

537 | November 1993

SCHRIFTENREIHE SCHIFFBAU

Hans Paetzold

Betriebsfestigkeit einer Lukenecke

TUHH

Technische Universität Hamburg-Harburg

Betriebsfestigkeit einer Lukenecke

Hans Paetzold, Hamburg, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1993

© Technische Universität Hamburg-Harburg
Schriftenreihe Schiffbau
Schwarzenbergstraße 95c
D-21073 Hamburg

<http://www.tuhh.de/vss>

INSTITUT FÜR SCHIFFBAU DER UNIVERSITÄT HAMBURG

Bericht Nr. 537

Betriebsfestigkeit einer Lukenecke

Hans Paetzold

November 1993

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Stand der Wissenschaft und Technik	2
3	Schwingfestigkeitsuntersuchung mit dem Bauteilmodell Lu- kenecke	3
3.1	Herstellung der Versuchsmodelle	3
3.2	Versuchsaufbau und -durchführung	4
3.3	Spannungsanalyse	5
3.4	Einstufen-Dauerschwingversuche	5
3.5	Betriebsfestigkeitsversuche	7
4	Schlußfolgerung	8
5	Schrifttum	8
A	Tabellen	10
B	Parameter zur Generierung der Last-Zeit-Funktion	11
C	Abbildungen	13

1 Einleitung

Im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Zukünftige Dimensionierung und Gestaltung der Schiffskonstruktion“ des Bundesministeriums für Forschung und Technologie wurde die Idee verfolgt, an ausgewählten Konstruktionsdetails des tragenden Schiffsverbandes Konzepte der Lebensdauerbestimmung unter betriebsähnlichen Bedingungen experimentell zu überprüfen.

In der vorliegenden Arbeit wird das Kerbgrundkonzept für Kerben im Bereich des Grundwerkstoffes am Beispiel der Lukenecke angewendet.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Auslegung der tragenden Schiffskonstruktion ist gekennzeichnet durch eine mehr qualitative Berücksichtigung der Belange der Betriebsfestigkeit. Ein typisches Beispiel ist die Bemessung der Lukeneckkonstruktion.

Anrisse im Bereich der Lukenecken der SL-7-Containerschiffe [1] während des Schiffsbetriebes zeigen die Bedeutung der Auslegung nach Kriterien der Betriebsfestigkeit. Die derzeitige Entwicklung von Containerschiffen mit PanMax-Breite und erhöhter Containerzahl über die Breite bei verringerter Wallgangbreite und kleineren Lukeneckradien unterstreicht diese Bedeutung noch.

Zur Zeit wird abhängig vom eingesetzten Werkstoff (normalfester bzw. höherfester Stahl) das Einhalten einer zulässigen Höchstspannung gefordert [2]. Es besteht jedoch Grund zu der Annahme, daß diese Spannungen bei einer Auslegung nach Kriterien der Betriebsfestigkeit modifiziert werden könnten.

Erste Ansätze zu einer quantitativen Bewertung der Betriebsfestigkeit in der Schiffskonstruktion sind in den Vorschriften des Germanischen Lloyd [2] zu finden. Sie beruhen wie die Regelwerke und Empfehlungen ähnlicher Anwendungsbereiche auf dem Nennspannungskonzept [3] [4].

Grundlage sind zumeist Ergebnisse von Versuchen an Kleinproben [5]. Selbst eine so umfangreiche Studie über die Betriebsfestigkeit schiffbaulicher Konstruktionsdetails wie in [6] benutzt ausschließlich Ergebnisse aus Einstufenversuchen an Kleinproben. Bauteilversuche sind zumeist in Form von Untersuchungen an Biegeträgern durchgeführt worden. So wurde in den USA ein großes Versuchsprogramm durchgeführt [7], das sich jedoch auf Einstufenbelastung beschränkt. Versuche an Bauteilmodellen aus der Schiffskonstruktion sind in Japan [8] [9] und Polen [10] durchgeführt worden. Es handelt sich dabei zum größten Teil um Einstufenversuche. Vielfach sind auch die Anforderungen an eine statistische Absicherung der Ergebnisse nicht erfüllt.

