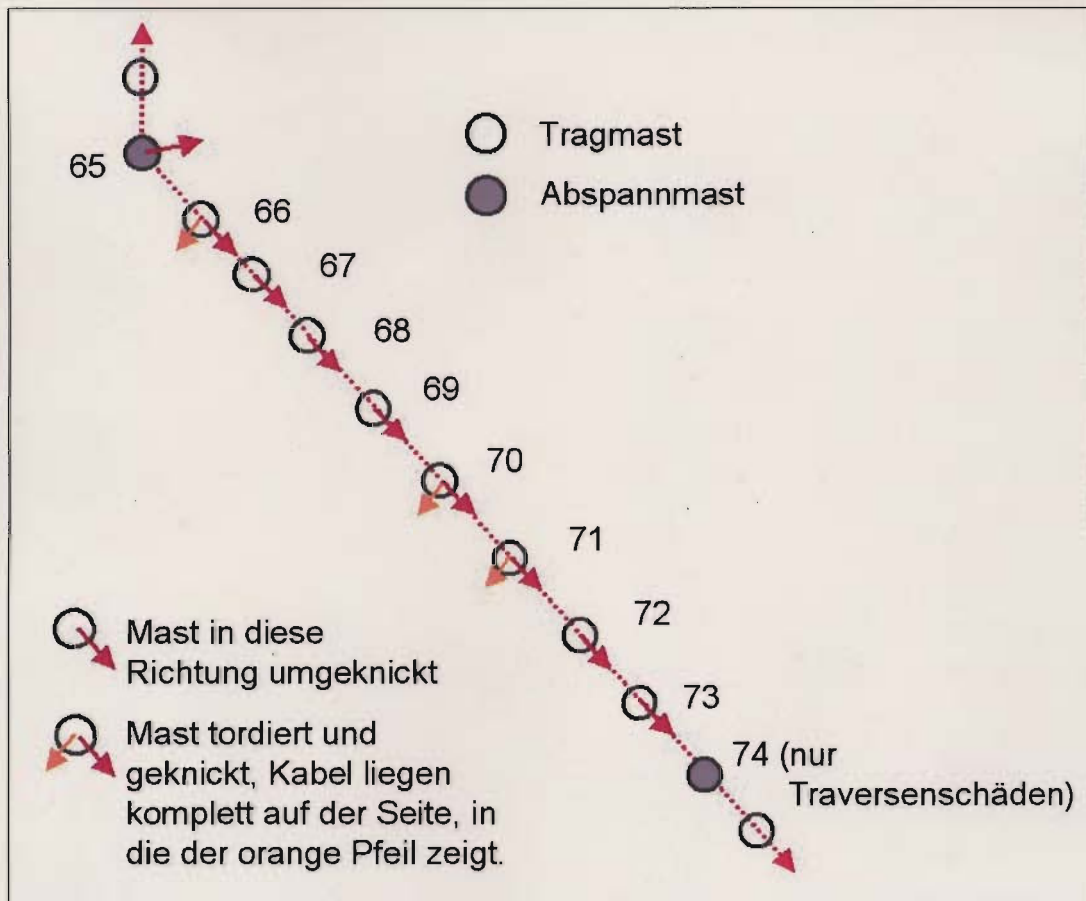


Bild 56: Illustrierung des vermuteten Schadensmechanismus an Freileitung BL1503.

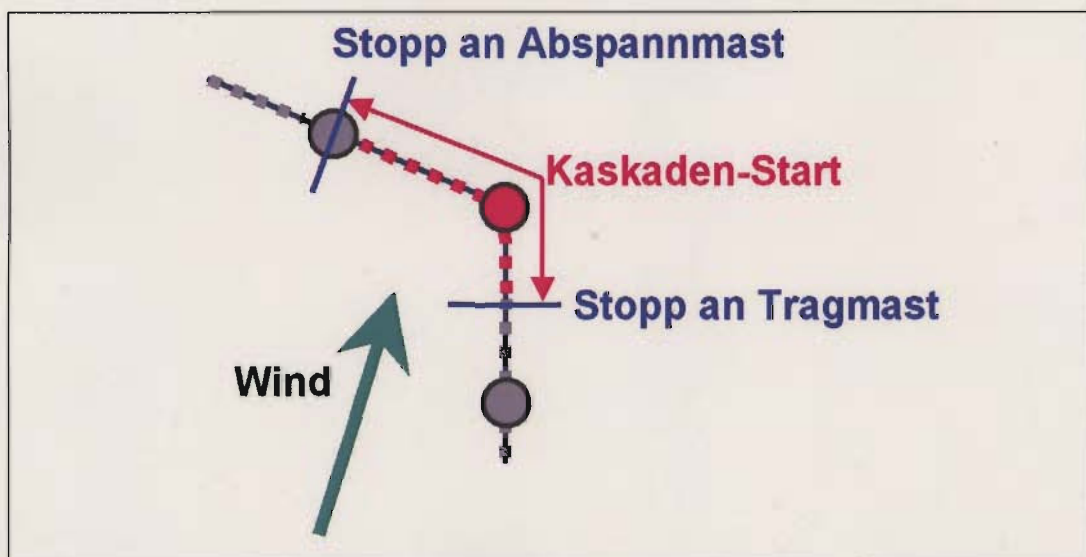


Bild 57: Illustrierung des vermuteten allgemeinen Schadensablaufs (Beispiel ist BL1520, vgl. Bild 28). Start an einem Winkelabspannmast, Stopp an Abspannmast senkrecht zum Wind bzw. an Tragmast parallel zum Wind.

13.6 Fraktographie



Bild 58: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Bruchfläche an einem Loch (links im Bild). Digitalkamera.

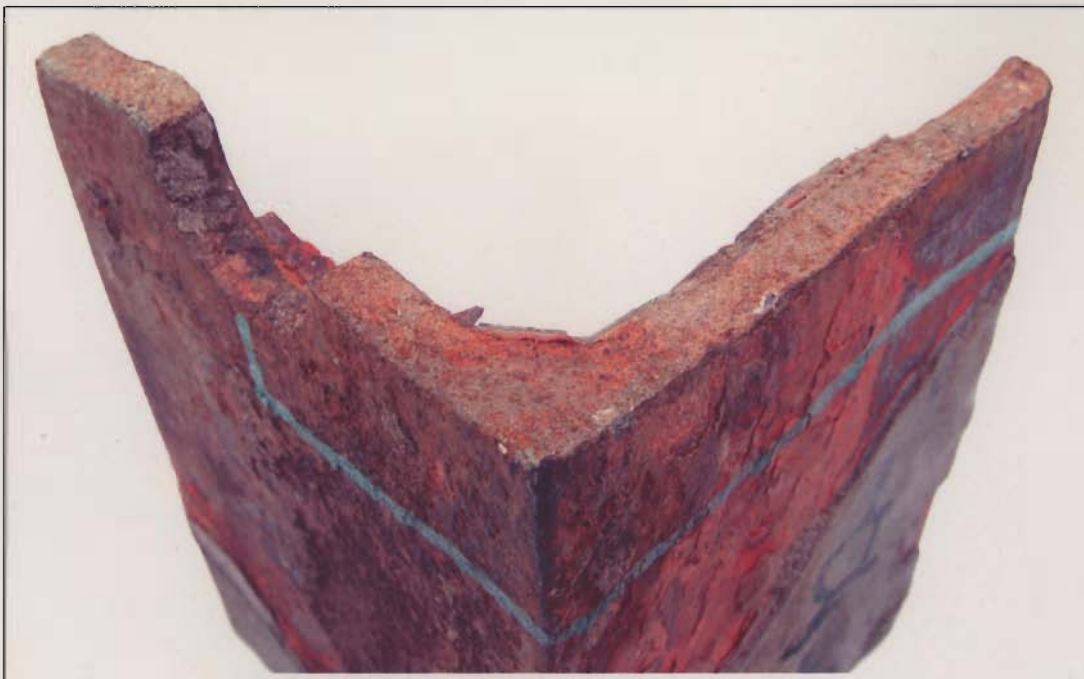


Bild 59: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Bruchfläche an einem Loch. Probe vor der Reinigung. Die grüne Linie markiert den vorgesehen Trennschnitt. Digitalkamera.

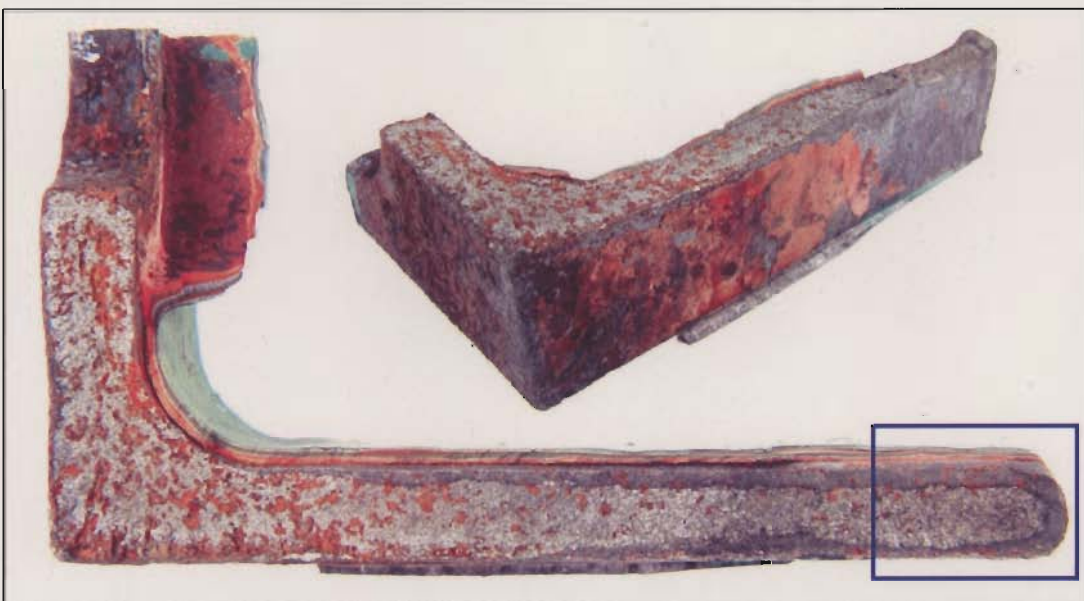


Bild 60: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Für die REM-Untersuchung abgetrennter Teil der Bruchfläche, mit Zitronensäure gereinigt. links unten Draufsicht, rechts oben seitliche Ansicht. Digitalkamera.

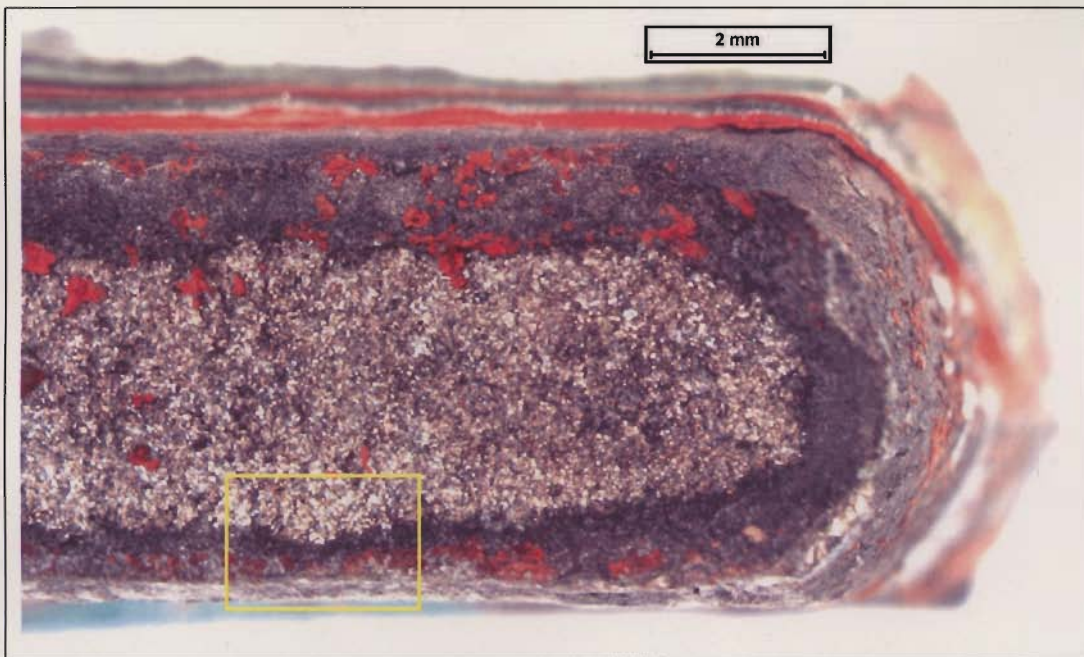


Bild 61: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Vergrößerung des blauen Rahmens in Bild 60. Spröbruch (glänzender Bereich) im Mittelteil und umgebender duktiler Saum (dunkler Bereich). Stereomikroskop.

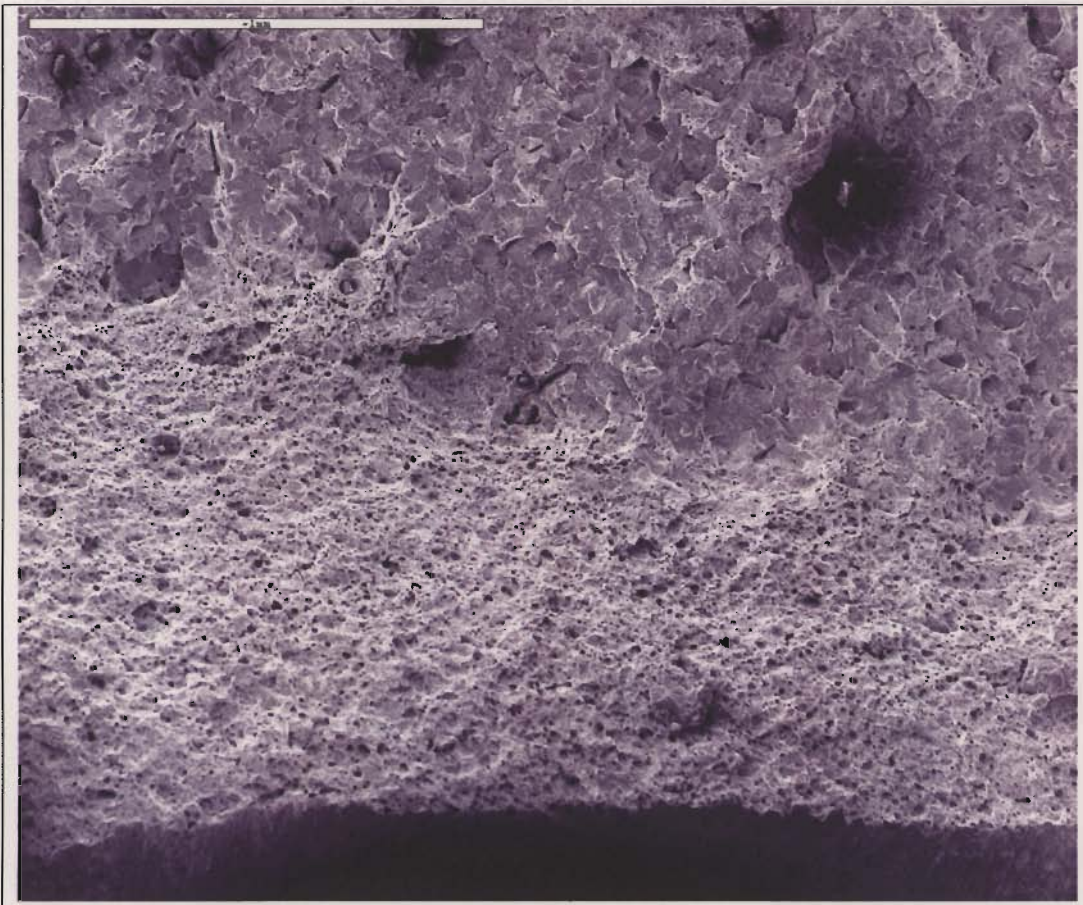


Bild 62: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Vergrößerung des gelben Rahmens in Bild 61. Duktiler Saum (unten) und Spröbruch (oben). REM.

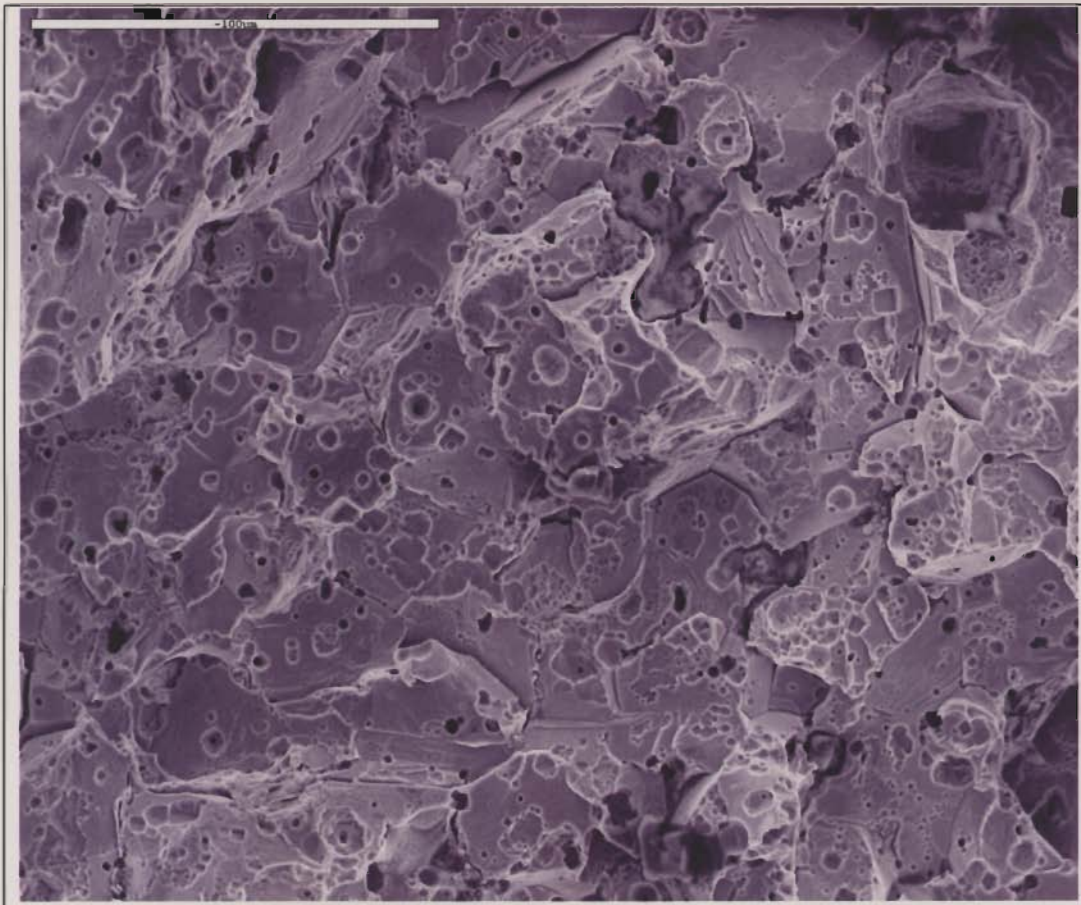


Bild 63: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Feinstruktur des Sprödbereichs, Spaltbruch mit Ätzgrübchen. REM.

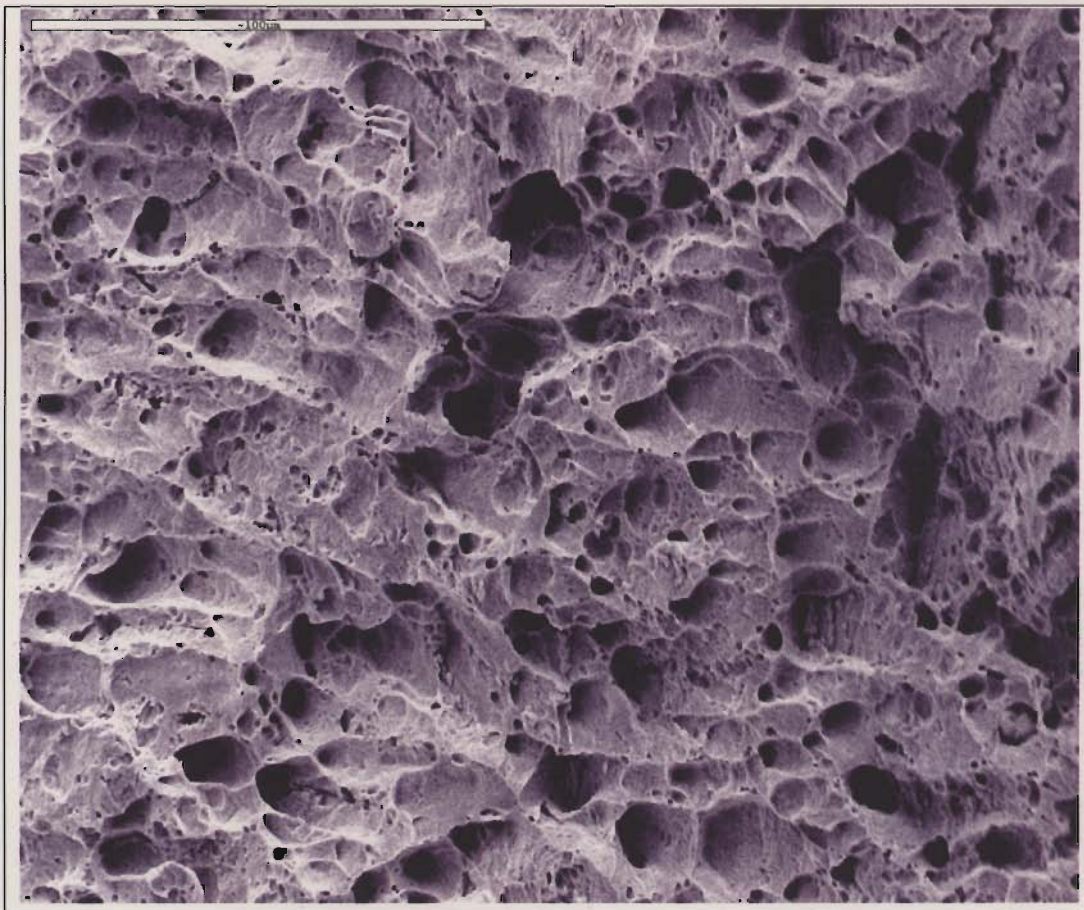


Bild 64: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Feinstruktur des duktilen Saums, Wabenstruktur. REM.

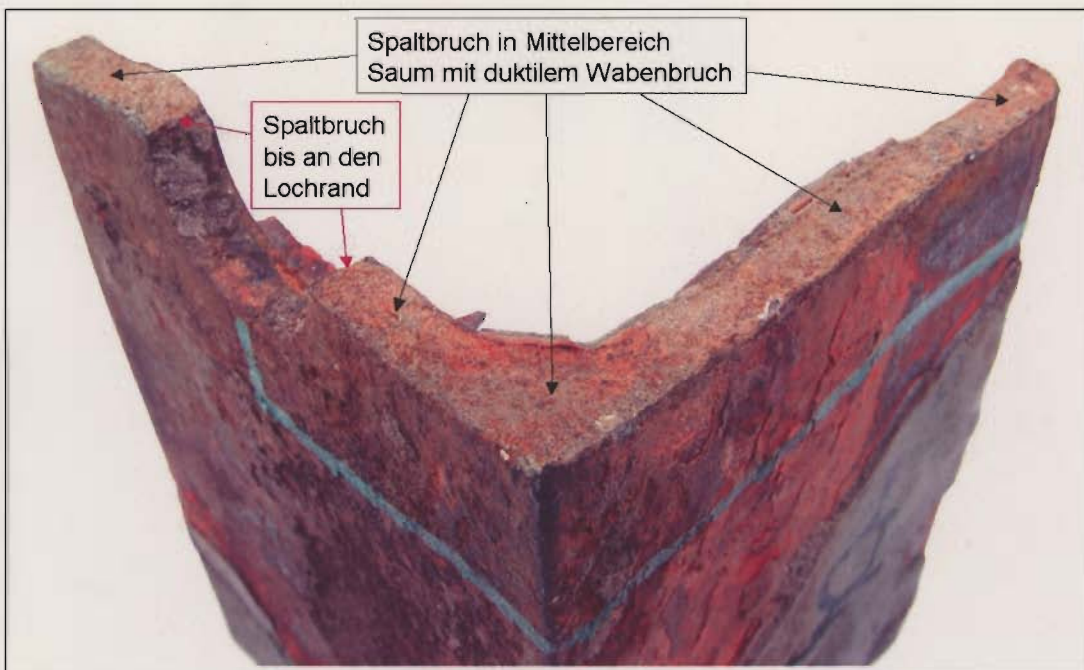


Bild 65: 1503-M65-04-03 (1960), Diagonale, St 37.12. Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen.

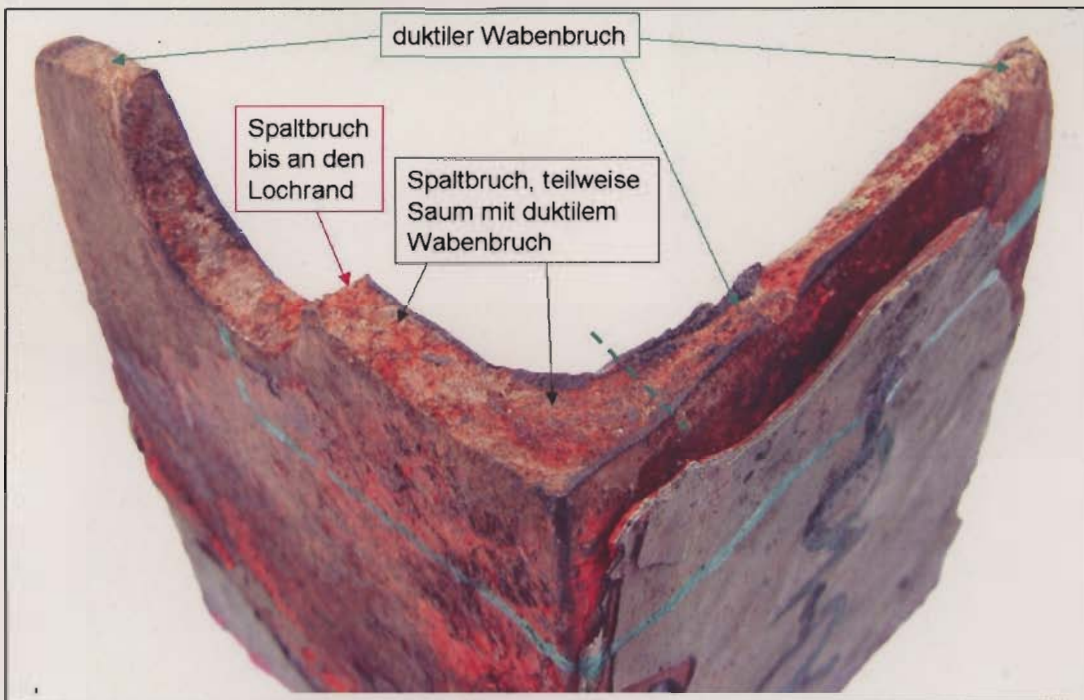


Bild 66: 1503-M65-01-01 (1960), weitere Diagonale, St 37.12. Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen.

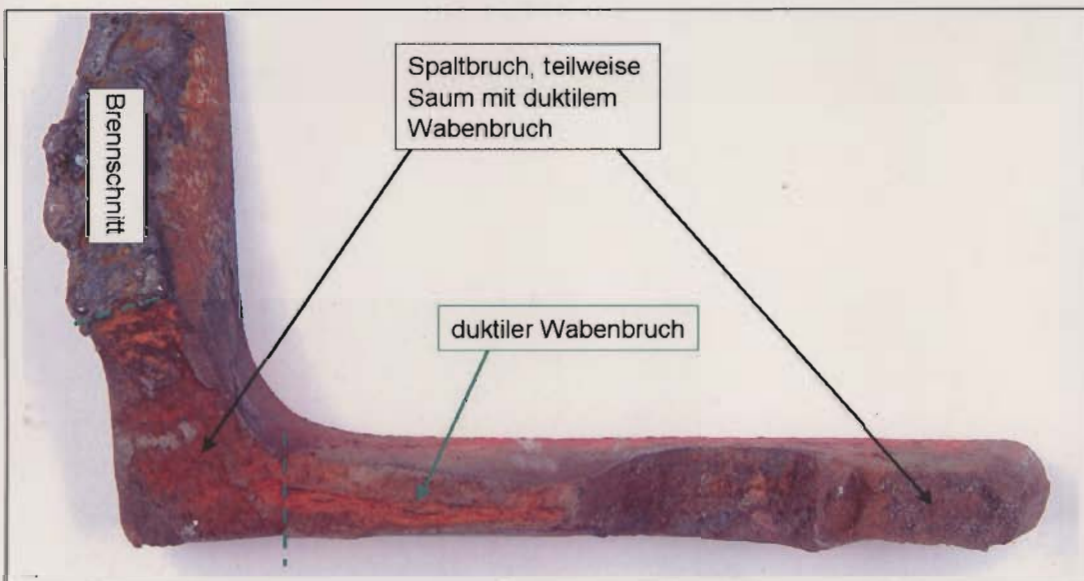


Bild 67: 1536-M27-21-02 (1951), Eckstiel, St 37.12. Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen.

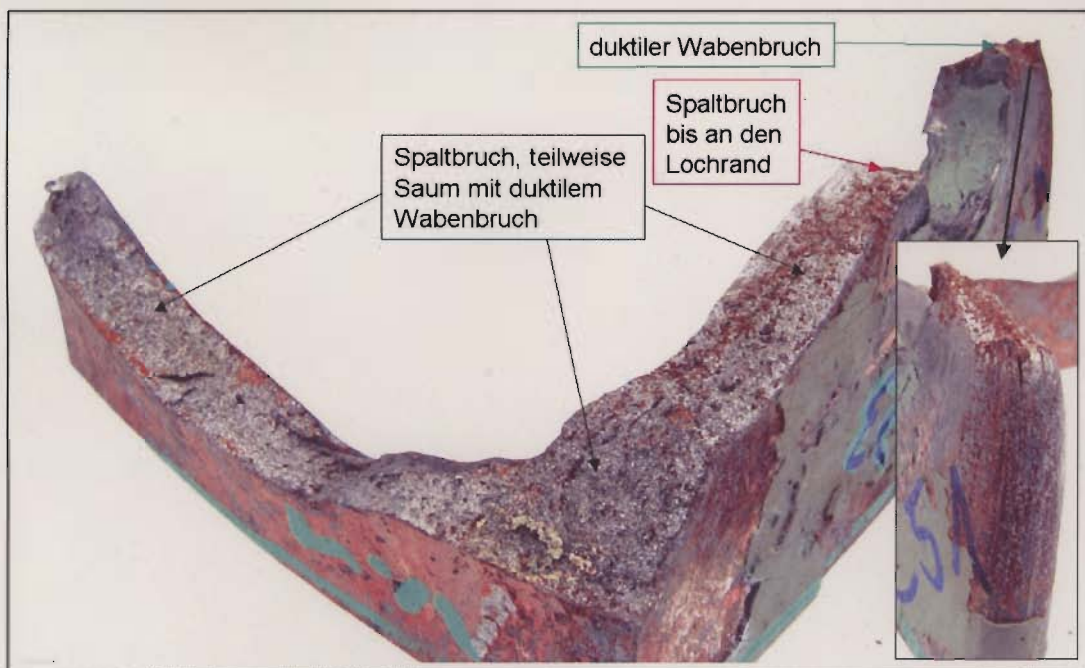


Bild 68: 1503-M73-C51 aus dem Prüfstück M73-12 (1960), Eckstiel, St 37.12. Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen.



Bild 69: 1525-M22-C30 (1991), Eckstiel, St 52-3

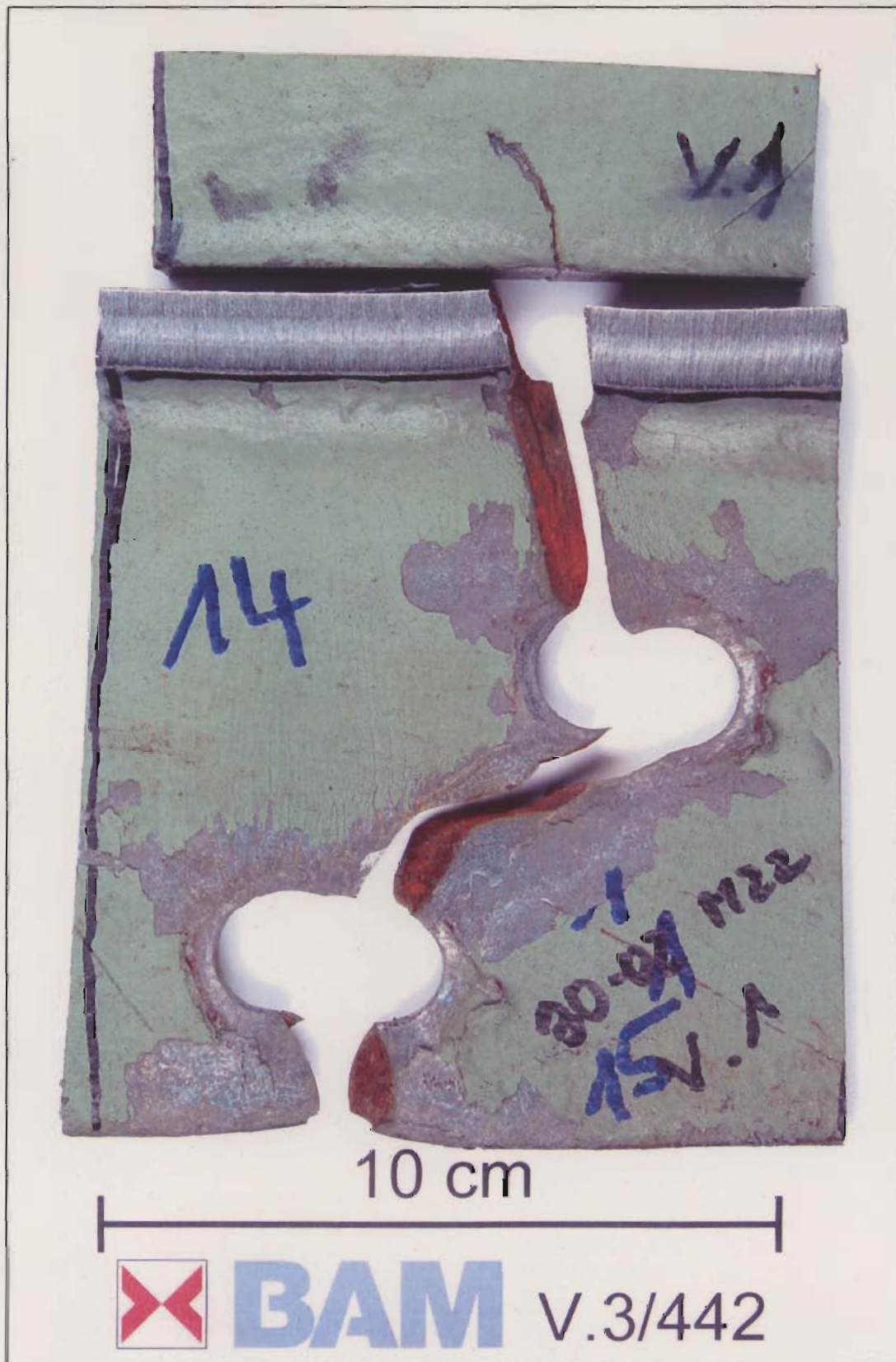


Bild 70: 1525-M22-B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52-3



Bild 71: 1525-M22- B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52. Bruchfläche des Teilstücks in Bild 70 rechts unten, mit Zitronensäure gereinigt. Digitalkamera.

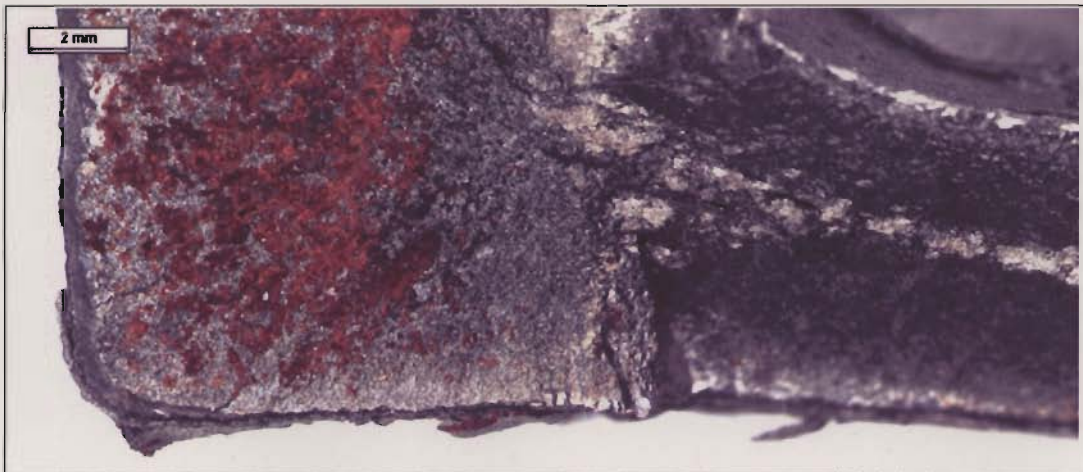


Bild 72: 1525-M22- B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52. Vergrößerung des blauen Rahmens in Bild 71. In der Ecke des Winkelprofils (im Bild links) Sprödbrech, rechts im Bild duktiler Bruch. Stereomikroskop.

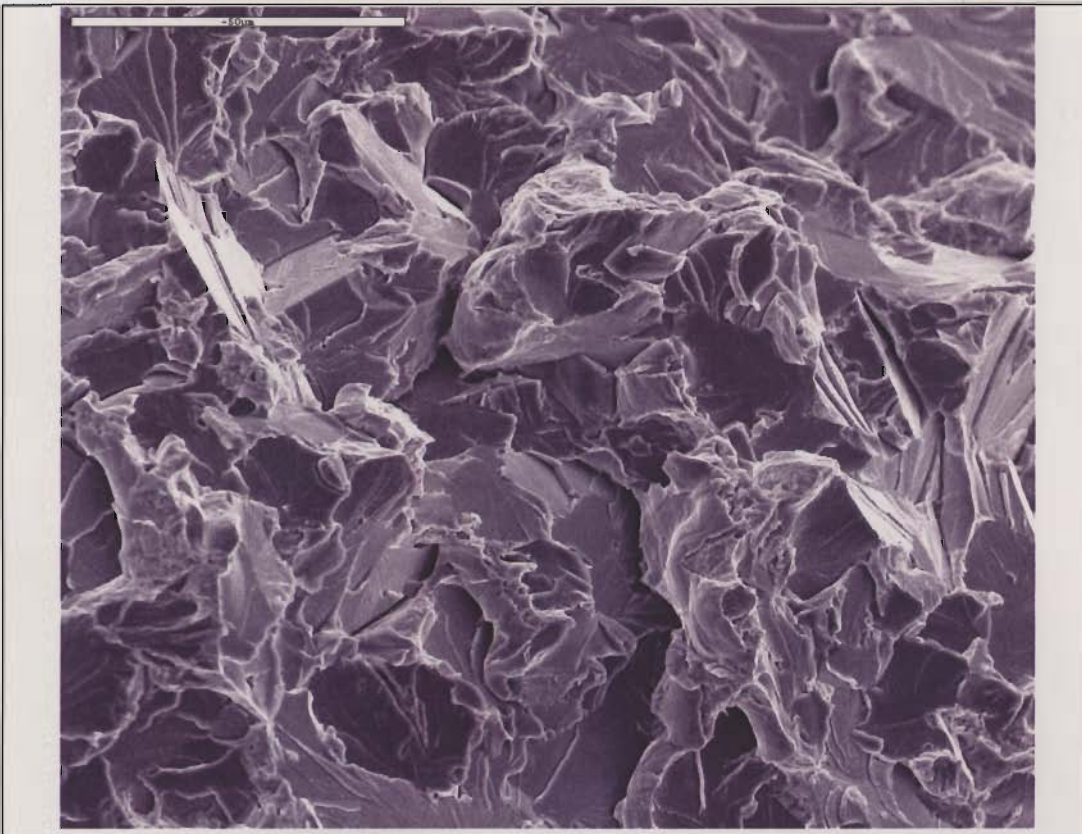


Bild 73: 1525-M22- B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52-3. Feinstruktur des Sprödbrechts. REM.

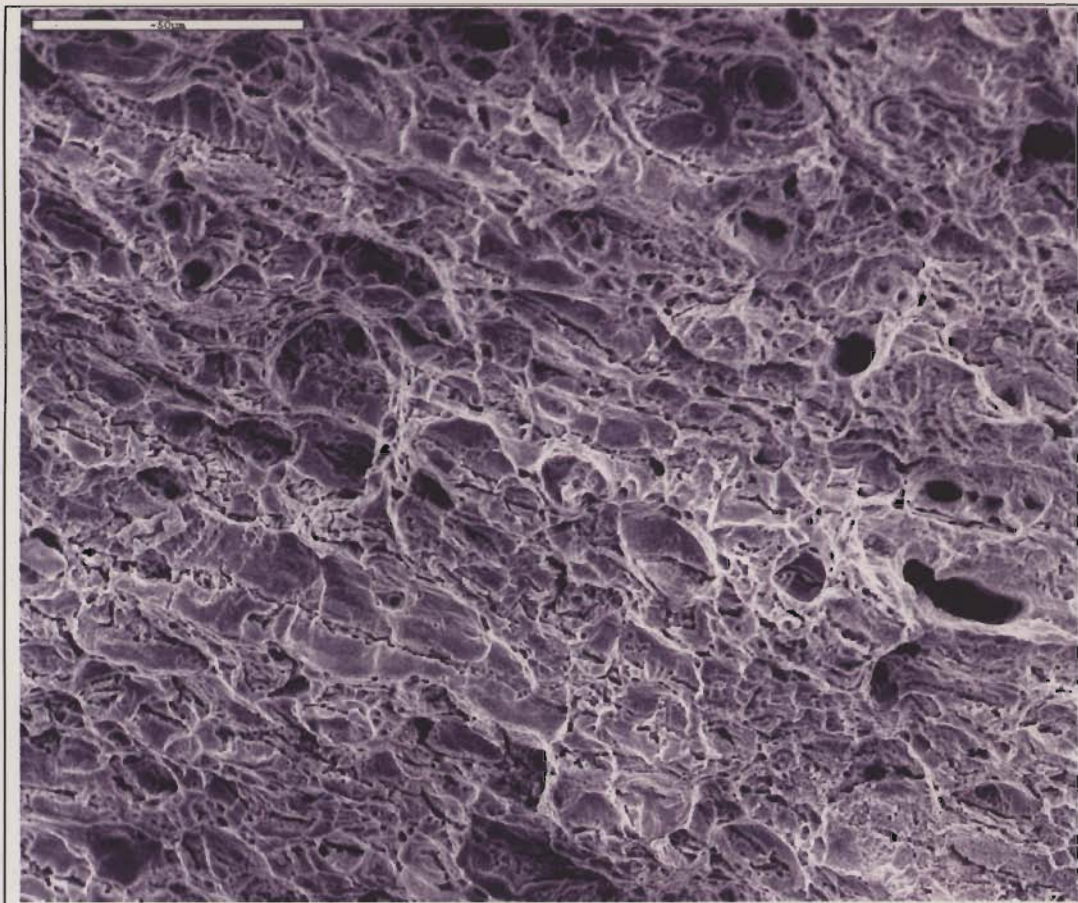


Bild 74: 1525-M22- B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52-3. Feinstruktur des duktilen Bruchs. REM.

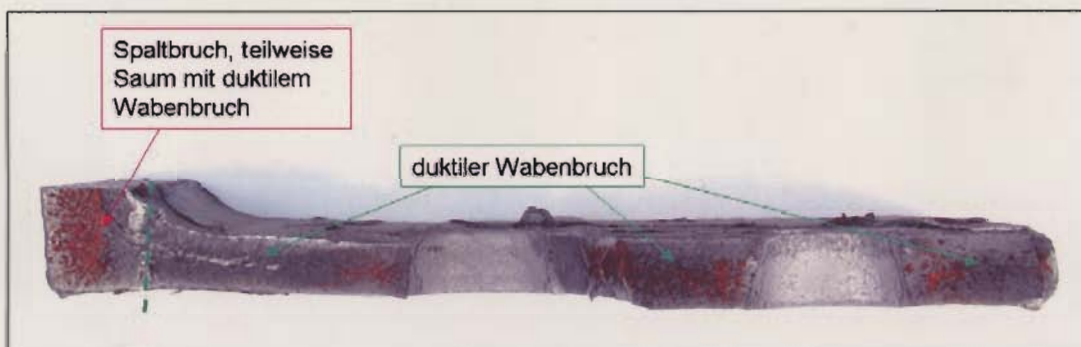


Bild 75: 1525-M22- B14 und B15 (1991), Eckstiel, St 52-3. Zusammenfassung der gefundenen Bruchmechanismen.

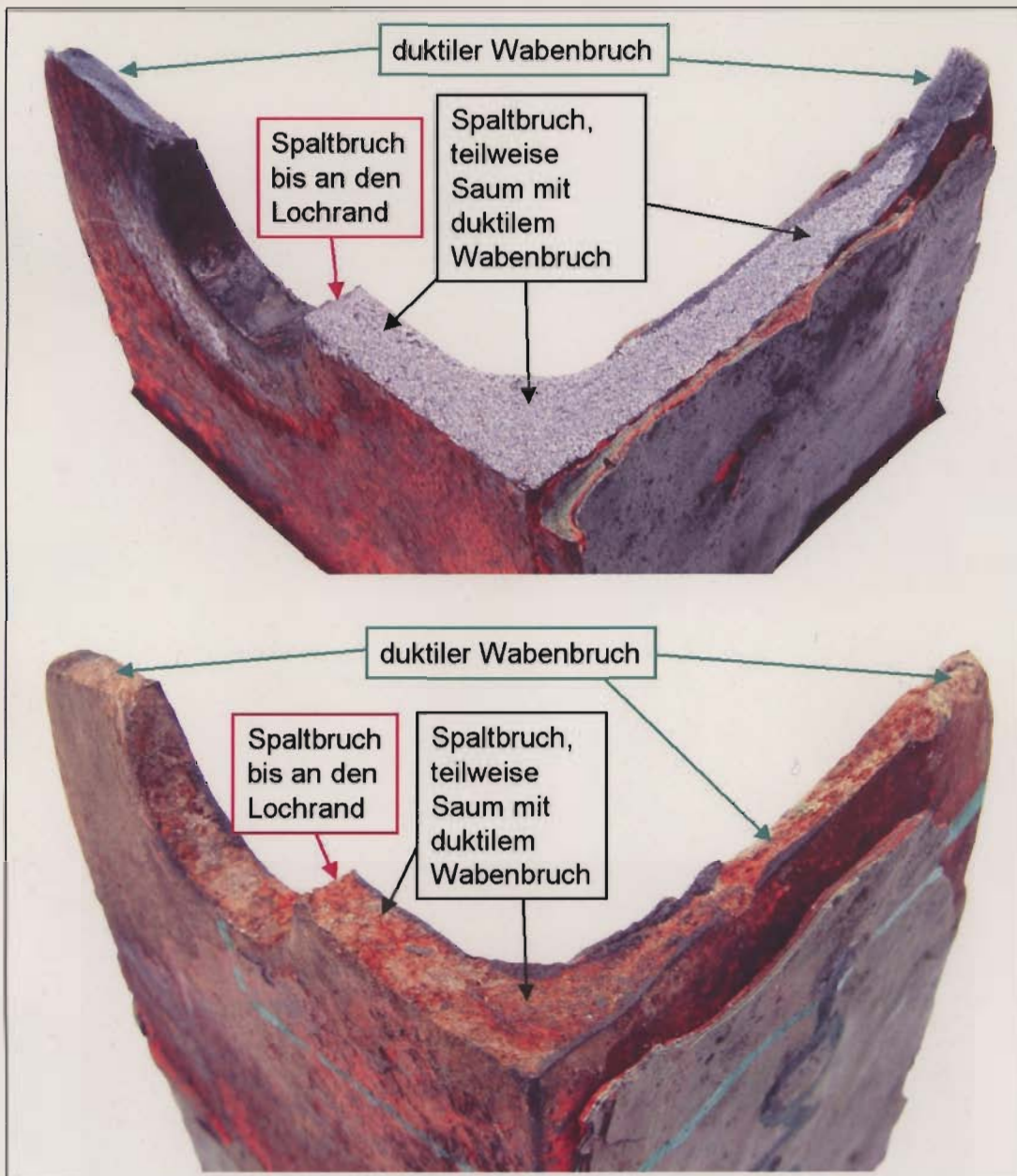


Bild 76: Vergleich Bruchflächen Bauteilversuch (oben) ⇔ Schadensteil (unten). Et-
was gleiche Anteile der verschiedenen Bruchmechanismen. Oben: Bauteil-
versuch 1503-M65-08A, T = 0 °C; Bruchkraft: 125 kN; N-Gehalt 0,016 %; un-
ten: Schadensteil 1503-M65-01-01.