Die Entwicklung des örtlichen Konzeptes (Kerbgrundkonzept) für freie Blechkanten ist in [11] mit einer Vielzahl von Schrifttumshinweisen belegt, von denen hier [12] und [13] genannt seien. Bei diesem Konzept wird an der anrißgefährdeten Stelle die elasto-plastische Beanspruchung aus der äußeren Last berechnet. Hieraus wird mit Hilfe eines geeigneten Versagenskriteriums und einer Schadensakkumulationsrechnung die Lebensdauer bestimmt. Der wesentliche Vorteil des Verfahrens liegt darin, daß der Einfluß der Konstruktionsgeometrie durch Formzahlen bzw. direkte Berechnung erfaßt werden kann. Zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens reicht dann jeweils eine Wöhlerlinie aus. Die mit diesem Verfahren bisher erreichte Vorhersagegenauigkeit ist für Einstufenbeanspruchung zufriedenstellend, läßt jedoch für regellose Beanspruchung zu wünschen übrig [13].

3 Schwingfestigkeitsuntersuchung mit dem Bauteilmodell Lukenecke

3.1 Herstellung der Versuchsmodelle

Die Bauteilmodelle sind in Abstimmung mit dem Germanischen Lloyd konstruiert worden. Dabei ist einerseits auf eine praxisgerechte Konstruktion und andererseits auf die Gegebenheiten der Versuchsanlage geachtet worden. Die 8 Bauteilmodelle sind von 4 deutschen Werften gebaut worden (siehe Tabelle 1).

In Anlehnung an das Containerschiff MS „Stuttgart Express“ [14] ist das in den Abbildungen 1 und 2 dargestellte Doppelmodell so konzipiert, daß 8 identische Kerbstellen zur Verfügung stehen. Der ursprüngliche Modellmaßstab von 1 : 5 kann nicht überall konsequent durchgehalten werden. So ist die Breite des Riegels wegen der Zugänglichkeit vergrößert. Außerdem ist der Lukenradius von $R = 50 \text{ mm}$ so gewählt, daß mit den Bauteilmodellen vertretbare Laufzeiten erreicht werden. Infolge der Doppelmodellkonfiguration sind ebenso die Einspannungsverhältnisse des Querriegels am Längsriegel verändert (Festeinspannung). Trotz der Abweichungen von der exakten Modellähnlichkeit kann davon ausgegangen werden, daß das erzielte Ergebnis im Labor auf die Lebensdauer der Großausführung übertragbar ist. Insbesondere gilt dies für die Parameter Werkstoff und Oberflächengüte.

Im Hinblick auf die Oberflächengüte ist im ursprünglichen Regelwerk des Germanischen Lloyd [2] festgehalten, wie die Schnittflächen des Lukenradius kerbfrei nachzuarbeiten sind. In der Ergänzung der Vorschrift 1989 sind bei Abrundung der Ecken sogar bis 20% höhere Kerbspannungen zugelassen. In der jetzt gültigen Fassung [15] ist die Arbeitsausführung nicht mehr in

einem allgemein erfaßten Abschnitt vorhanden. Allerdings findet die Nacharbeit der Schnittkanten ihre Berücksichtigung bei der Referenzspannung der Detailkategorie im Abschnitt 20, *Betriebsfestigkeit*.

Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der Versuchsparameter für alle 8 Bauteilmodelle.

3.2 Versuchsaufbau und -durchführung

An der Stirnseite der Querriegel sind Grundplatten mit Augstegplatten wie in Abb. 2 angedeutet angeschweißt. Über Gelenkköpfe mit Achsen sind sie mit den servohydraulischen Zylindern der Firma Schenck, Darmstadt verbunden.