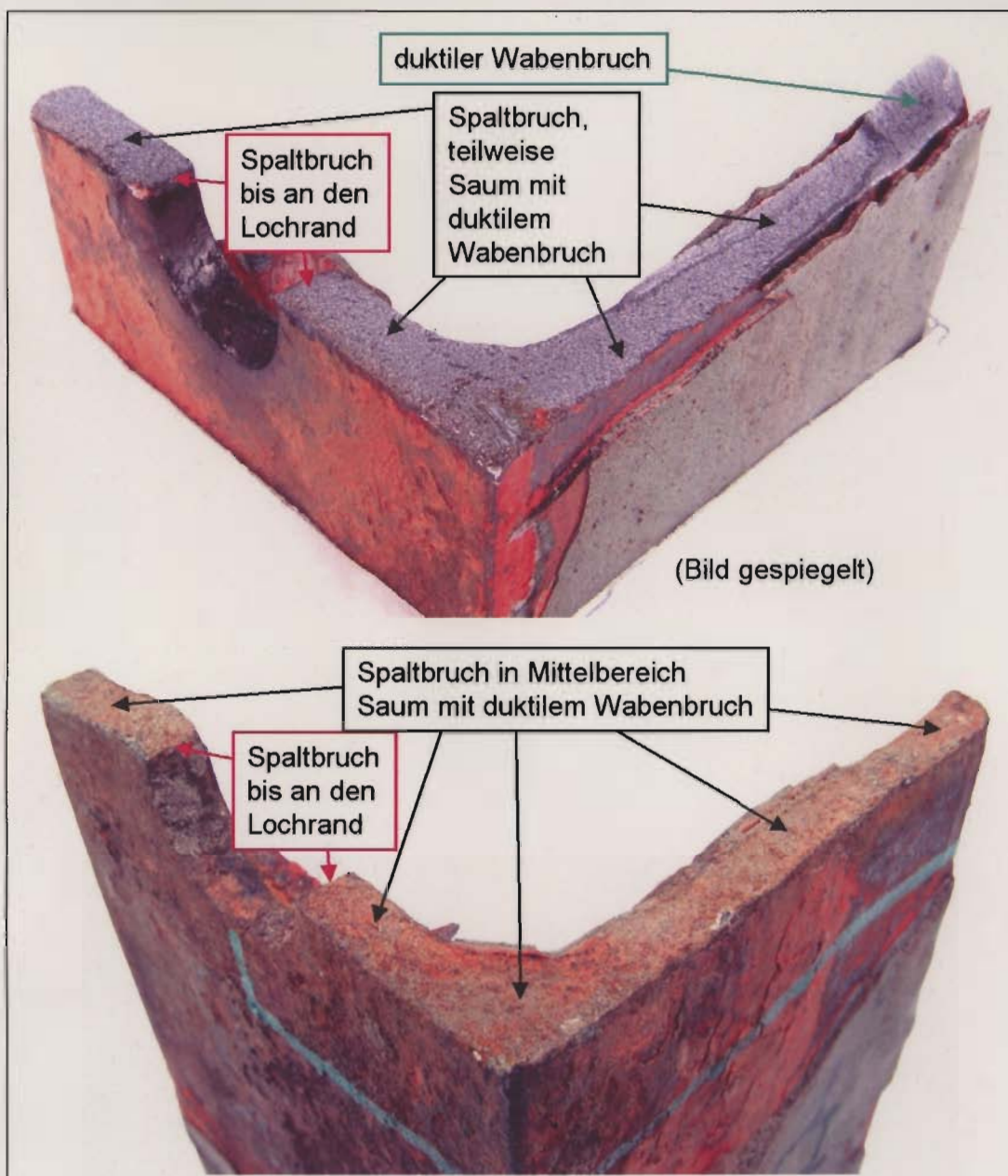


Bild 77: Vergleich Bruchflächen Bauteilversuch (oben) $\leftrightarrow$ Schadensteil (unten). Etwas gleiche Anteile der verschiedenen Bruchmechanismen. Oben: Bauteilversuch 1503-M65-09, $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; Bruchkraft: 94 kN; N-Gehalt 0,014 %; unten: Schadensteil 1503-M65-04-03; 0,015 % N.

13.7 Metallographie

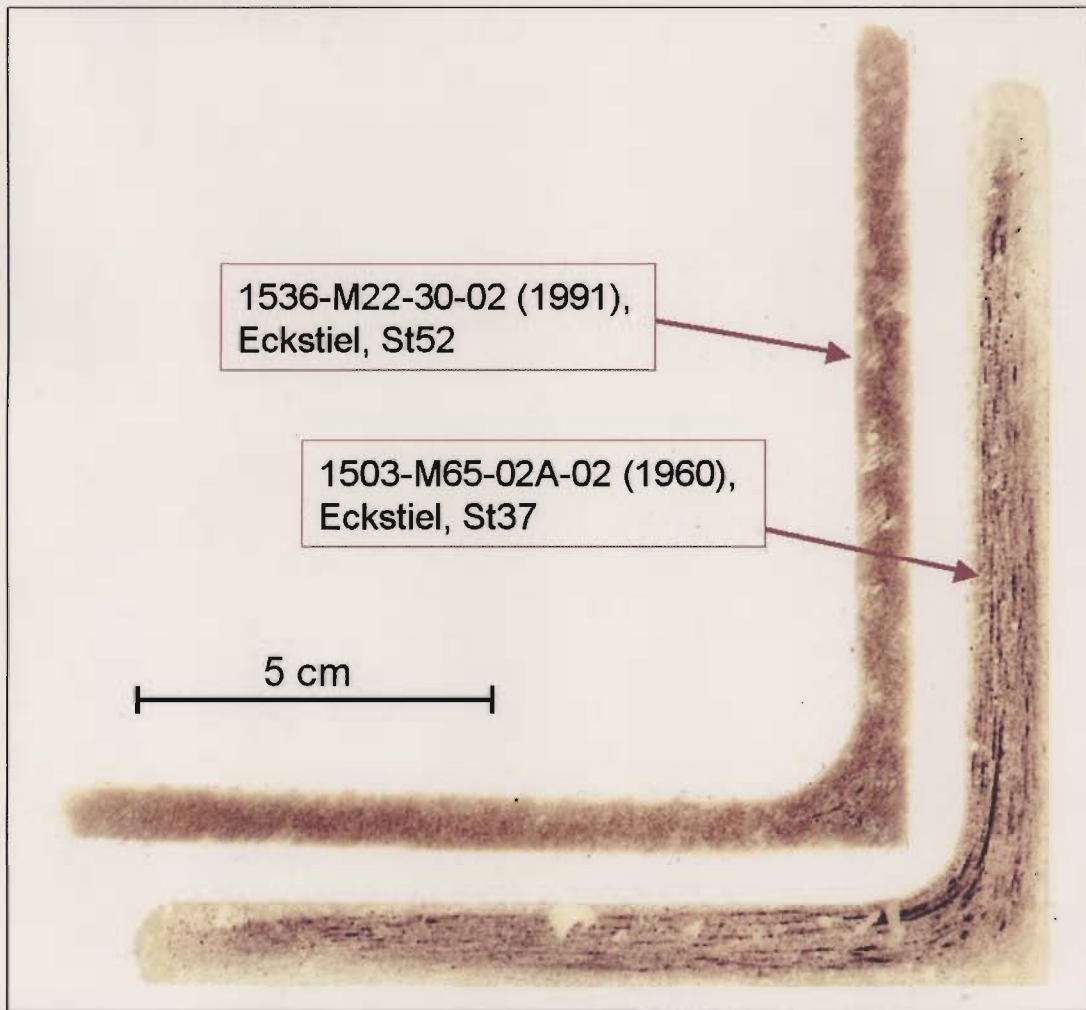


Bild 78: Beispiele für Baumannabdrücke. Eckstiele von 1960 und 1991.

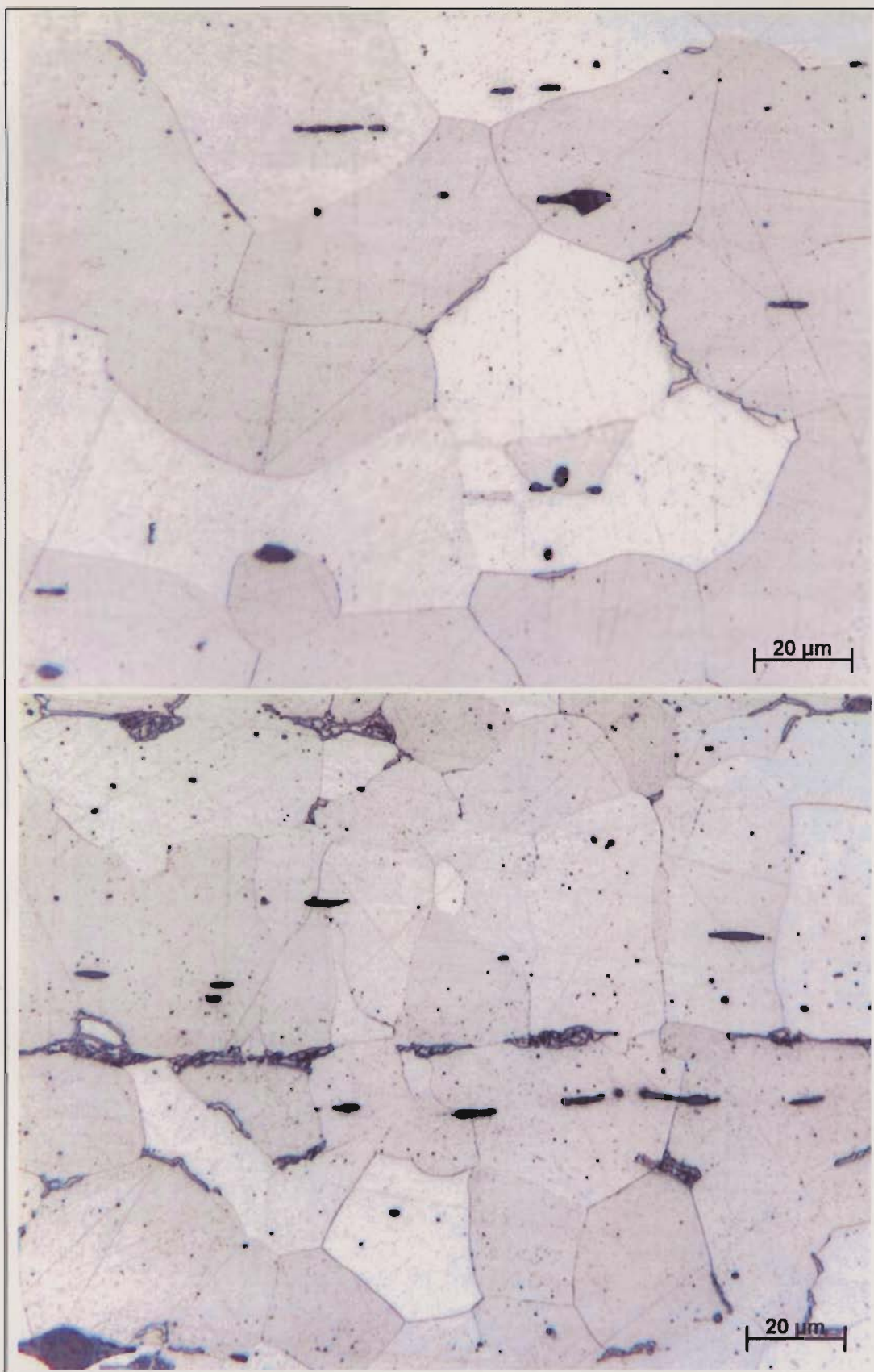


Bild 79: 1536-M27-21 (1951), Eckstiel, St 37.12, Grundgefüge, Längsschliff, Nital. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.

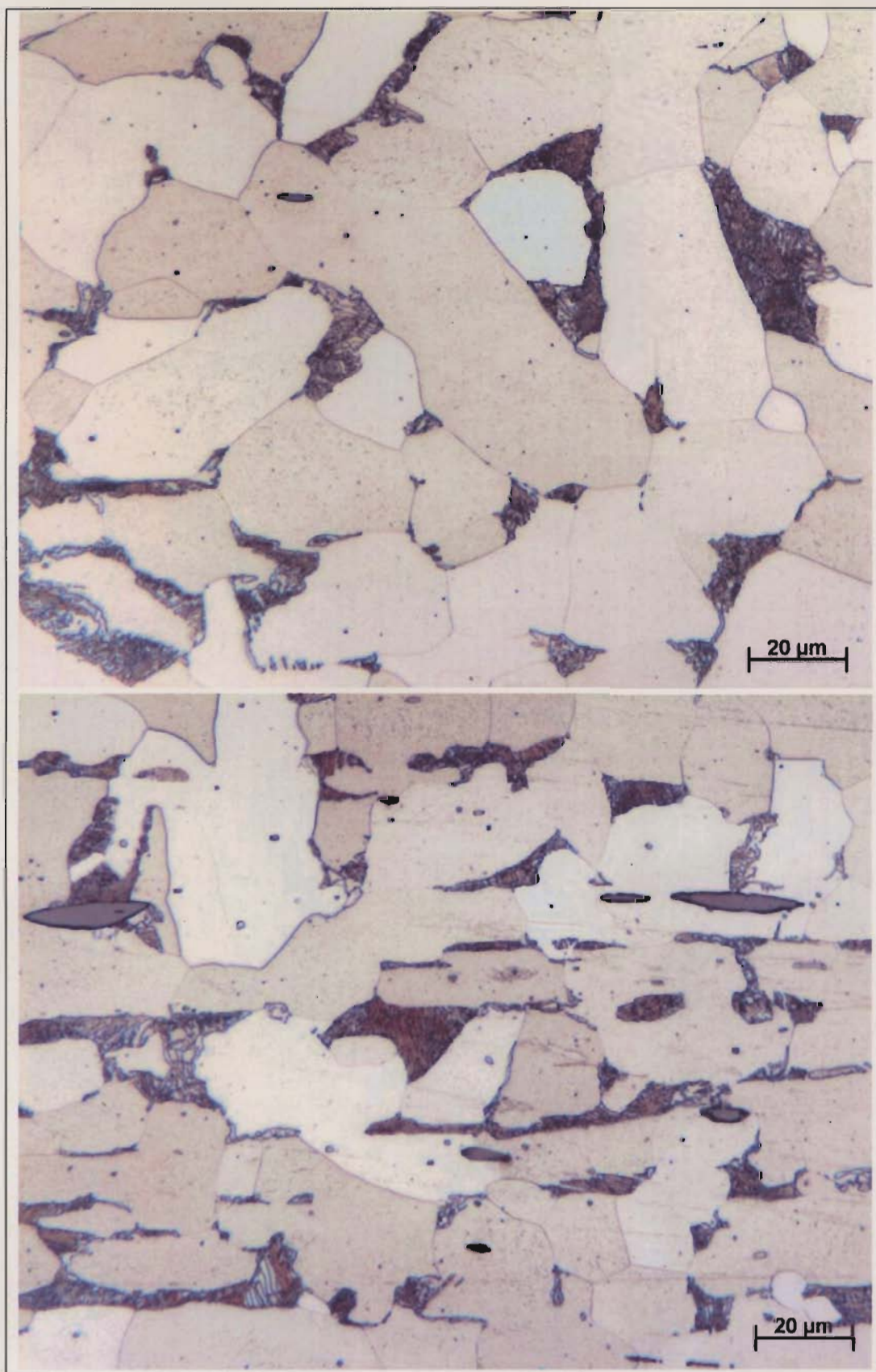


Bild 80: 1503-M65-02A-02 (1960), Eckstiel, St 37.12, Grundgefüge, Längsschliff, Nitral. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.

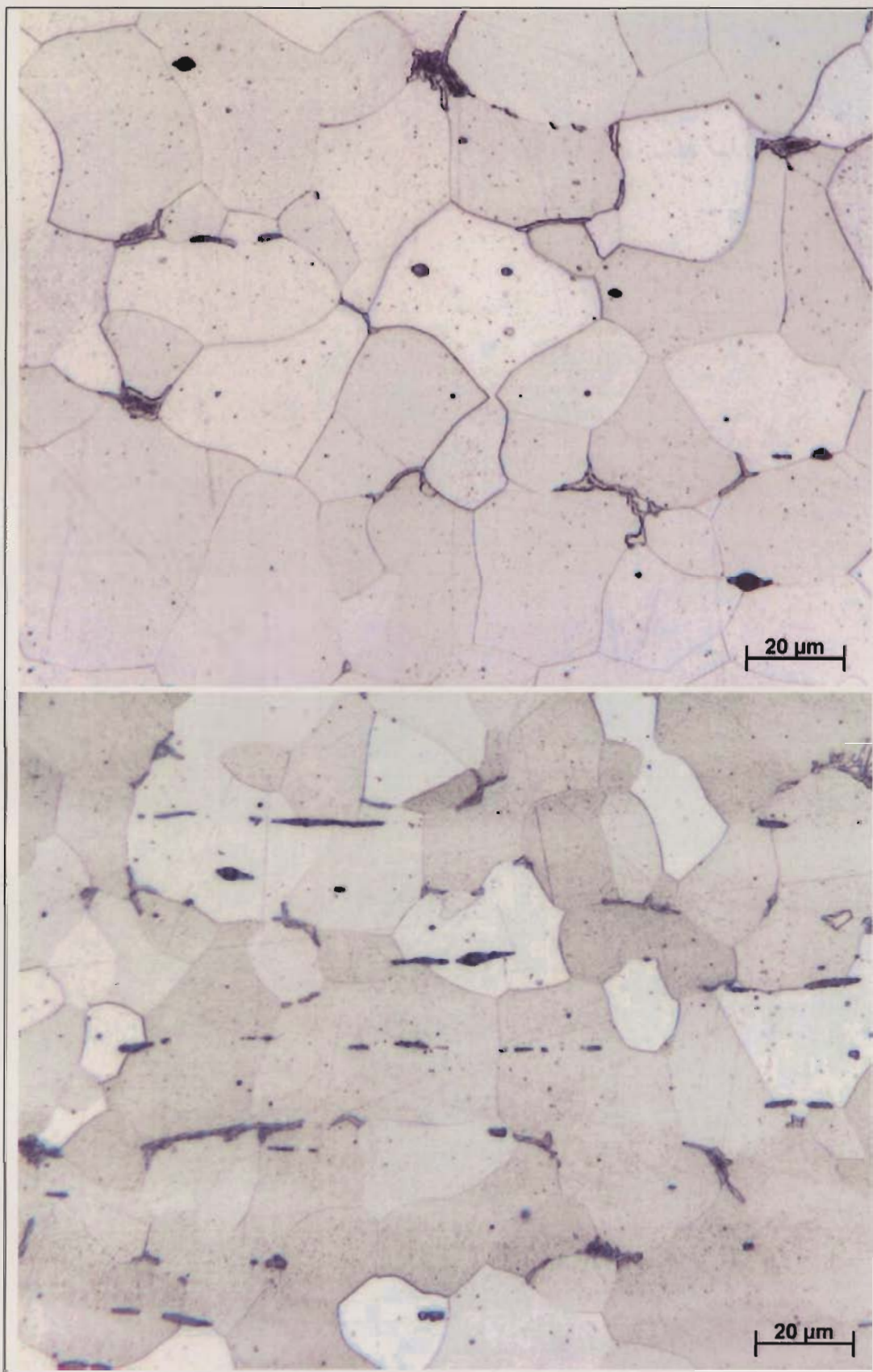


Bild 81: 1503-M65-04-01 (1960), Diagonale, St 37.12, Grundgefüge, Längsschliff, Nitral. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.

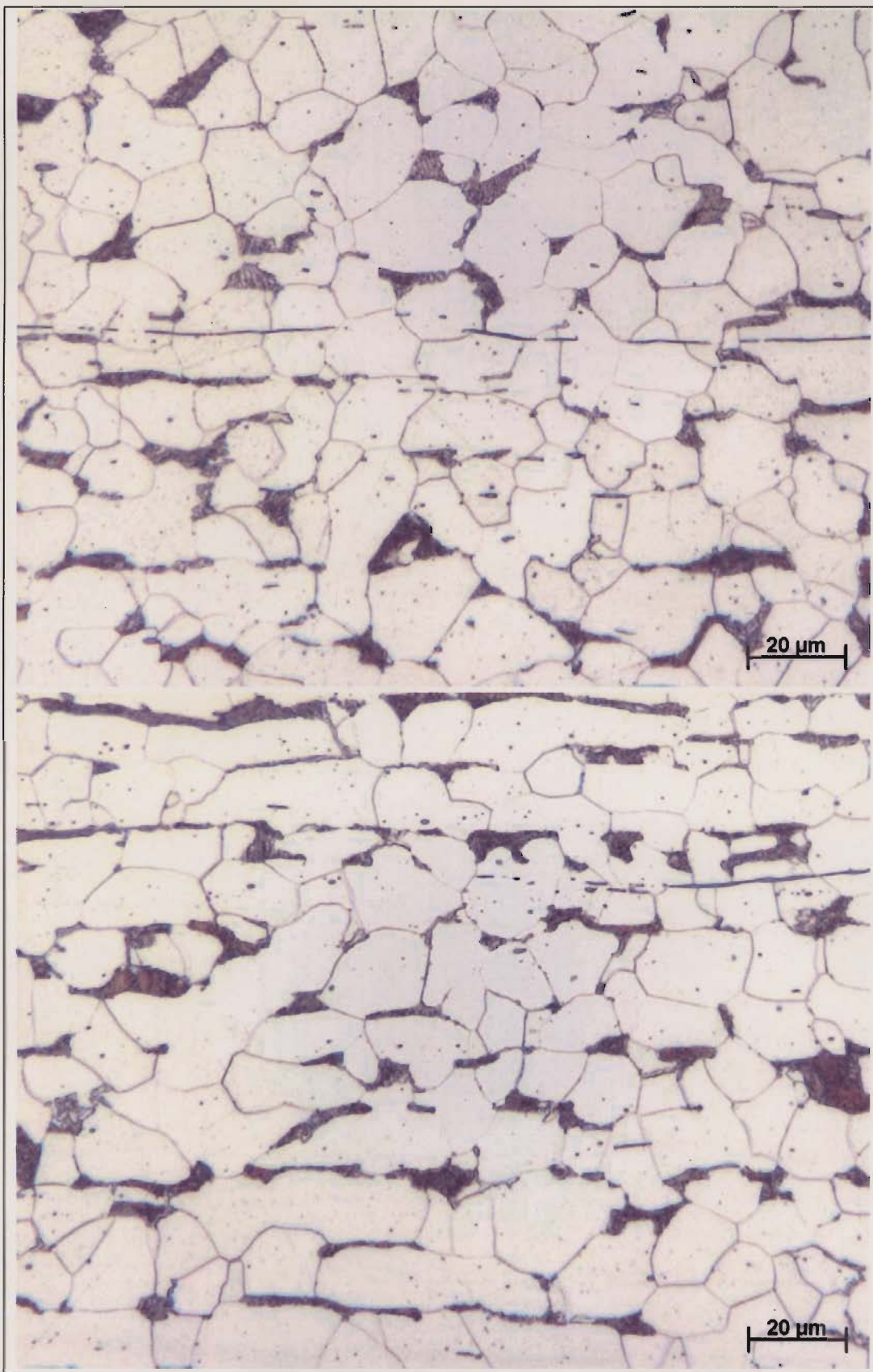


Bild 82: 1536-M22-31-01 (1991), Diagonale, St 37-2, Grundgefüge, Längsschliff, Nitral. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.



Bild 83: 1503-M73-13-01 (1960), Diagonale, St 52-3, Grundgefüge, Längsschliff, Nitral. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.

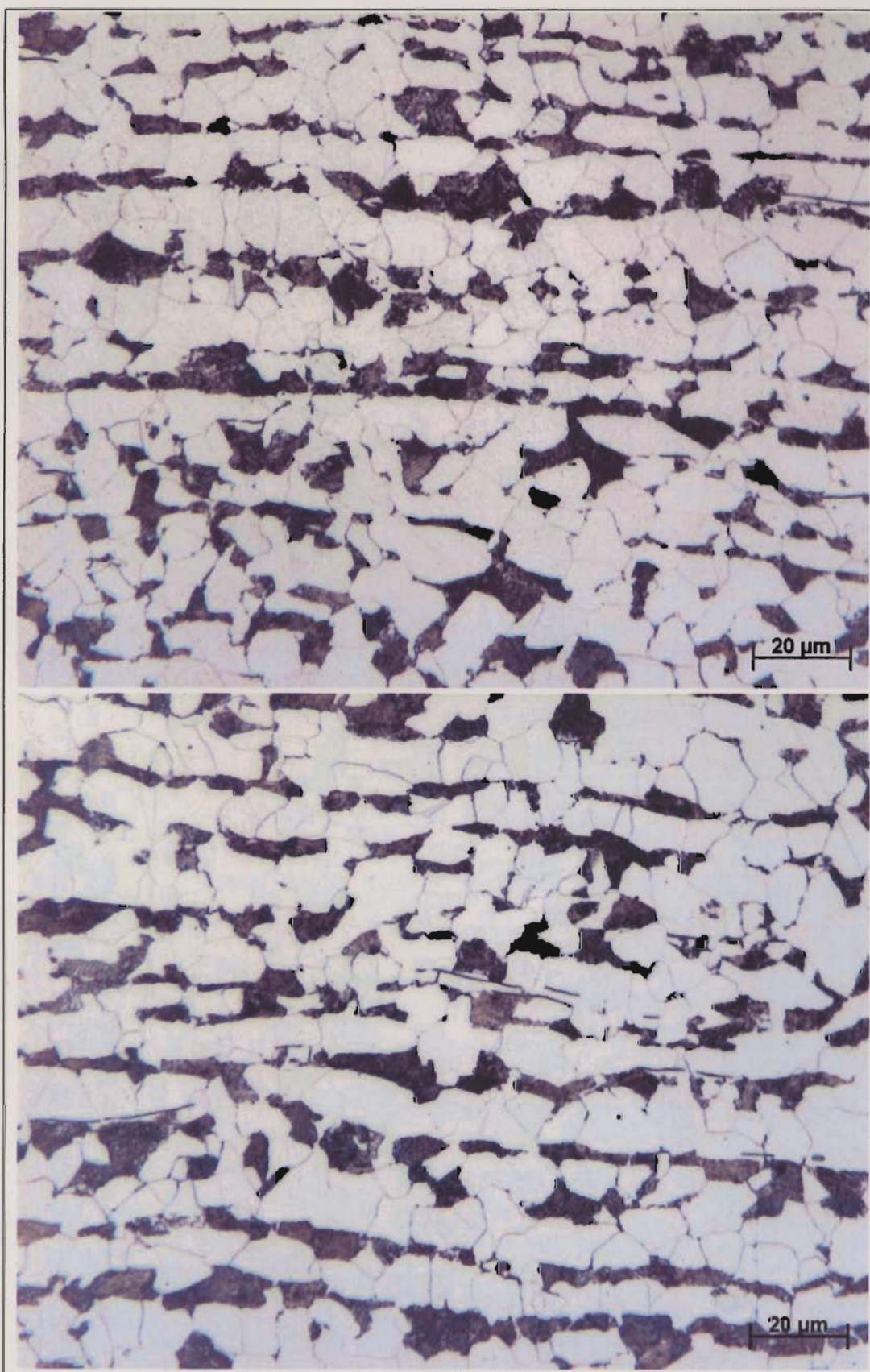


Bild 84: 1536-M22-30-02 (1991), Eckstiel, St 52-3, Grundgefüge, Längsschliff, Nital. Lichtmikroskop. Oben Randbereich, unten Mittelbereich.

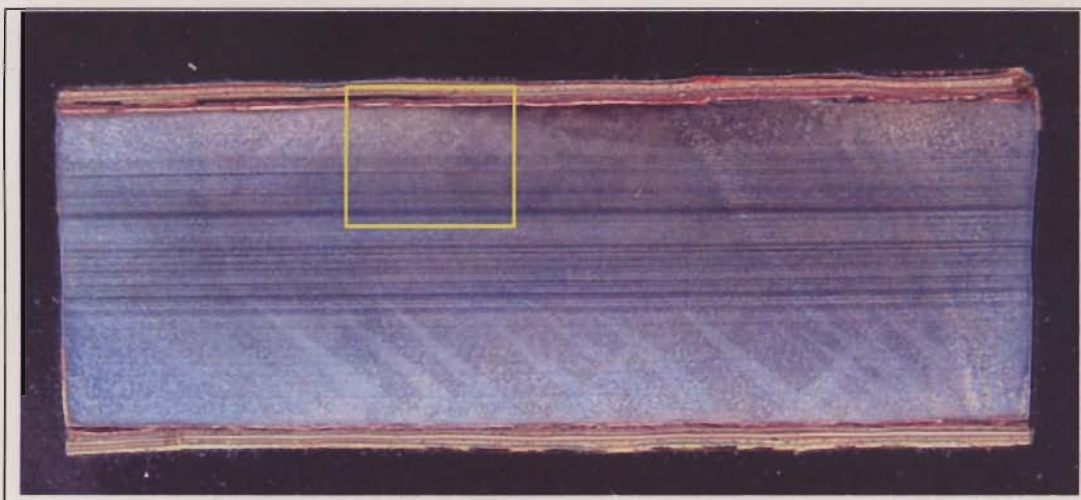


Bild 85: Querschliff Probe 1536-M27-21 (1951), Eckstiel, St 37.12. Ätzung nach Fry. Digitalkamera.

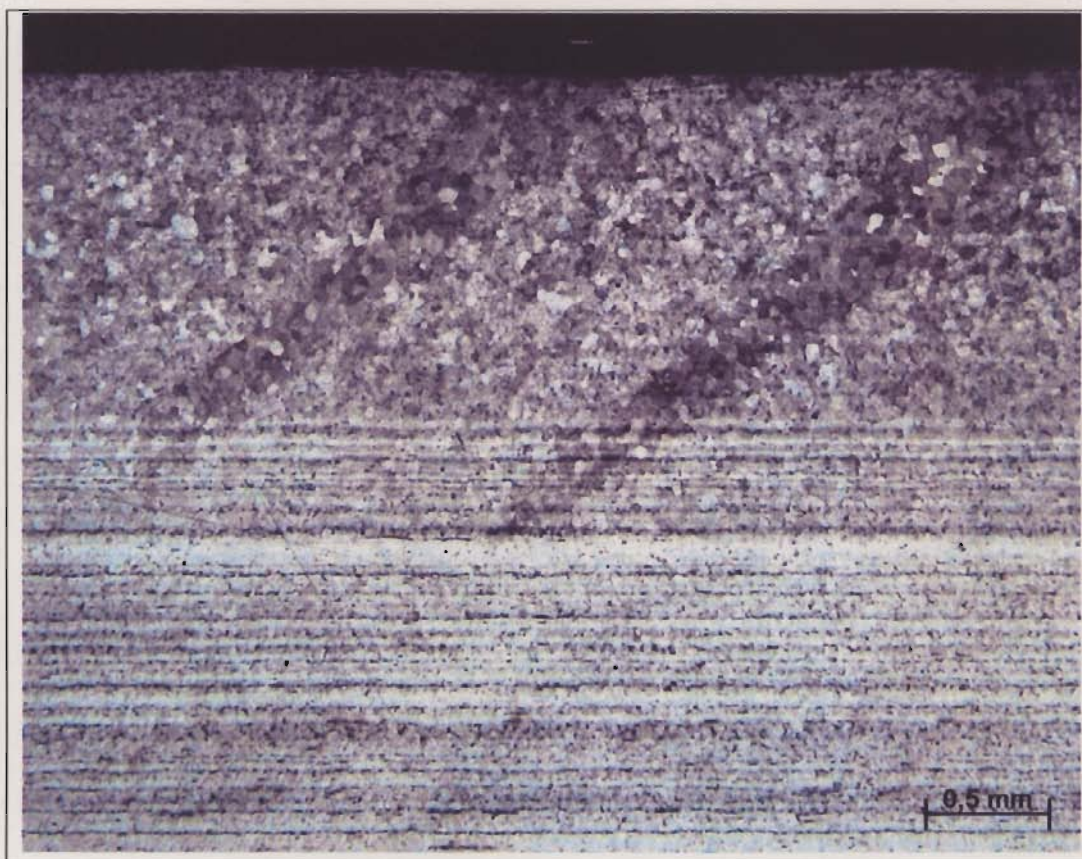


Bild 86: Vergrößerung des gelben Rahmens in Bild 85. Randbereich oben, Mittelbereich unten. Lichtmikroskop.

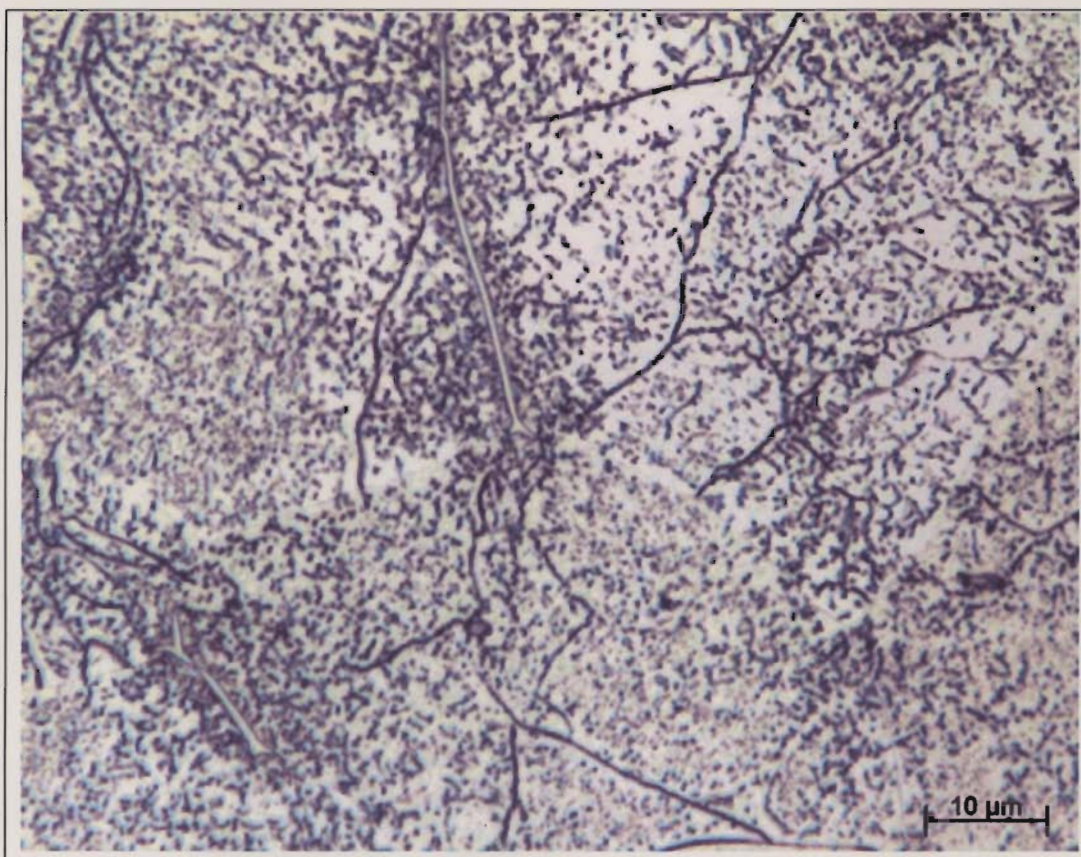


Bild 87: Vergrößerung aus Bild 86, Randbereich. Ferrit-Körner mit Nitrid-Ausscheidungen. Ätzung nach Fry. Lichtmikroskop.

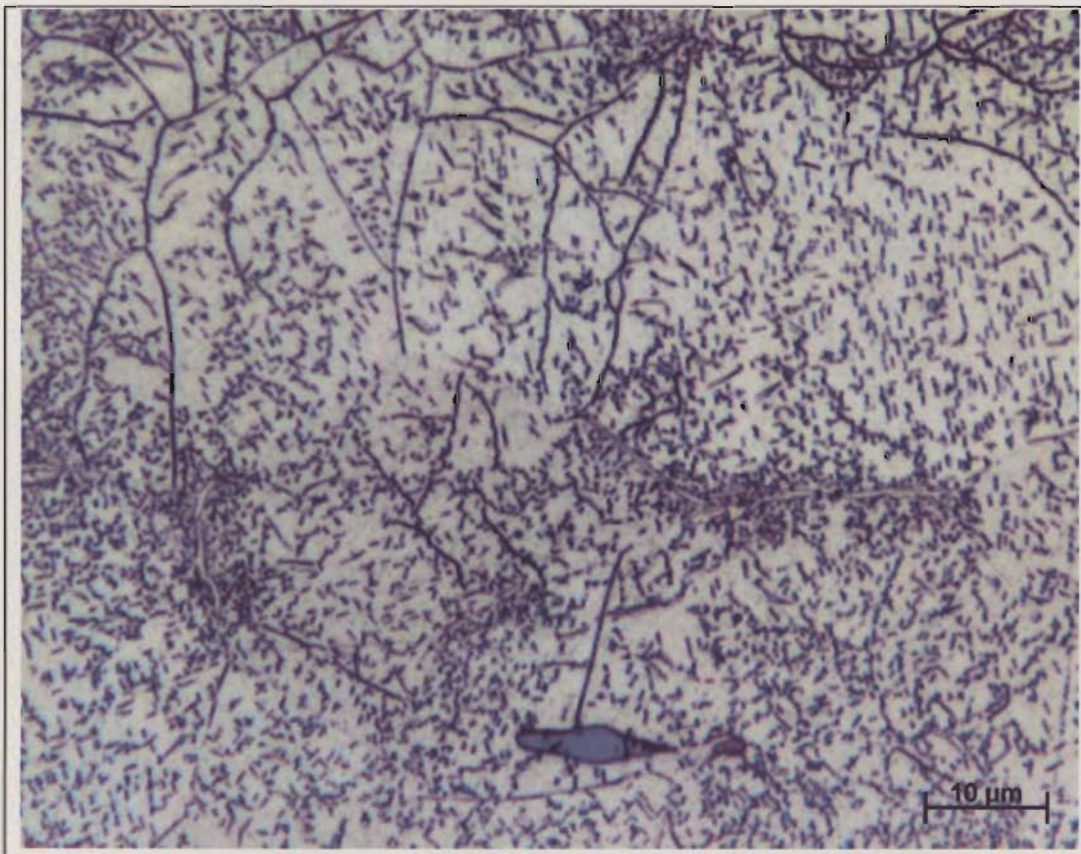


Bild 88: Vergrößerung aus Bild 86, Mittelbereich. Ferrit-Körner mit Nitrid-Ausscheidungen. Ätzung nach Fry. Lichtmikroskop.



Bild 89: Vergrößerung aus Bild 86, ungefähr gleiche Vergrößerung wie die beiden vorigen Bilder, aber REM-Aufnahme. Randbereich. Ferrit-Körner mit Nitrid-Ausscheidungen. Die blaue Linie markiert ein Ferrit-Korn, dessen (001)-Achse senkrecht zur Bildebene steht. Ätzung nach Fry. REM.

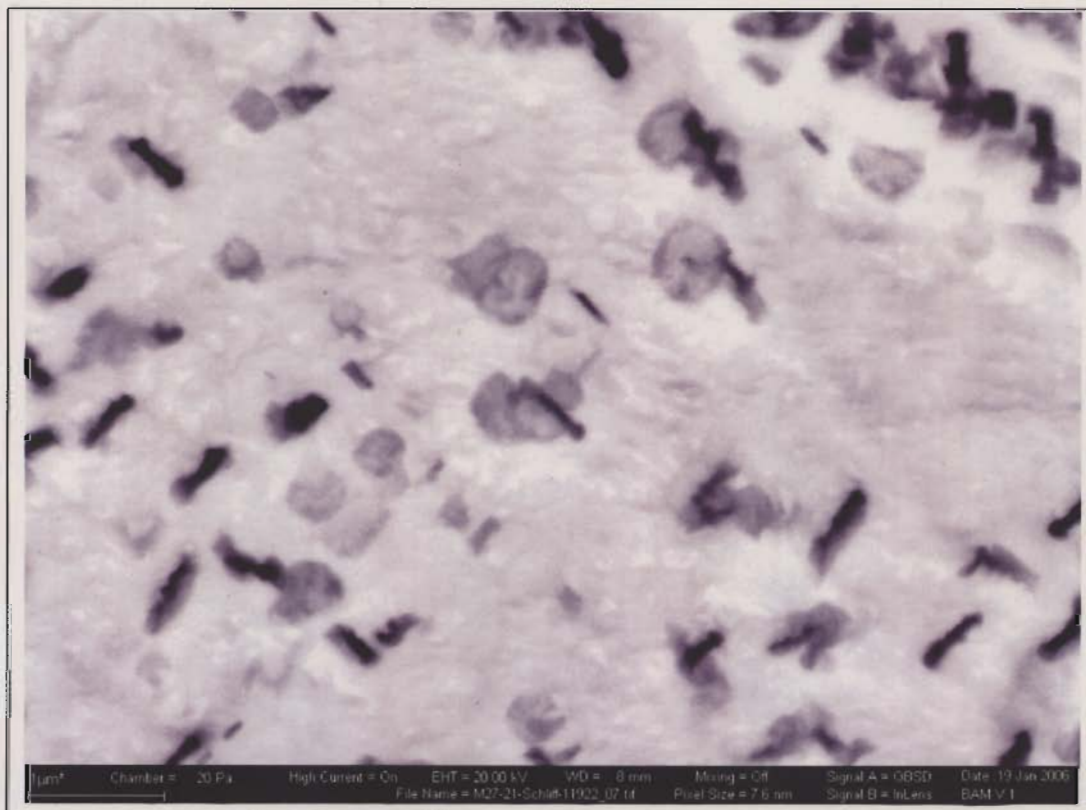


Bild 90: Ausschnittvergrößerung des linken roten Rahmens in Bild 89. Scheibchenförmige Nitride vom Typ Fe_3N . REM.

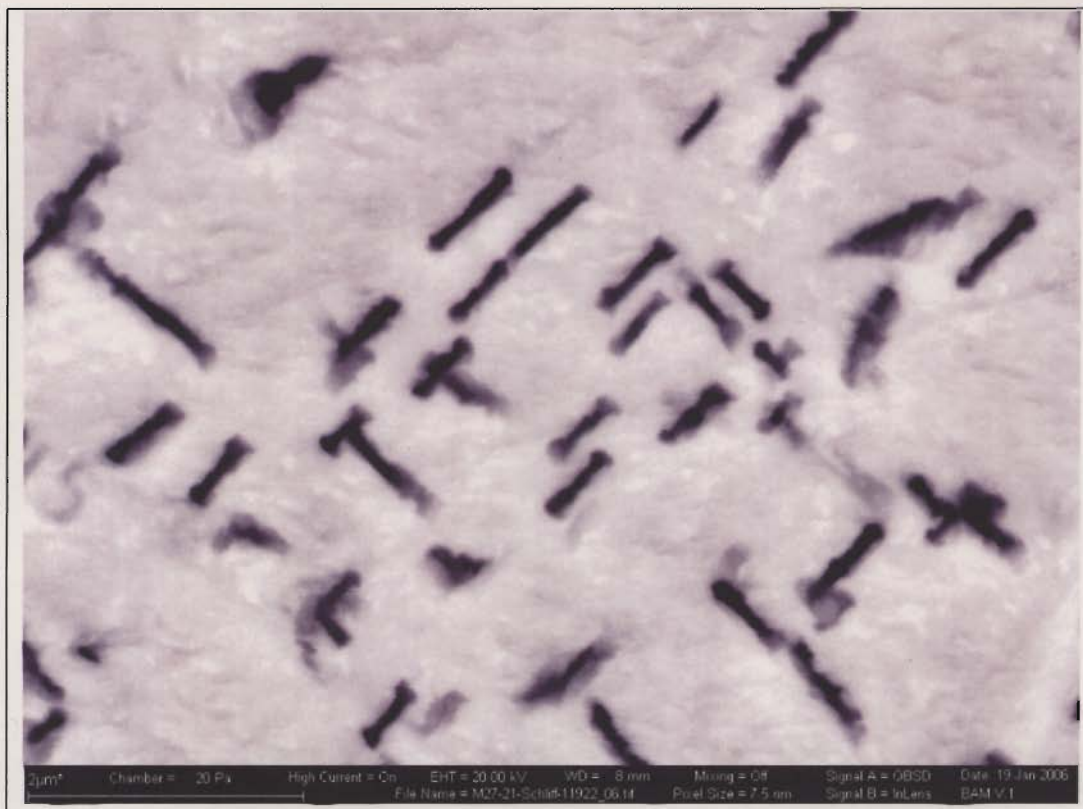


Bild 91: Ausschnittvergrößerung des rechten roten Rahmens in Bild 89. Scheibchenförmige Nitride vom Typ Fe₈N. REM.