Die Bauteilmodelle sind mit Dehnungsmeßstreifen versehen. Sie dienen im einzelnen

- als Ausrichthilfe für die Zylinderkräfte,
- zur Ermittlung der Nenn- bzw. Kerbdehnung,
- zur Überwachung während der Versuchsdurchführung.

Während des Versuches werden die Kerbdehnungen und die gefahrenen Zylinderkräfte nach vorgegebenen Lastspielen über eine Meßwerterfassungsanlage abgefragt.

Damit an den Kerbstellen die thermisch geschnittene Kante zur Aufnahme des Dehnungsmeßstreifens nicht weggeschliffen werden muß, sind die Schnittriefen durch einen Zweikomponentenkleber aufgefüllt. Durch Änderung der Dehnung und zusätzlicher visueller Kontrolle kann die Anrißlastspielzahl festgestellt werden.

Große Probleme bereitet die Reparatur der Risse. Wird der Riß entdeckt, muß die Stelle repariert werden, damit die verbleibenden Ecken weiter getestet werden können. Wie in der Praxis wird der Riß ausgefugt, neu verschweißt und anschließend die reparierte Stelle geschliffen. Weitere Verbesserungen wie Schweißung unter Vorlast oder Hämmern der Naht helfen nicht, die reparierte Stelle rißfrei zu bekommen. Es bleibt daher nur die aufwendige Reparatur durch Herausschneiden der ermüdeten Stellen und Einsetzen neuer Ecken.

Die Versuche sind bei einem Grenzspannungsverhältnis von $R = 0$ und an Luft durchgeführt worden. Die Frequenz bewegt sich zwischen 0.3 und 0.5 Hz. Insgesamt sind 6 Modelle im Einstufenschwingversuch und 2 Modelle im Betriebsfestigkeitsversuch mit einer Randomlastfolge getestet. Über den Prozeßrechner wird die standardisierte Zufallslastfolge mit geradliniger

Häufigkeitsverteilung *EC9* (s. Anhang B) erzeugt. Der Unregelmäßigkeitsfaktor beträgt $I = 0.99$; der Umfang der Lastfolge ca. $5.9 \cdot 10^5$ Schwingspiele. Ein typischer Ausschnitt der Lastfolge sowie die zugehörige Häufigkeitsverteilung kann der Abb. 3 entnommen werden.

3.3 Spannungsanalyse

Zur Ermittlung der Kerbspannung an der Lukenecke wird eine Spannungsanalyse mit Hilfe der Finite Elemente Methode sowie mit der Dehnungsmeßstreifentechnik durchgeführt. Abb. 4 zeigt die Randspannungsverteilung in der Lukenecke nach beiden Verfahren. Deutlich wird, daß keine ausgeprägte Spannungsspitze vorliegt. Das gleiche Bild zeigt sich auch vom Rand weg in Richtung der Quer- und Längswand des Modells. Anhand von Linien gleicher Hauptspannungen wird dies in Abb. 5 demonstriert.

Bedingt durch die Bautoleranzen sowie durch das Anschweißen der Krafteinleitungen für die Zylinderkräfte schwankt die Formzahl bei den 8 Bauteilmodellen zwischen $K_t = 12.5$ und 13.3 .

3.4 Einstufen-Dauerschwingversuche

Für die Darstellung der Versuchsergebnisse wird die Schädigungsparameter-Wöhlerlinie gewählt. Zur Anwendung kommt der Parameter nach Smith, Watson, Topper [16], der besonders gut den Mittelspannungseinfluß auf das Versagensverhalten berücksichtigt:

$$P_{SWT} = \sqrt{(\sigma_a + \sigma_m) \cdot \epsilon_a \cdot E} = \sqrt{\sigma_{max} \cdot \epsilon_a \cdot E}$$

Die örtliche Dehnung in der Lukenecke wird mit Hilfe von Dehnungsmessungen erfaßt. Die örtliche Spannung wird über die zyklische Spannungs-Dehnungskurve ermittelt. Sie ist anhand von Einstufenversuchen mit Kleinproben in dem vorausgegangenen Forschungsvorhaben [17] ermittelt worden. Bei dieser Untersuchung ergab sich, daß kein Unterschied im Schwingfestigkeitsverhalten thermisch geschnittener Blechkanten besteht.