13.8 Prüfstücke, MTP

Mast 65, Eckstiel
Prüfstücke M65-02A und -02B



Mast 65, Diagonale
Prüfstücke M65-04-01 und -02

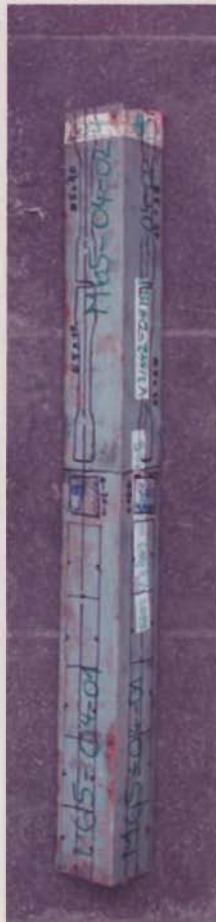


Bild 92: Probenahme an Prüfstücken des Masts 65

Mast 22, Eckstiel
Prüfstück M22-30

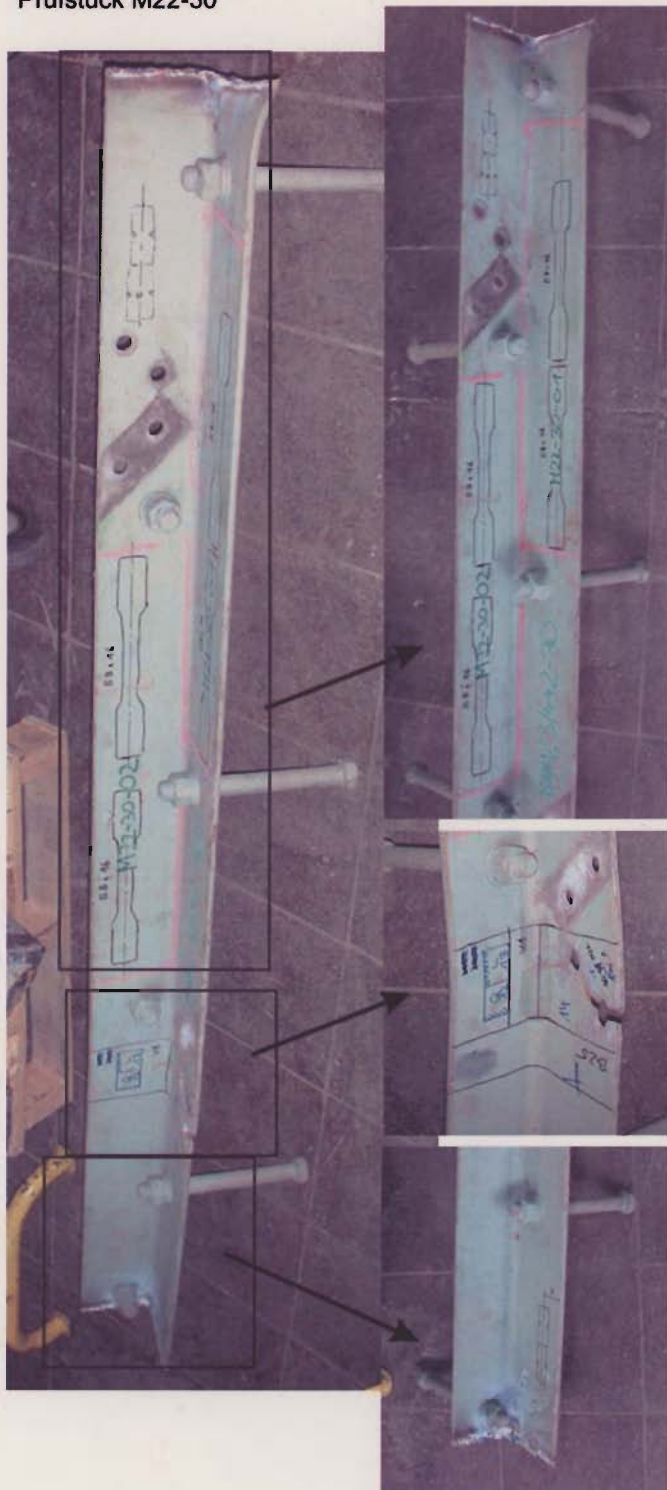


Bild 93: Probenahme an Prüfstücken des Masts 22, Eckstiel

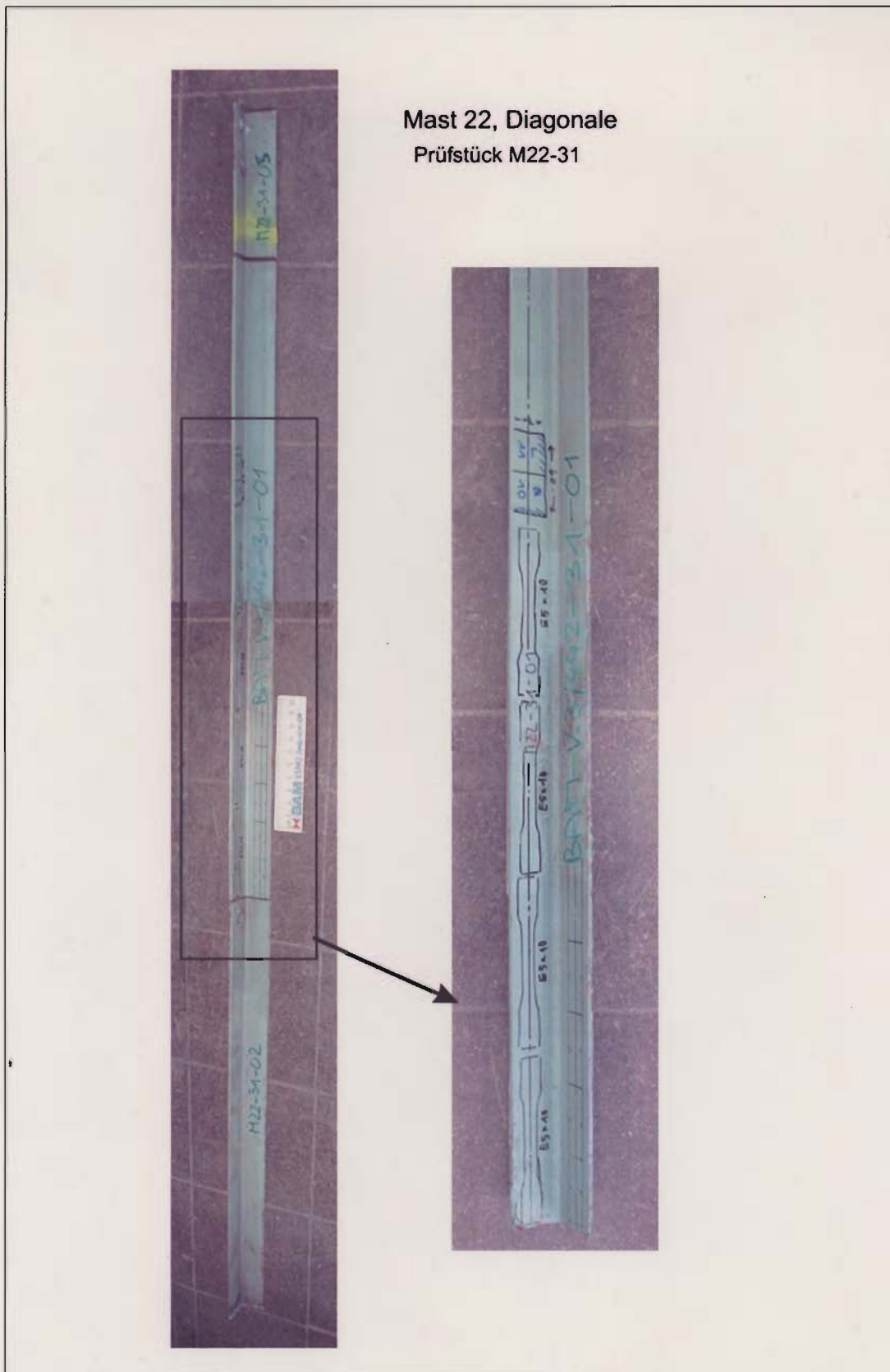


Bild 94: Probenahme an Prüfstücken des Masts 22, Diagonale

Mast 73, Eckstiel
Prüfstück M73-14



Mast 73, Diagonale
Prüfstücke M73-13 und -13R



Bild 95: Probenahme an Prüfstücken des Masts 73

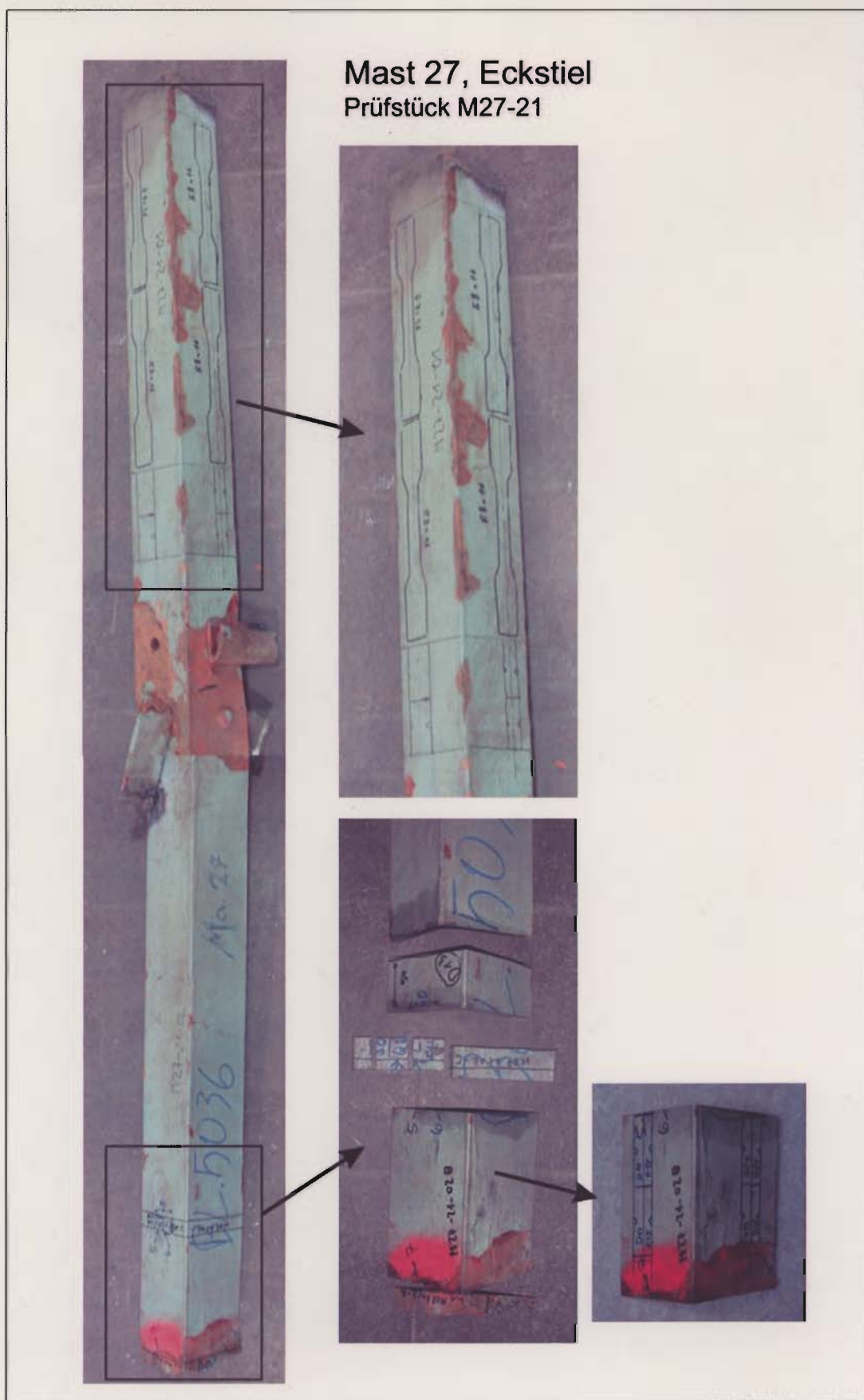


Bild 96: Probenahme an Prüfstücken des Masts 27

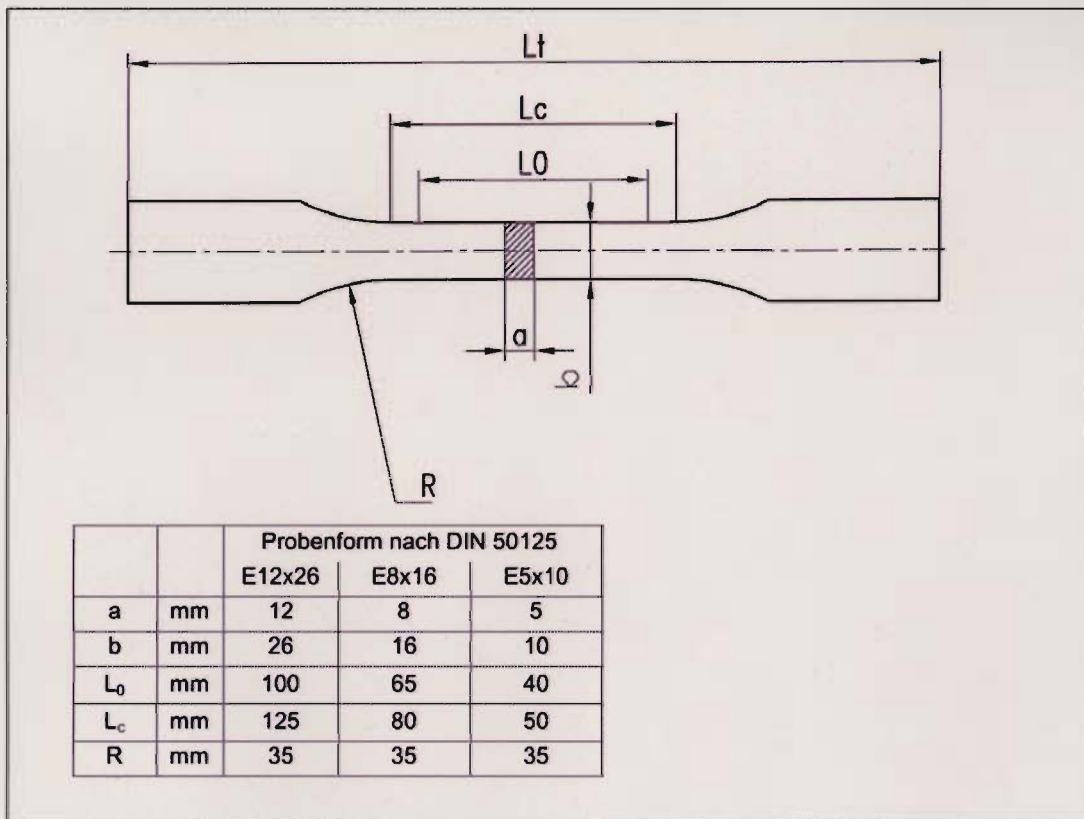


Bild 97: Form und Maße der Zugproben

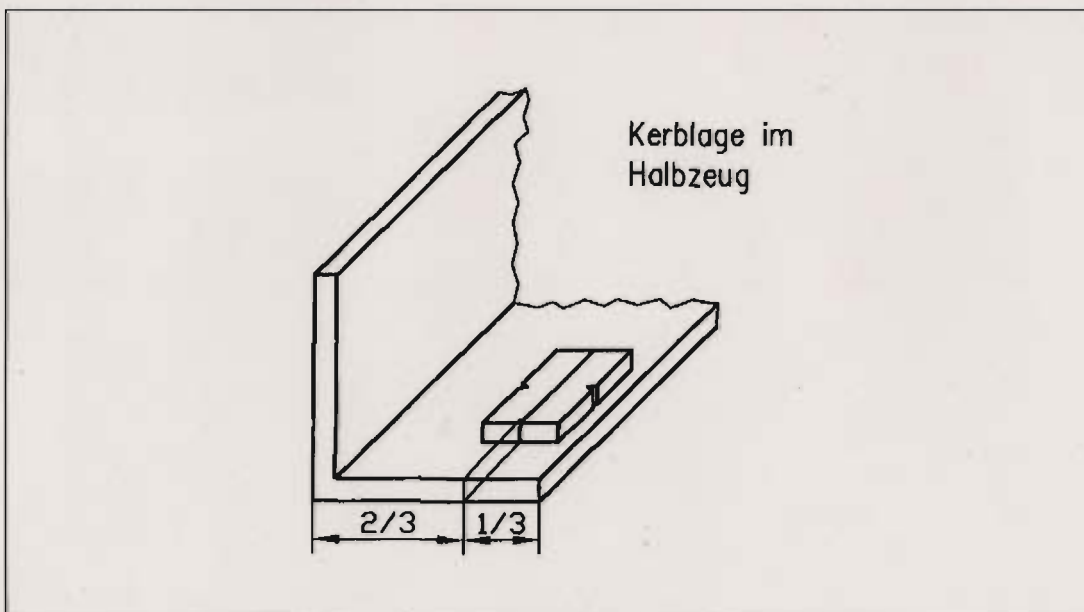


Bild 98: Kerbschlagbiegeproben, Probelage und Kerblage im Winkelprofil

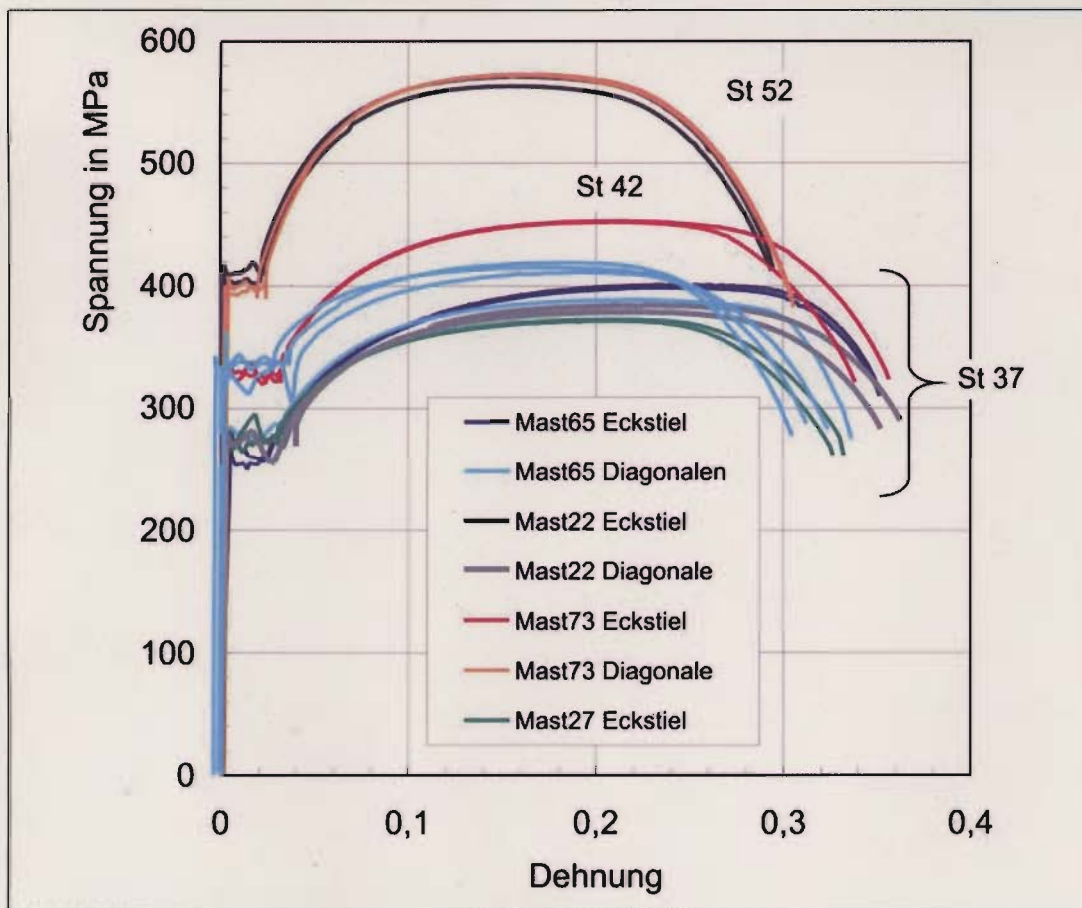
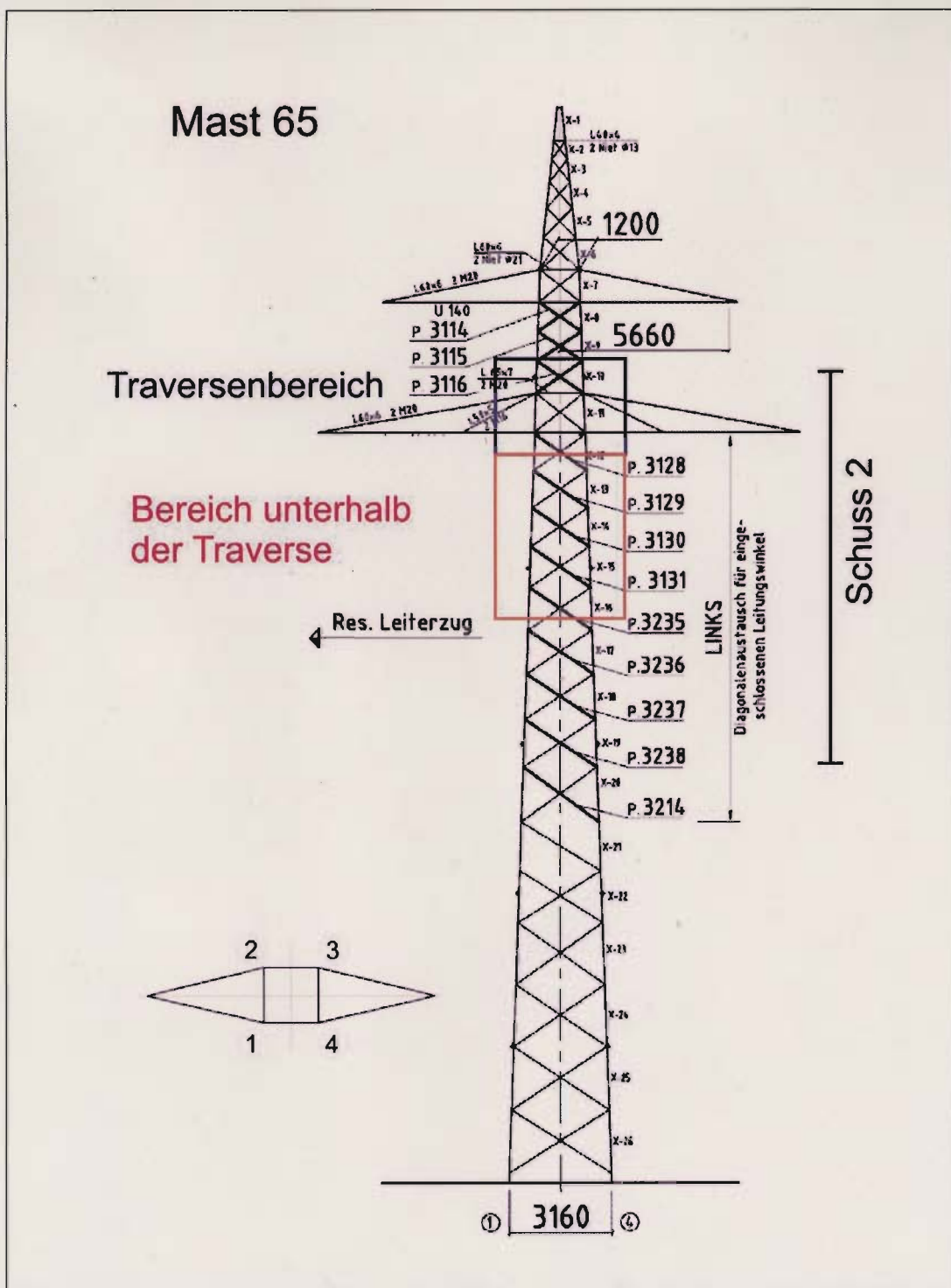


Bild 99: Spannungs-Dehnungskurven der Zugversuche



Wand 2-3

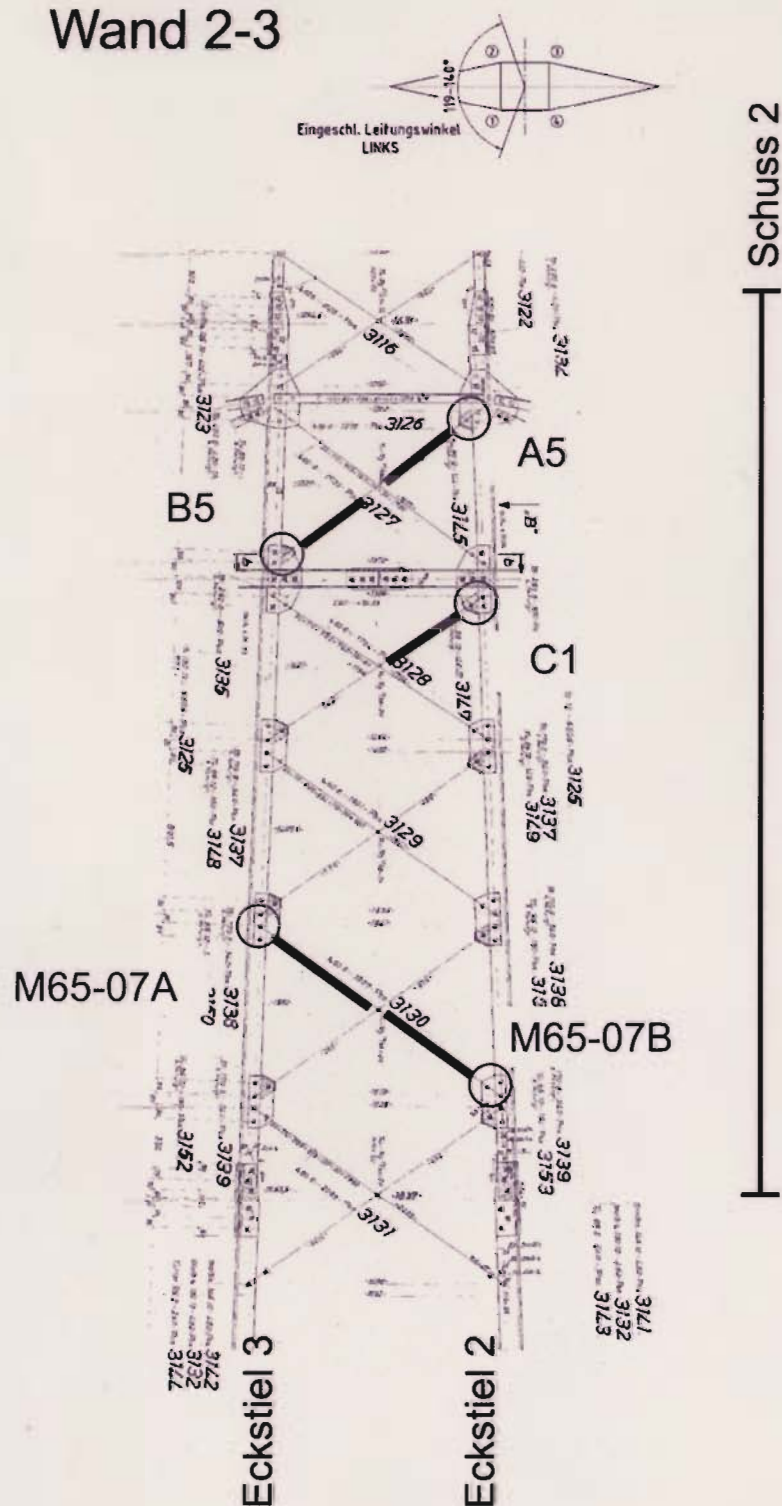


Bild 102: Lage der geprüften Bauteile bzw. deren Diagonalen im Mast 65, Schuss 2, Wand 2-3

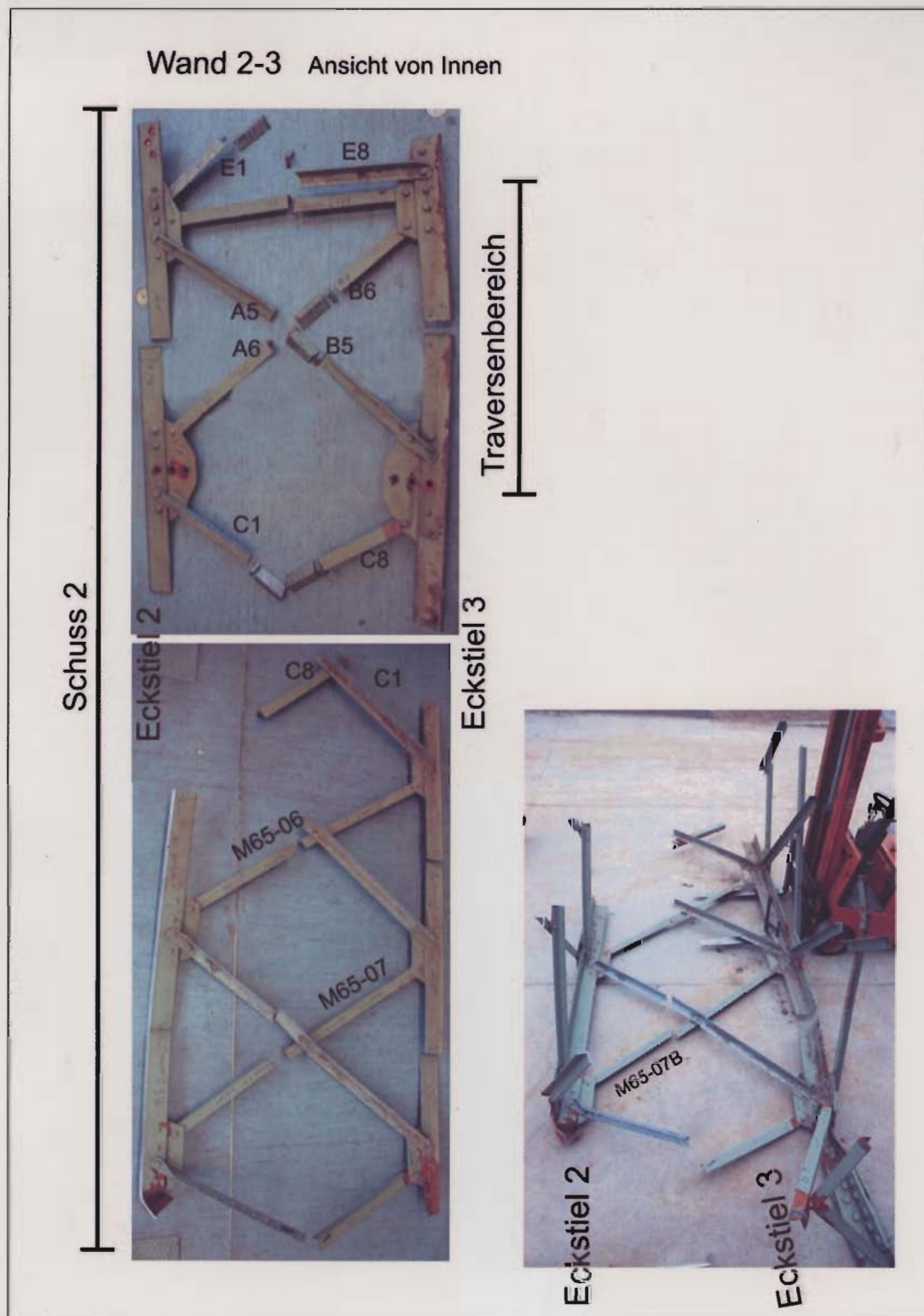


Bild 103: Bilder der zerteilten Wand 2-3, Mast 65, Schuss 2,

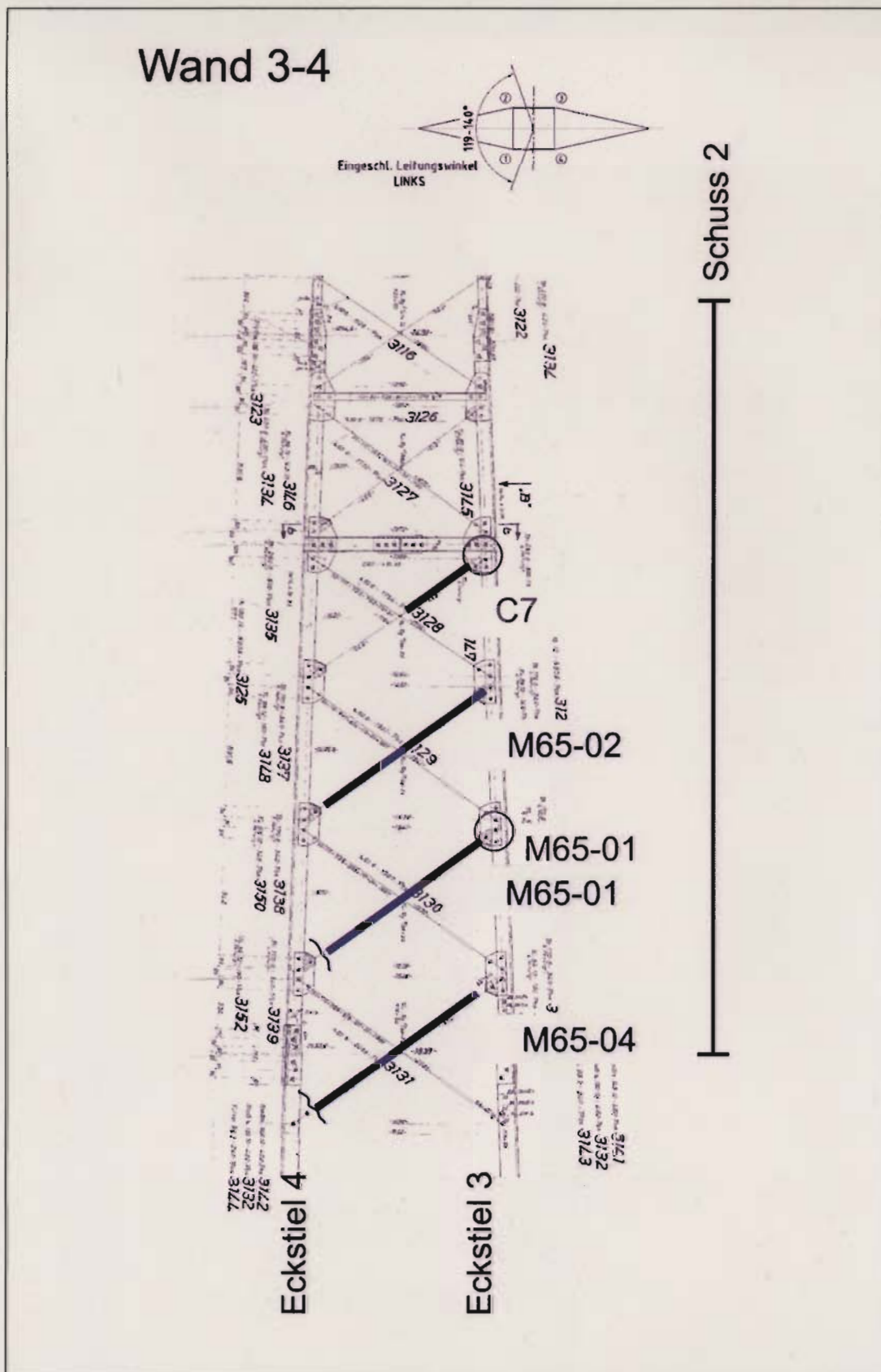


Bild 104: Lage der geprüften Bauteile bzw. deren Diagonalen und der Schadensteile im Mast 65, Schuss 2, Wand 3-4

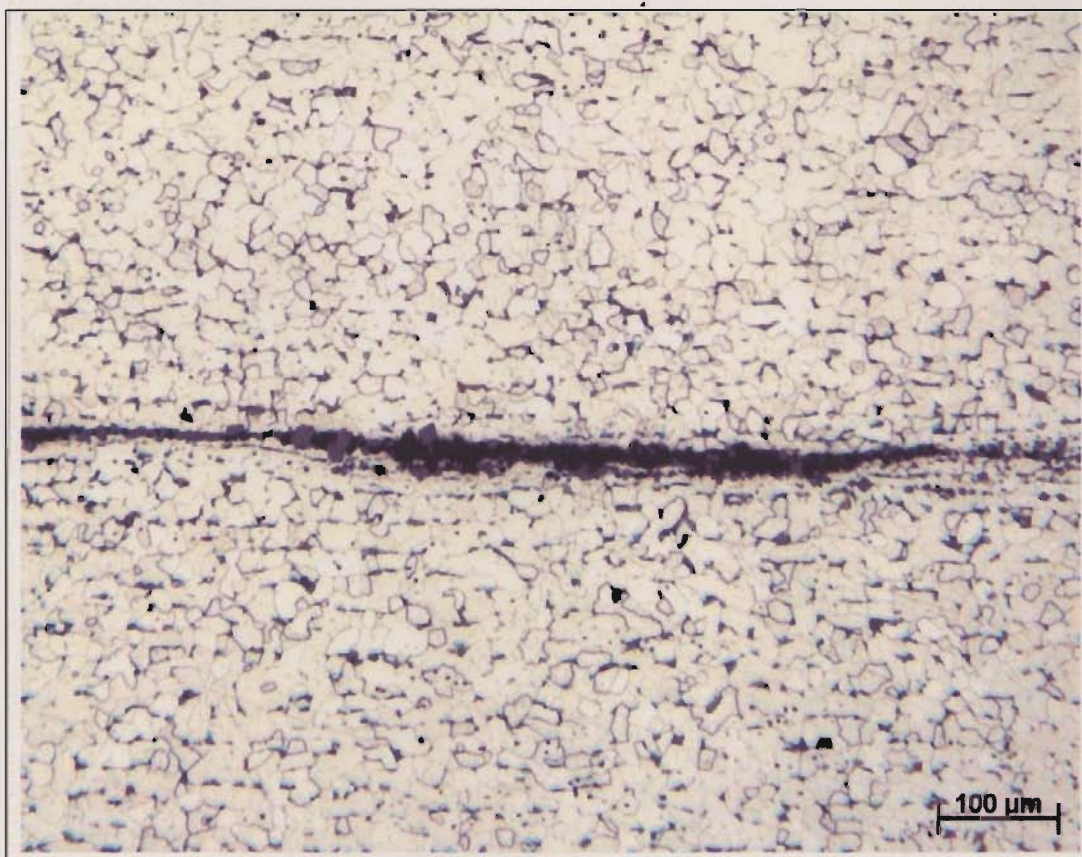


Bild 105: Zeiliger Einschluss in Probe C3. Nach EDX-Analyse überwiegend bestehend aus Aluminiumoxid.

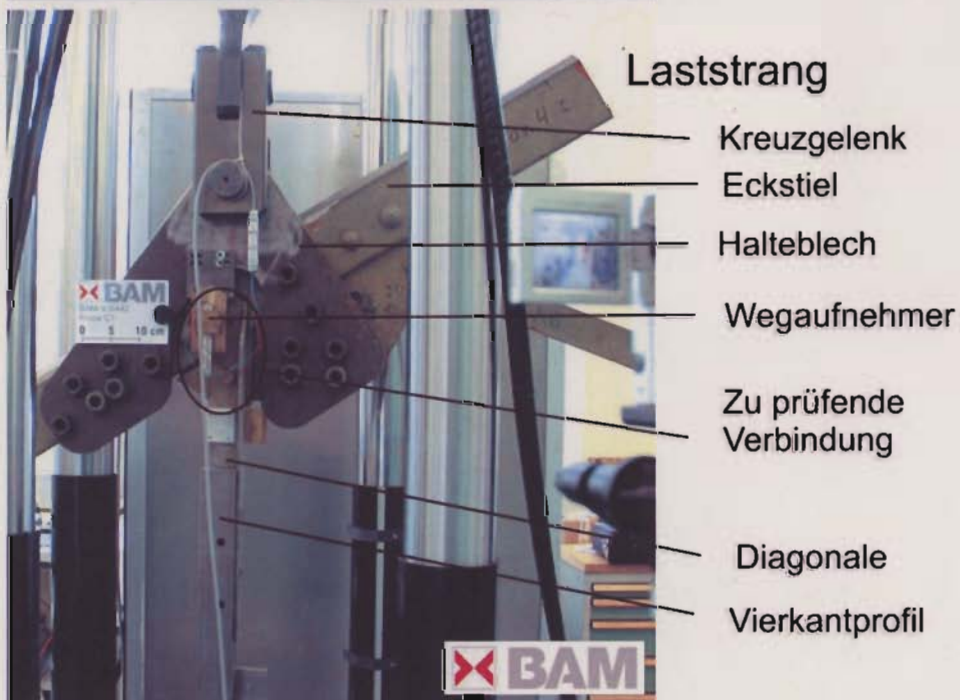


Bild 106: Prüfaufbau der Bauteilzugversuche

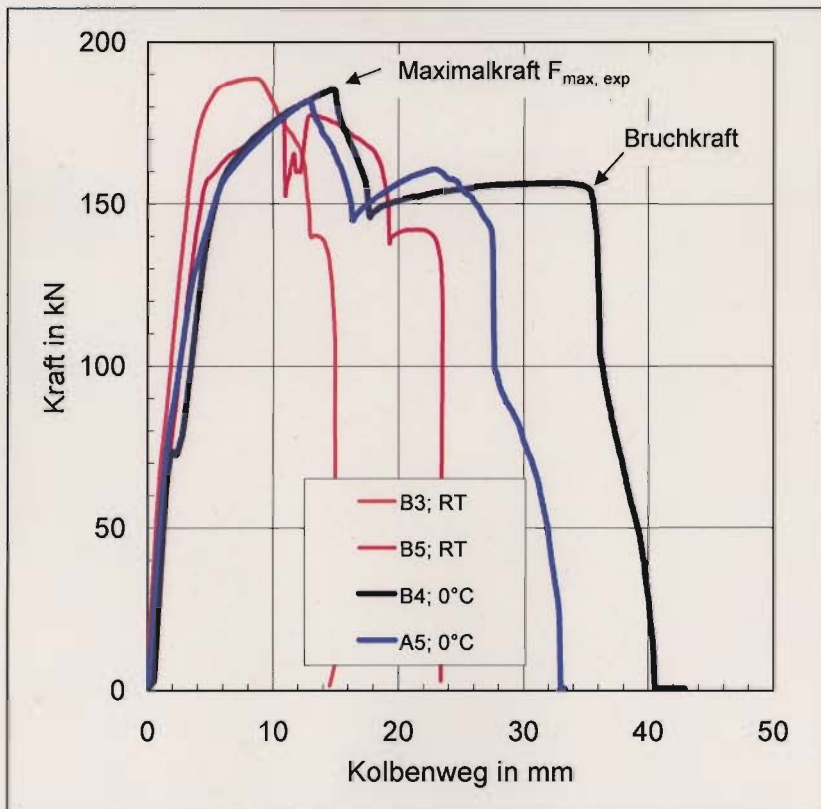


Bild 107: Kraft-Kolbenweg-Kurven der Bauteilzugversuche mit einem Lochdurchmesser 21 mm, Prüftemperatur 23 °C

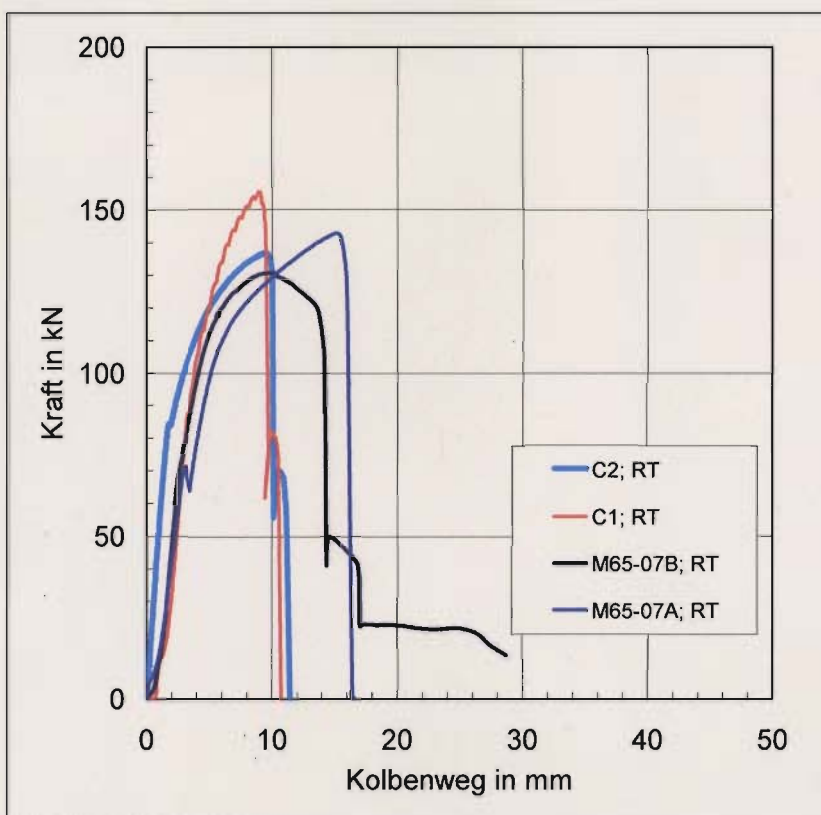


Bild 108: Kraft-Kolbenweg-Kurven der Bauteilzugversuche mit einem Lochdurchmesser 17 mm, Prüftemperatur 23 °C

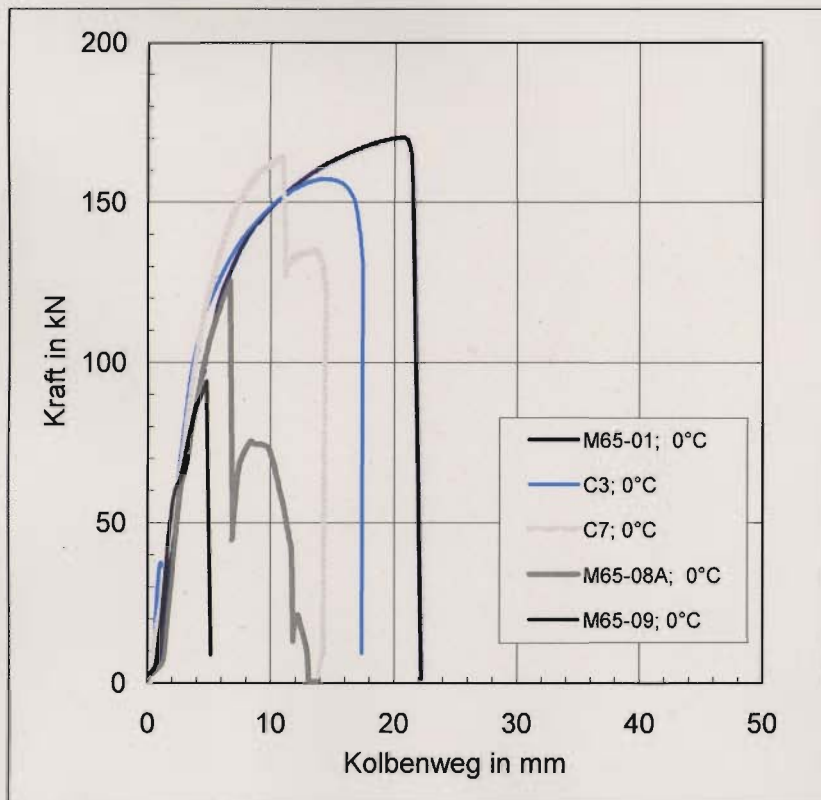


Bild 109: Kraft-Kolbenweg-Kurven der Bauteilzugversuche mit einem Lochdurchmesser 17 mm, Prüftemperatur 0 °C

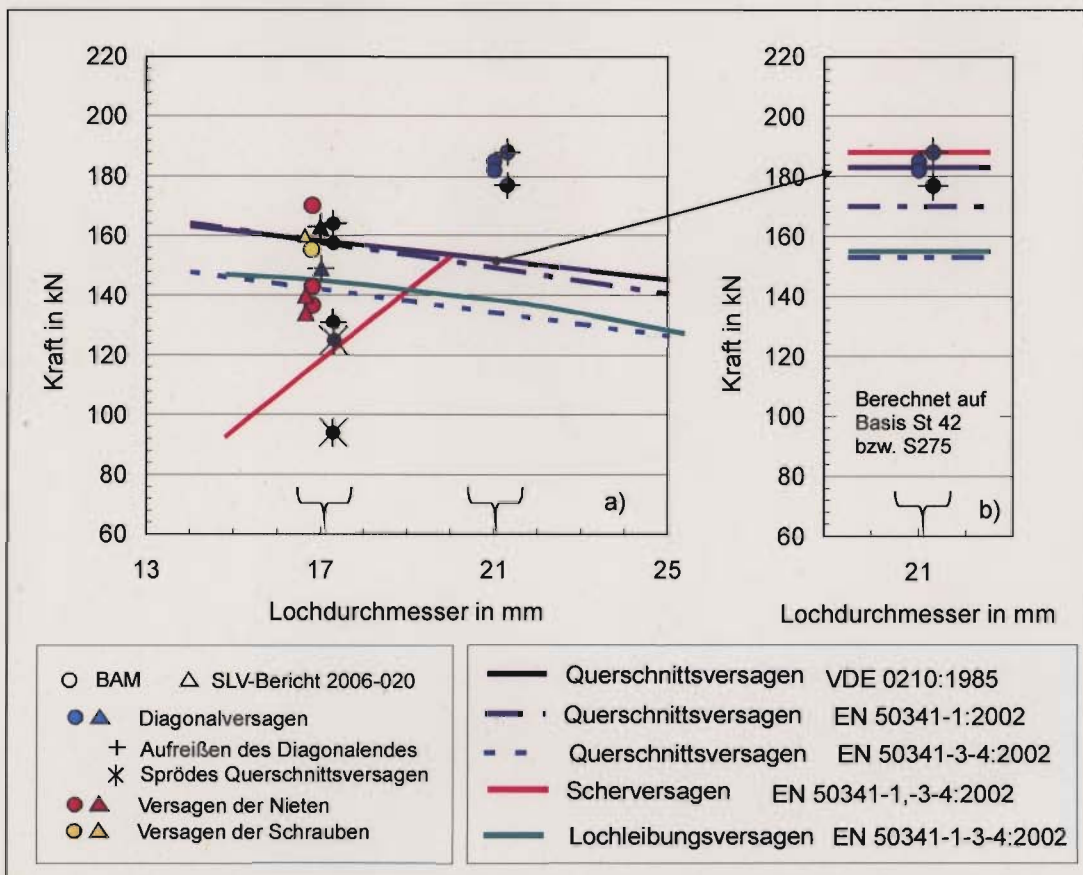


Bild 110: Gegenüberstellung der Ergebnisse der Zugversuche an Bauteilen des Masts 65 mit den berechneten Beanspruchbarkeiten, berechnet nach verschiedenen Regelwerken

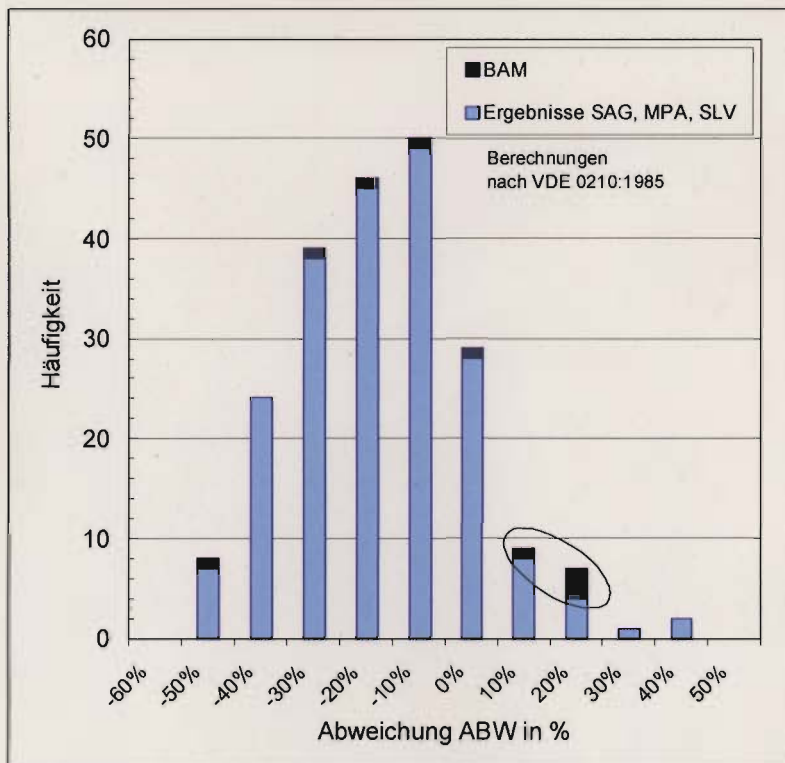


Bild 111: Häufigkeitsverteilung der Abweichung ABW, im Bild sind die BAM-Versuche gekennzeichnet, die Festigkeitswerte eines St 42 zeigen, aber auf St 37-Werte bezogen wurden

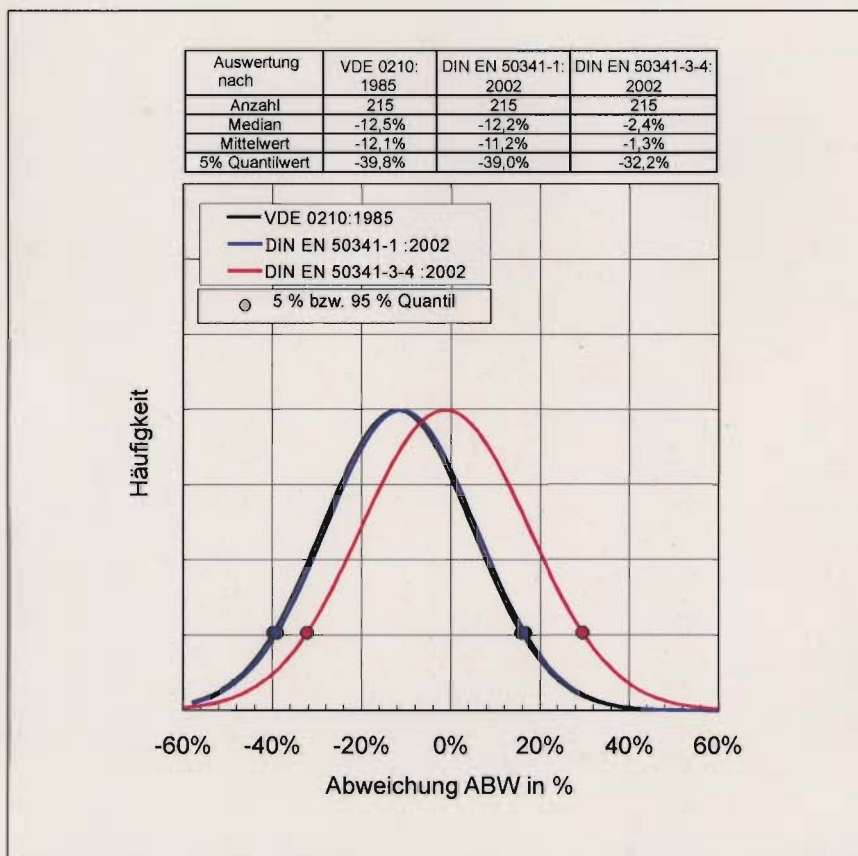


Bild 112: Verteilungsfunktionen und statistische Werte der Abweichung ABW, berechnet nach mehreren Regelwerken

13.9 Einwirkungen

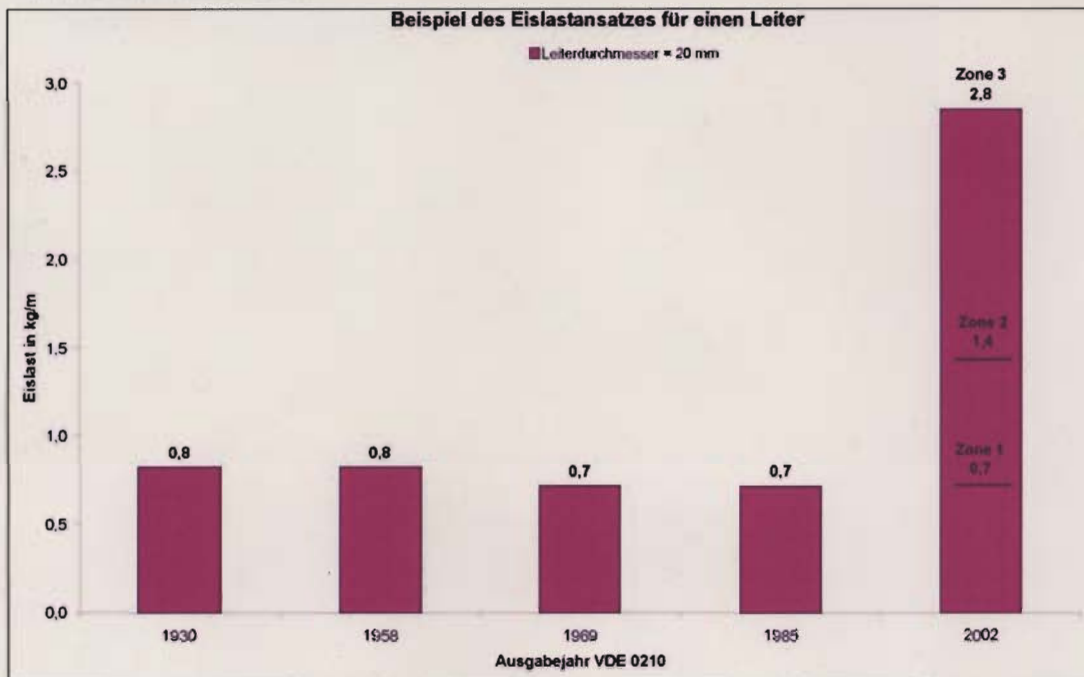


Bild 113: Eislastansatz in den verschiedenen Ausgaben des Freileitungsregelwerks

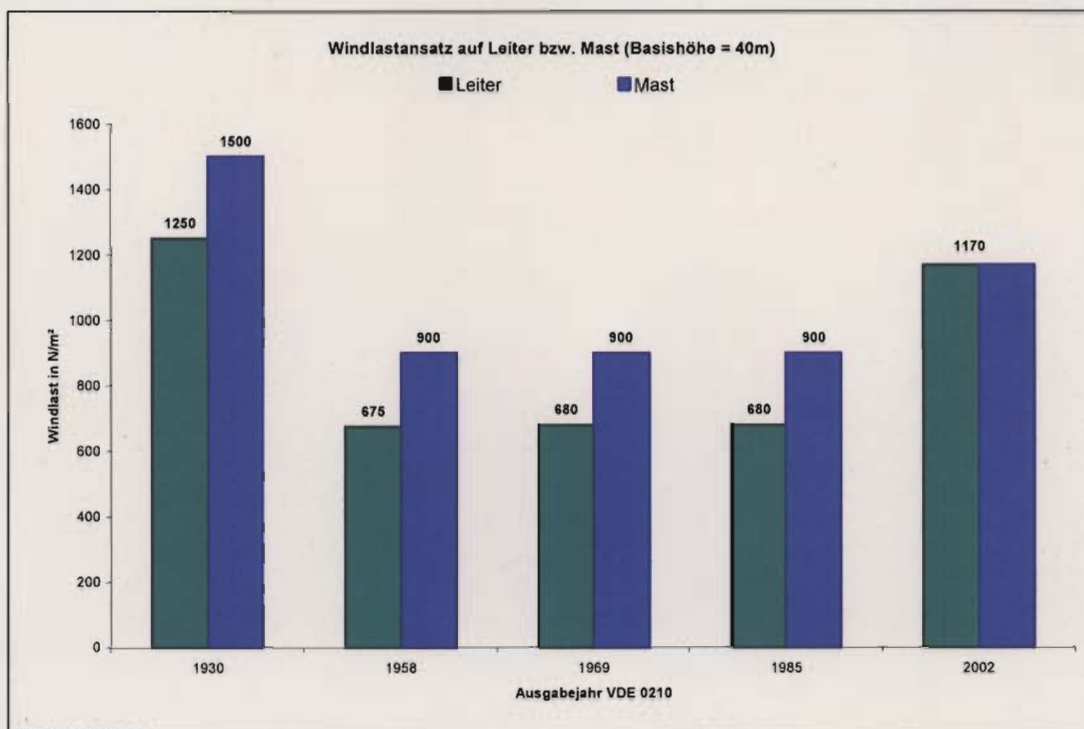


Bild 114: Windlastansatz in den verschiedenen Ausgaben des Freileitungsregelwerks



Bild 115: Schneewalzen auf allen Seilen, auch Erdseil, BL1525 Metelen-Roxel, südlich Leer zw. Mast 26 und 27, 26.11.2005, 15Uhr Foto Moog, [70]



Bild 116: IMG_7995: Abgeschlagene Schneewalze, BL1503 Gronau – Coesfeld (110 kV), östlich von Legden, 28.11.2005, Foto M. Stehr, [64].