Es werden folgende Werte der zyklischen $\sigma - \epsilon$ -Kurve für den thermischen Trennschnitt übernommen [17]:

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E} + \left(\frac{\sigma_a}{K'} \right)^{\frac{1}{n'}}$$

Werkstoff	GL-A24	GL-D36
K' [MPa]	981	1103
n'	0.1747	0.1604

In Abb. 6 sind die Ergebnisse aus den Einstufenversuchen mit den Bauteilmodellen aus normalfestem Schiffbaustahl und autogen geschnittener Lukenecke ohne Nacharbeit dargestellt.

Es ist nicht immer gelungen, an allen 8 Ecken eines Modells verwertbare Ergebnisse zu erhalten. Nach Versuchsabbruch stehen die nicht angerissenen Lukenecken für Eigenspannungsmessungen nach dem Bohrlochverfahren zur Verfügung. Zwei zusätzliche Ergebnisse sind aus den nachfolgenden Versuchen mit Bauteilmodellen aus höherfestem Schiffbaustahl erzielt worden, indem hier einige angerissene Lukenecken durch eingesetzte neue Lukenecken aus normalfestem Schiffbaustahl ersetzt worden sind.

Für eine Bewertung der Ergebnisse ist zusätzlich die Schädigungsparameterwöhlerlinie der Kleinproben in Abb. 6 eingezeichnet. Danach liegen die Ergebnisse aus den Bauteilversuchen im Zeitfestigkeitsbereich günstiger als die der Kleinproben. Im Lastspielbereich von $5 \cdot 10^4$ bis $5 \cdot 10^5$ deutet sich eine parallele Gerade zur Kleinprobe an. Durch das Abknicken der P_{SWT} -Linie scheint im höheren Lastspielbereich eine Annäherung der Werte zu erfolgen. Ein Vergleich mit den Einzelergebnissen der Kleinproben in Abb. 7 läßt diesen Schluß zu.

In Abb. 8 sind die Ergebnisse der Einstufenversuche für die Bauteilmodelle aus höherfestem Schiffbaustahl dargestellt. Die Lukenecken sind mit dem Unterwasser-Plasma-Schneidverfahren hergestellt.

Die Versuche überdecken einen Bereich von $2.8 \cdot 10^4$ bis $8.5 \cdot 10^5$ Lastwechsel. Die Streuung liegt in einem für Schwingfestigkeitsversuche üblichen Rahmen. Bei den Versuchen ist als zusätzlicher Parameter eine Nacharbeit der thermisch geschnittenen Kante enthalten. Im Gegensatz zu den Kleinproben zeichnet sich hier eine leichte Schwingfestigkeitsverbesserung ab. Während bei Lastwechseln kleiner $2 \cdot 10^5$ kein Unterschied zwischen der nachgearbeiteten und nicht nachgearbeiteten thermisch geschnittenen Kante feststellbar ist, deutet sich in den Versuchspunkten im unteren Bereich ein Einfluß an. Die eingezeichnete P_{SWT} -Linie der Kleinproben gibt das Schwingfestigkeitsverhalten der Bauteilmodelle hier recht gut wieder. Abb. 9 zeigt den Vergleich mit den Ergebnissen aller Kleinproben. Bei den Bauteilmodellen aus dem normalfesten Stahl ist ein deutlicher Unterschied vorhanden. Eine Erklärung hierfür könnte das unterschiedliche Eigenspannungsverhalten durch das thermische Schneiden und den Werkstoffen sein. Eigenspannungsmessungen mit dem Bohrlochverfahren (Rosettentyp TEA-06-062RK-120 der Firma Micro-Measurement) nach den Ermüdungsversuchen an Ecken ohne Riß zeigen ein unterschiedliches Verhalten (Abb. 10). Bei dem Bauteil aus normalfestem Schiffbaustahl überwiegen die Druckeigenspannungen. Sie sind in der Symmetrieebene höher. Dagegen zeigt das Modell aus höherfestem Schiffbaustahl überwiegend Zugeigenspannungen, die am Radiusbeginn am größten sind.