13.10 Statische Untersuchungen

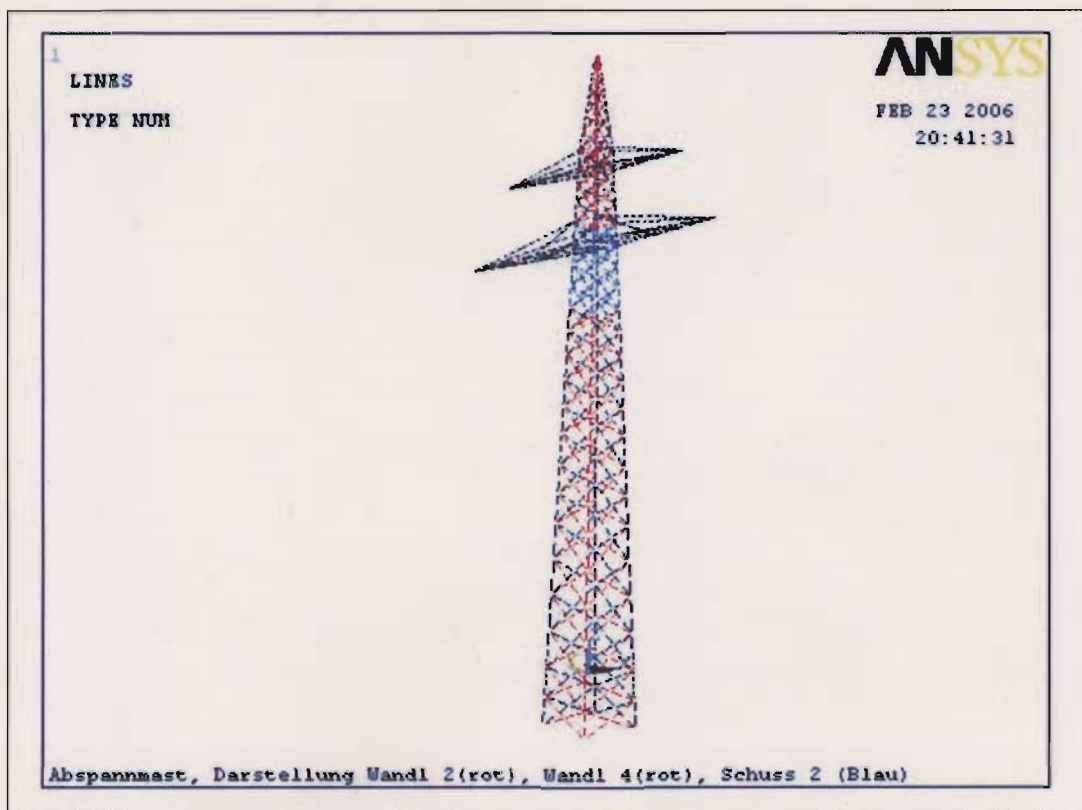


Bild 117: Statische System des Wickelabspannmasts BL1503 M65

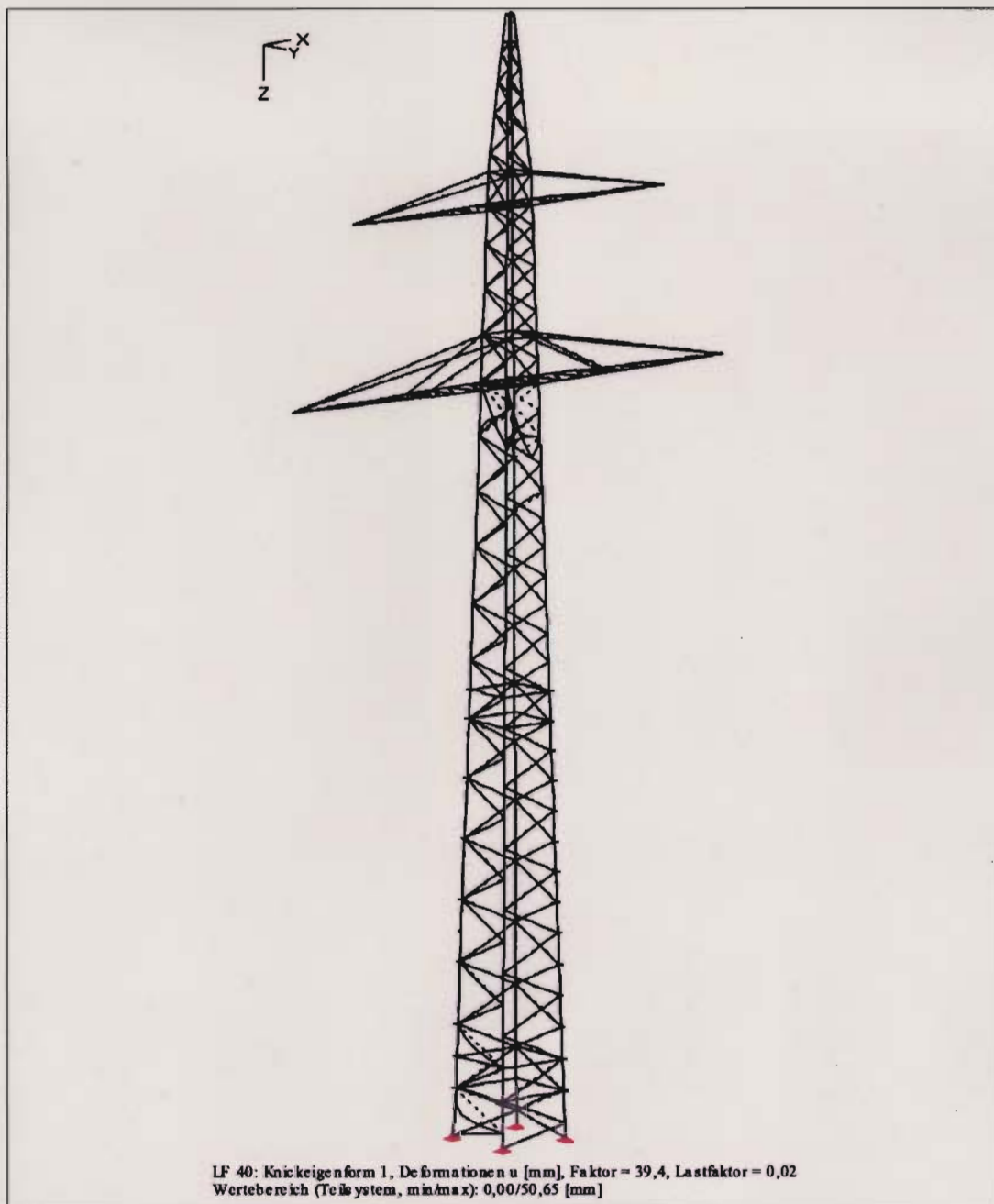


Bild 118: Statische System des Tragmasts BL1503 M66

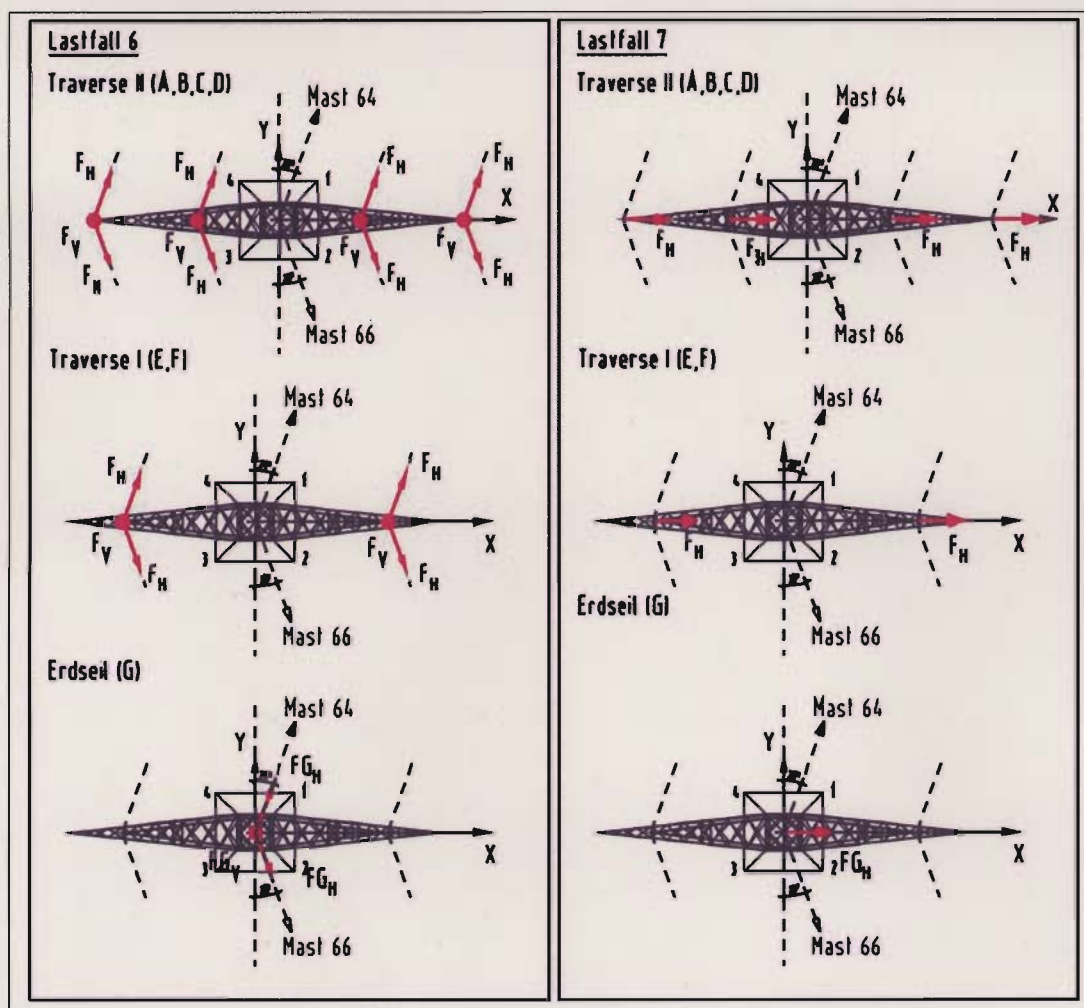


Bild 119: Darstellung Lastfall 6 und Lastfall 7

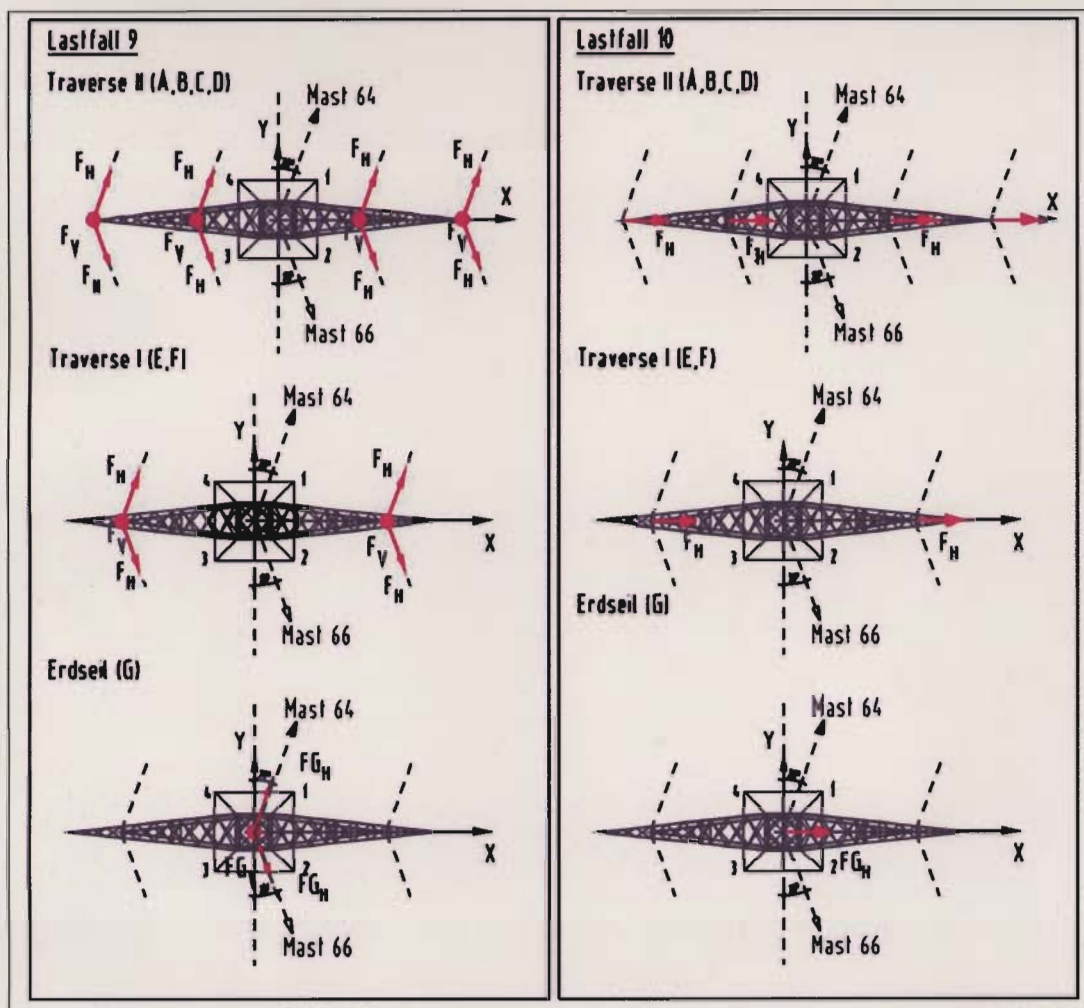


Bild 120: Darstellung Lastfall 9 und Lastfall 10

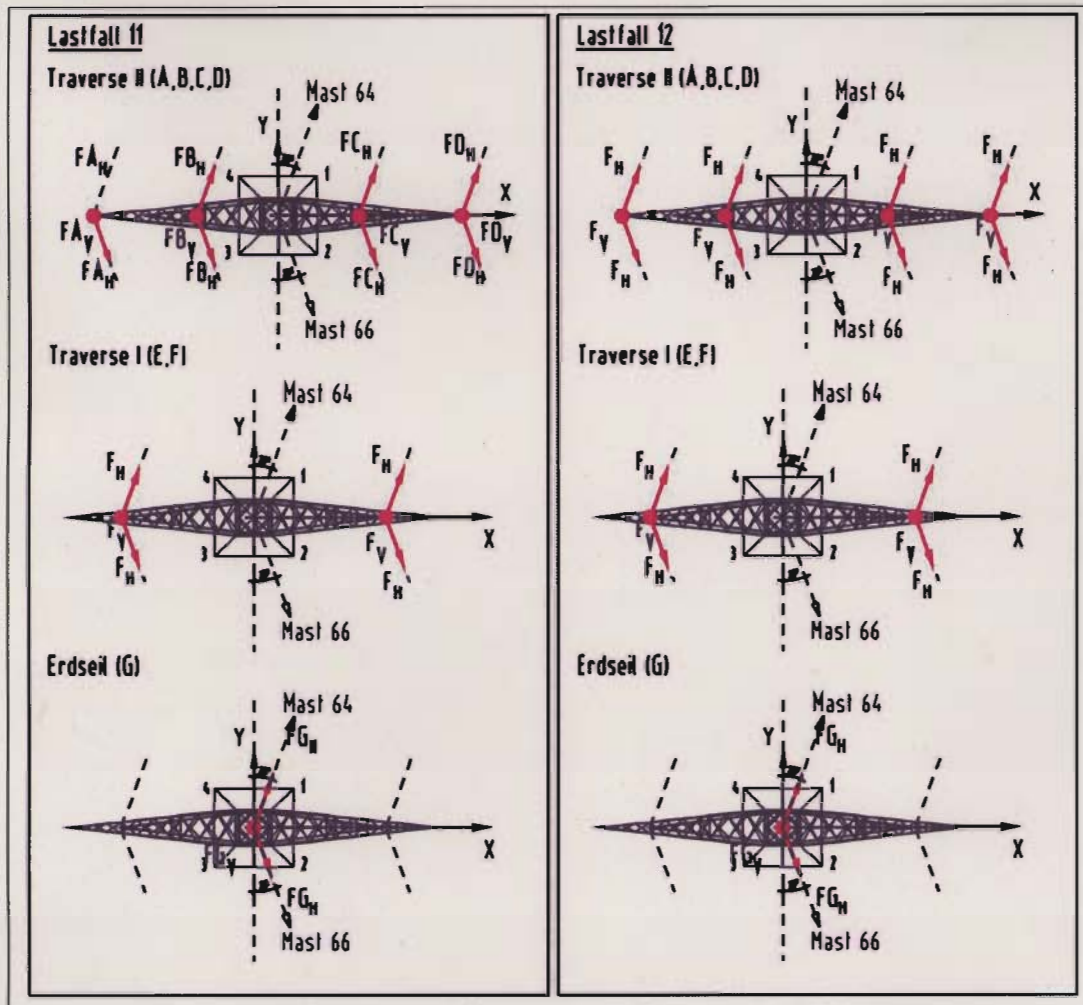


Bild 121: Darstellung Lastfall 11 und Lastfall 12

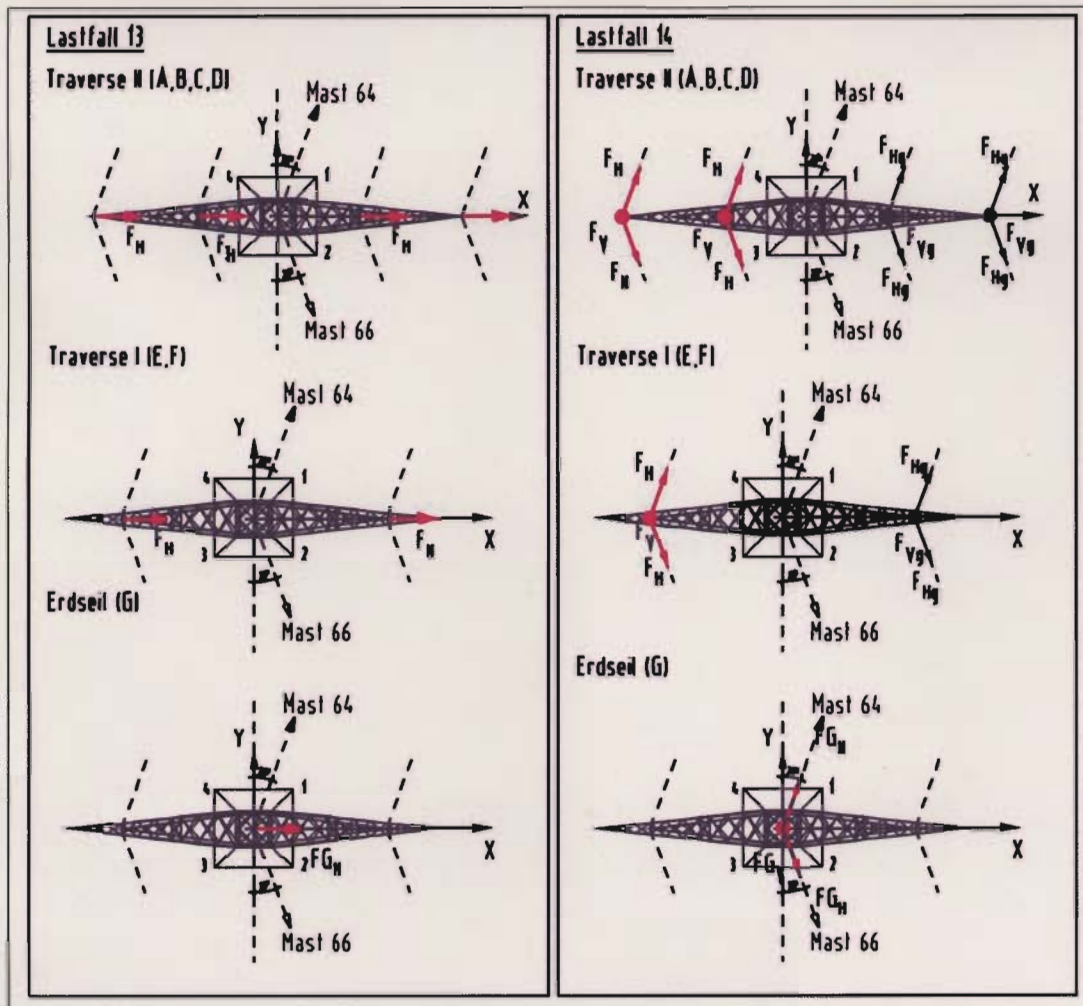


Bild 122: Darstellung Lastfall 13 und Lastfall 14

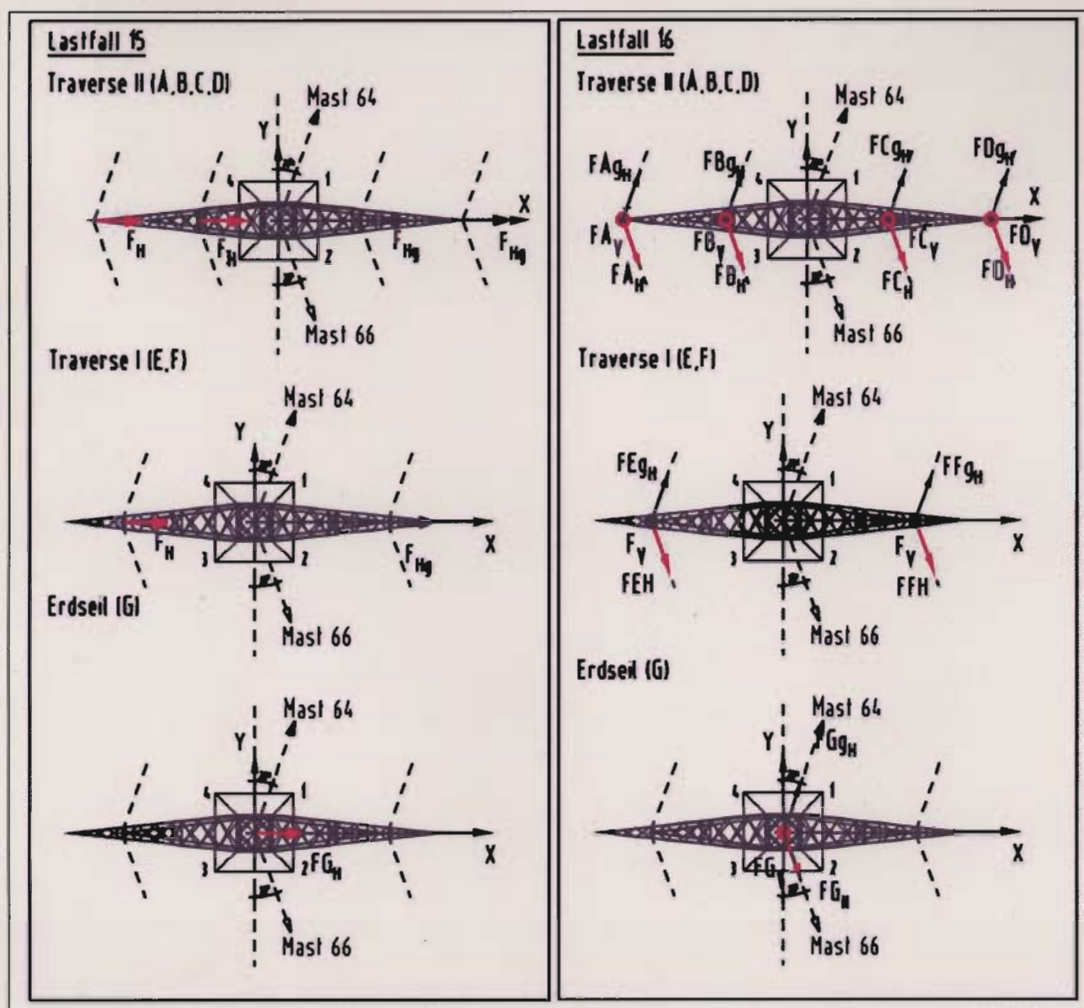


Bild 123: Darstellung Lastfall 15 und Lastfall 16

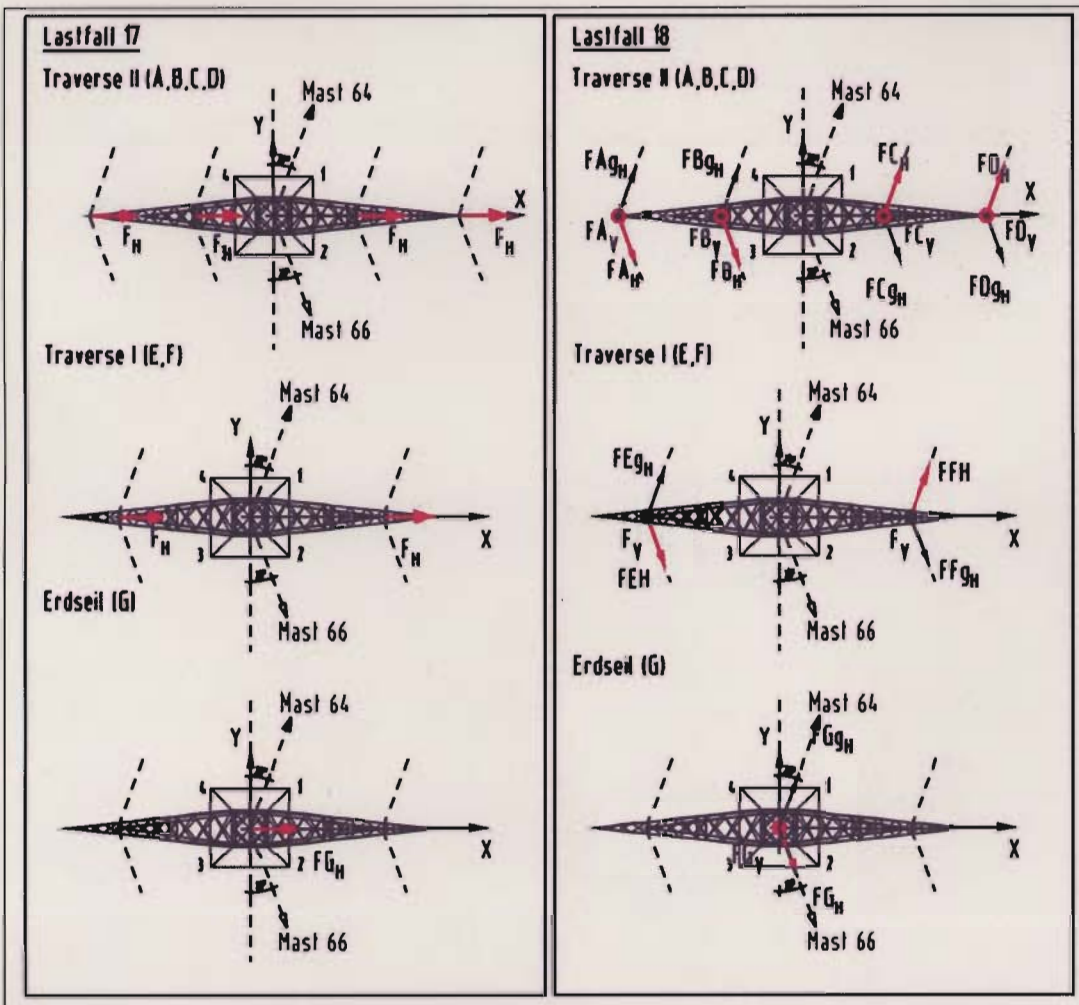


Bild 124: Darstellung Lastfall 17 und Lastfall 18

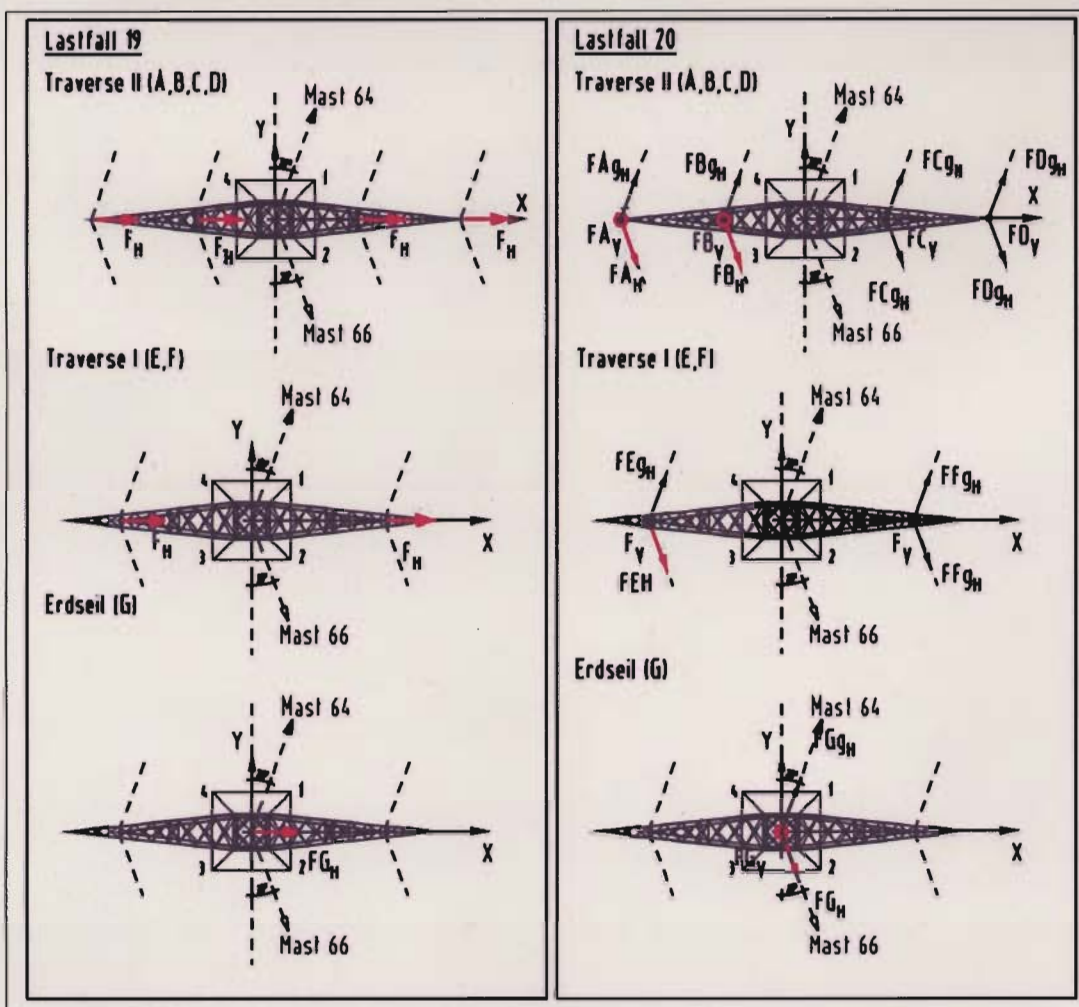


Bild 125: Darstellung Lastfall 19 und Lastfall 20

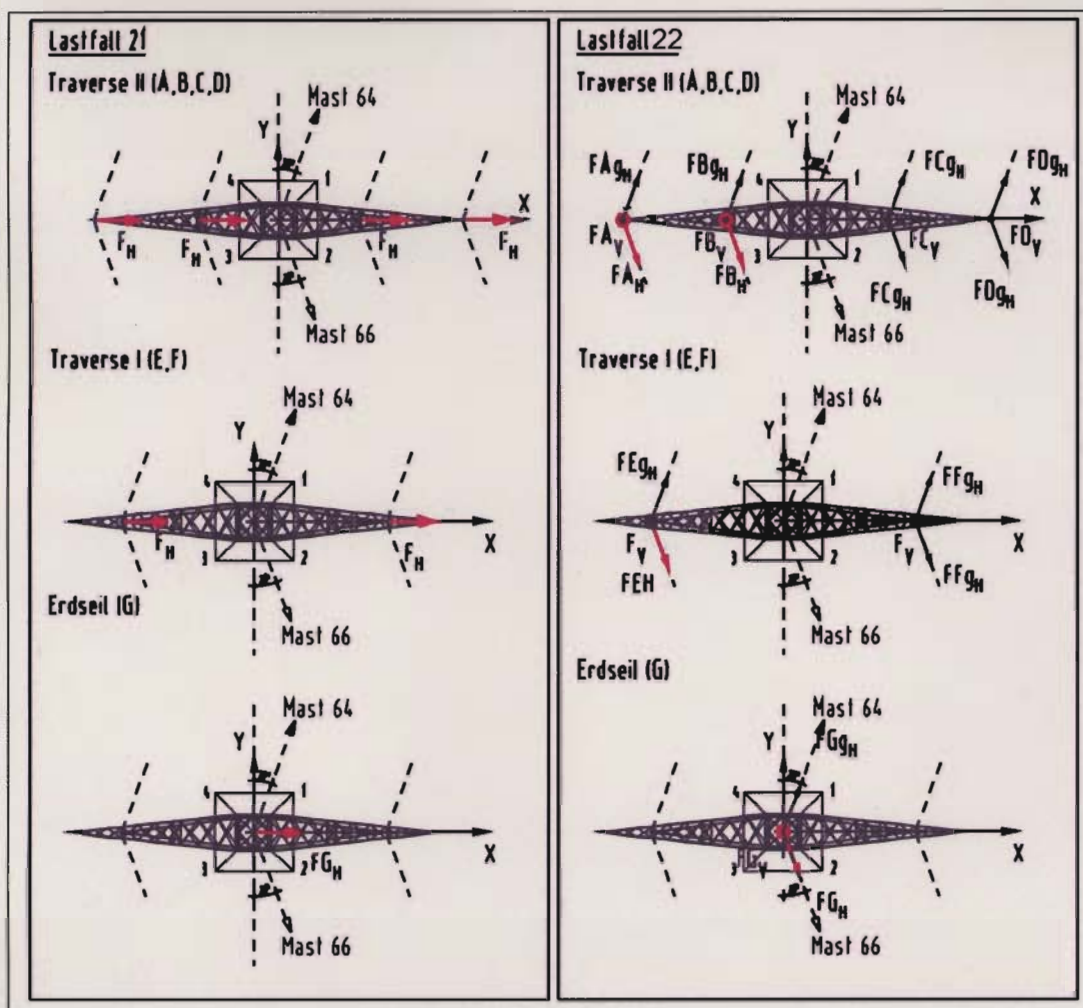


Bild 126: Darstellung Lastfall 21 und Lastfall 22

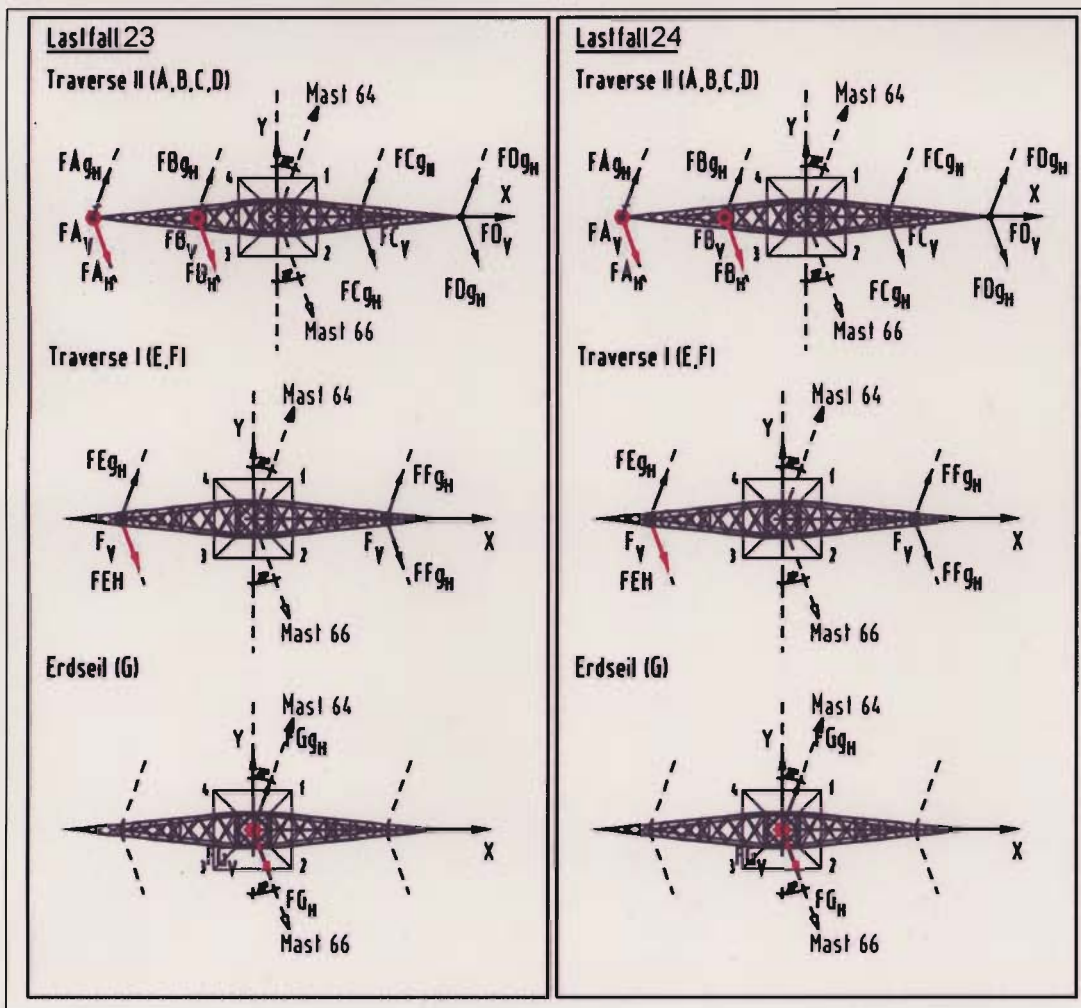


Bild 127: Darstellung Lastfall 23 und Lastfall 24

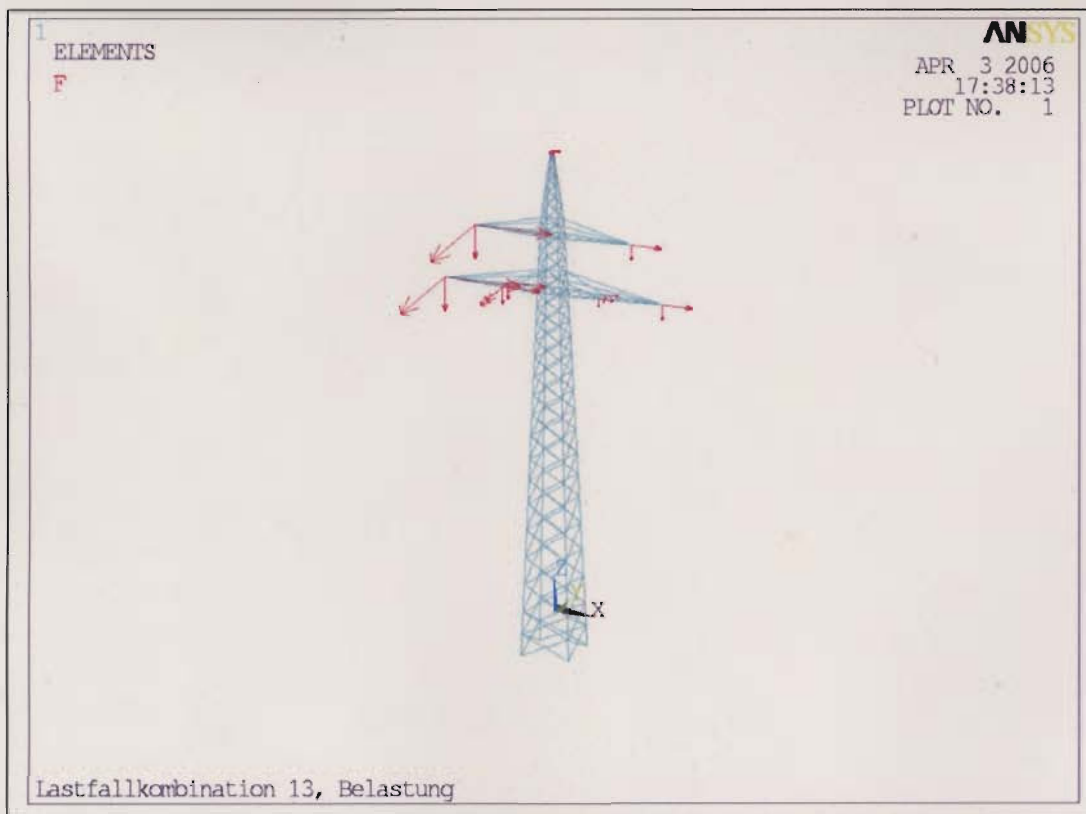


Bild 128: Darstellung der Belastung im Versagenslastfall LG13

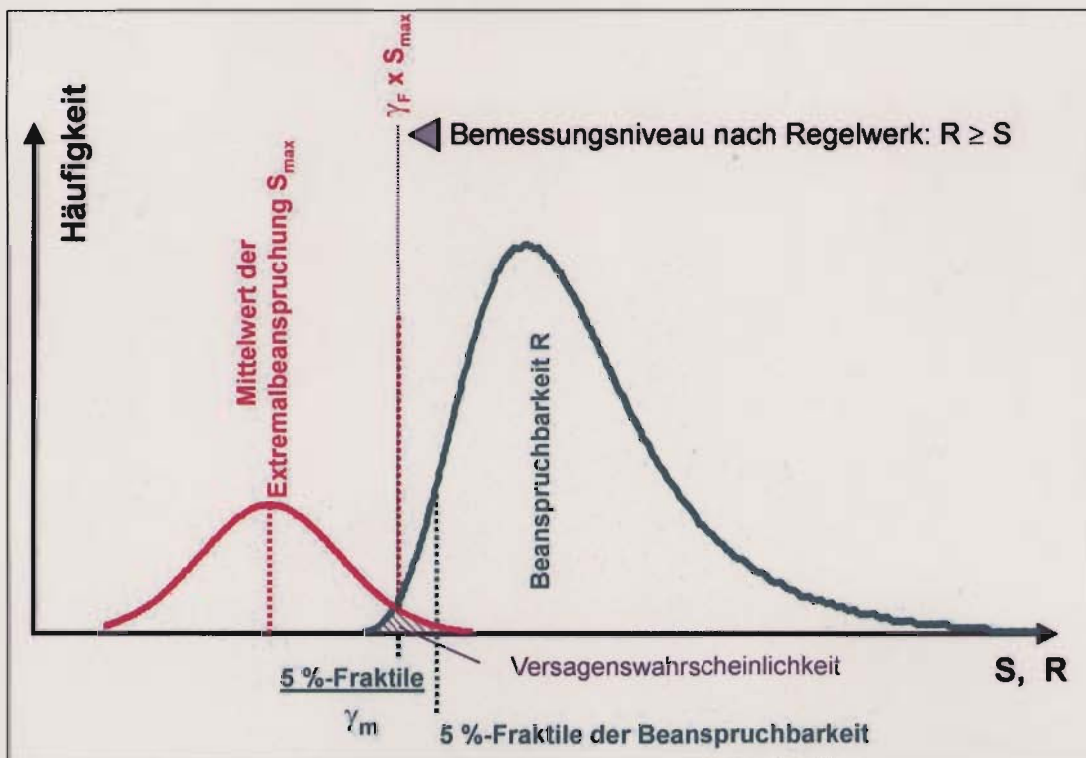
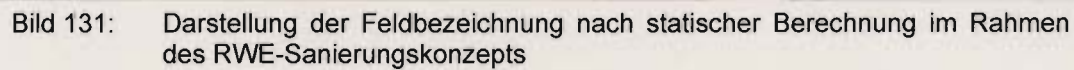


Bild 129: Schematische Darstellung des Bemessungskonzeptes der Tragwerke



Bild 130 Stabilitätsversagen in der 1. Knickeigenform nach Versagen der Zugdiagonale



**BAM****Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung**D-12200 Berlin
Telefon: 030/8104-0
Telefax: 030/8112029Dieses Dokument darf nur in
vollem Wortlaut und ohne
Zusätze veröffentlicht
werden. Für die veränderte
Wiedergabe und Auszüge
ist vorher die widerrufliche
schriftliche Einwilligung der
BAM einzuholen

Ergänzung zum BAM-Gutachten:

**Schadensanalyse an im Münsterland
umgebrochenen Strommasten**

Aktenzeichen: V.3/442
Ausfertigung: Elektronische Version von Ausfertigung 1 von 3,
rechtsverbindlich ist ausschließlich die gesie-
gelte Papier-Version
Umfang: Seite 1 von 1

Änderungen und Ergänzungen:

- S. 10, 1.2, 3. Punkt, vorletzte Zeile: „die abgerhnenen“ ersetzen durch „viele der umgebrochenen“
- S. 11, Tabelle, drittletzte und vorletzte Zeile, bei „o.ä“ jeweils ein Leerzeichen nach „o.“ einfügen.
- S.13, 2. Tabelle Dimensionen, Ende der 2. Zeile, 1 Mpa ersetzen durch: "1 MPa"
- S. 13, 2. Tabelle Dimensionen, 3. Zeile „entdpricht“ ersetzen durch „entspricht“
- S. 13, 1.5 Ende 1. Zeile: Bindestrich nicht von „ablaufs“ trennen
- S. 26, vorletzte Zeile, ...Ovale... ersetzen durch: „...ovale...“
- S. 65, Kap. 7.5 erster Satz ändern in: "...für den Winkelabspannmast M65..."
- S. 65, Kap. 7.5 erster Satz nach den fünf Bulletpoints ändern in: "...Umbruch des Winkelabspannmastes M65. Die Übertragung des Schadensablaufs auf andere ist denkbar, Kap. 7.4.2."
- S. 73, Quelle [16], ...a-Eisen... ersetzen durch "...α-Eisen..."
- S. 76, Quelle [72], ...220/380-kv... ersetzen durch "...220/380-kV... "
- S. 91, Tabelle 16, Fußnote 1) "...:2995" ersetzen durch:"...:1995"
- Bilder 14, 18, 31, 32, 33, 52, 53, 55: Bildunterschrift am Ende ergänzen um:
"[Quelle: RWE]"
- Bilder 18, 19, 20, 34, 36, 44, 45, 46, 47, 49, 51, 54, 100, 101, 102, 104, 131:
Bildunterschrift am Ende ergänzen um: "[nach RWE]"
- S. 190, Bild 110,
im Bild ersetzen durch: " ...des Diagonalenendes"
im Bild ersetzen durch: "Lochleibungsversagen EN 50341-1-1, -3-4:2002"
in der Bildunterschrift ersetzen: "...verschiedenen..."
aus der Bildunterschrift löschen: "Schematische Darstellung des
Bemessungskonzeptes der Tragwerke"

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
12200 Berlin
2006-05-19

(Unterschriften)

GUTACHTEN