3.5 Betriebsfestigkeitsversuche

An zwei Modellen sind Betriebsfestigkeitsversuche durchgeführt worden. Bei Modell 7 handelt es sich um ein Experiment, bei dem die Mittelspannung mit $\sigma_m = 31 \text{ MPa}$ konstant ist. Die Spitzenbelastung des Geradlinienkollektives liegt bei $\sigma_{max} = 50.6 \text{ MPa}$, sodaß sich ein Grenzspannungsverhältnis für diese Spitzenbelastung von $R = 0.226$ ergibt. Nach $10.47 \cdot 10^6$ Lastspielen, d.h. 2.5 Monaten Laufzeit ist der Versuch abgebrochen worden, da es an den Lukenecken zu keinem Anriß gekommen ist. Anschließend ist ein neuer Versuch mit erhöhter Last gestartet worden:

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= 76.0 \text{ MPa} \\ \sigma_{min} &= 0.0 \text{ MPa} \\ \sigma_m &= 38.0 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Bereits nach der ersten Spitzenbelastung der Random-Lastfolge haben die ersten Anrisse vorgelegen. Die Spitzenlast wird bereits nach ca. 25.4 % eines Kollektivdurchlaufes aufgebracht. Nach $6 \cdot 10^5$ Lastspielen ist dieser Versuch beendet worden.

In Abb.11 sind die Versuchsergebnisse den rechnerischen Vorsagen gegenübergestellt. Für die dargestellten drei Kollektive sind Rechnungen nach der einfachen linearen Schadensakkumulationshypothese sowie nach dem Kerbgrundkonzept durchgeführt worden. Dem Kerbgrundkonzept liegt die Annahme zugrunde, daß das Werkstoffverhalten der ungekerbten Kleinprobe auf das Werkstoffvolumen im Kerbgrund des Bauteils übertragbar ist. In Anlehnung an die Arbeit von Bergmann [13] ist der örtliche Spannungs- Dehnungspfad im Rechner durch Verwendung der gleichen Randomlastfolge simuliert. Zur Berechnung der Kerbgrundbeanspruchung dient die Neuberbeziehung. Das zyklische Verhalten des Werkstoffes wird durch die Daten für die thermisch geschnittene Kante des GL-D36 aus dem vorausgegangenen Vorhaben [17] beschrieben.

Ein Vergleich mit den Versuchsdaten zeigt, daß das Bauteilmodell nach Beendigung des ersten Versuches bereits vorgeschädigt gewesen sein muß. Dies ist auch die Erklärung für die große Streuung beim zweiten Versuch. Ohne Vorschädigung wären vermutlich zwei Kollektivdurchgänge zu erwarten, was aus dem Experiment mit Modell 8 in Abb. 12 abgeleitet werden kann.

Für Modell 8 gelten folgende Versuchsbedingungen:

$$\begin{aligned}\sigma_{max} &= 77.1 \text{ MPa} \\ \sigma_{min} &= 0.0 \text{ MPa} \\ \sigma_m &= 38.5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Die Untersuchung bringt für die Rechnung nach dem Kerbgrundkonzept eine auf der unsicheren Seite liegende Vorhersage. Bezogen auf die mittlere Anrißlastspielzahl im Versuch bedeutet dies

$$\frac{N_{\text{Rechnung}}}{N_{\text{Versuch}}} = 2.1$$

Die zulässigen Spannungen nach der inzwischen vorliegenden neuen Fassung des Betriebsfestigkeitsnachweises des Germanischen Lloyds' (1992) sind ebenfalls eingezeichnet. Der flachere Verlauf der Lebensdauerlinie beruht auf der vorgegebenen flacheren Neigung der Wöhlerlinien in der Vorschrift. Der Vergleich zeigt, daß mit den in der Vorschrift gewählten Voraussetzungen die zulässigen Spannungen auf der sicheren Seite liegen.

4 Schlußfolgerung

Die Untersuchungen ergeben, daß die Anwendung des Kerbgrundkonzeptes für Kerben im Bereich des Grundwerkstoffes am Beispiel der Lukenecke erfolgreich ist. Vor allem ist die in den Vorschriften des Germanischen Lloyd vorgegebene zulässige Spannung bei den hier gewählten Parametern experimentell abgesichert. Weiterhin zeigt sich, daß für die praktische Anwendung des Kerbgrundkonzeptes eine aufwendige Simulation des $\sigma - \epsilon$ -Pfades im Rechner nicht nötig ist. Wird die örtliche Kerbgrundbeanspruchung mit Hilfe der Neuberbeziehung ermittelt und eine Bewertung der Schädigung durch den Schadensparameter P_{SWT} verbunden mit der linearen Schadensakkumulation vorgenommen, so liegen die Ergebnisse auf der sicheren Seite.

5 Schrifttum

- [1] Y. Chen et al.. Validation of Fatigue Life Prediction using Containership Hatch-Corner Strain Measurements. SNAME Transactions, vol. 94, p. 255 - 282, 1986.
- [2] Germanischer Lloyd, Hamburg. Vorschriften für Klassifikation und Bau von stählernen Seeschiffen, Ausgabe 1986.
- [3] Krane - Grundsätze für Stahltragwerke. DIN 15018, April 1974.
- [4] Design Recommendations for Cyclic Loaded Welded Steel Structures. Welding in the World, vol. 20, p. 153, 1982.
- [5] G. Bierett. Einige wichtige Gesetze der Betriebsfestigkeit geschweißter Bauteile aus Stahl. Schweißen und Schneiden, Bd. 11, S. 429, 1972.

- [6] W.H. Munse. Fatigue Characterization of Fabricated Ship Details for Design. Report No. SSC 318, Ship Structure Committee, 1983.
- [7] J.W. Fisher et al.. Fatigue Strength of Steel Beams with Transverse Stiffeners and Attachments. Technical Report No. 147, Highway Research Board, 1974.
- [8] K. Iida und M. Matoba. Evaluation of Fatigue Strength of Hold Frame Ends in Ship Hulls. Document XIII - 950 - 80, International Institute of Welding, 1980.
- [9] M. Mori et al.. Application of Program Fatigue Test to Member Joints of Hulls. Mitsubishi Technical Bulletin No. 78 , 1972.
- [10] Proceedings of the Ninth International Ship Structures Congress. Genova, 1985.
- [11] H. Paetzold. Beurteilung der Betriebsfestigkeit auf der Grundlage des örtlichen Konzepts, Bd. 79, S. 282 - 293. Schiffbautechnische Gesellschaft, 1985.
- [12] D. Hanschmann. Ein Beitrag zur rechnergestützten Anrißlebensdauervorhersage schwingbeanspruchter Kraftfahrzeugbauteile aus Aluminium-Werkstoffen. Bericht FB 81-10, 1981.
- [13] J.W. Bergmann. Zur Betriebsfestigkeitsmessung gekerbter Bauteile auf der Grundlage der örtlichen Beanspruchungen. Bericht Nr. 37, Institut für Statik und Stahlbau der TH Darmstadt, 1983.
- [14] H. Lenk, H. Vidal, M. Lücke. Containerschiff „Stuttgart Express“. Hansa, Bd. 22, S. 2000 - 2006, 1977.
- [15] Germanischer Lloyd, Hamburg. Klassifikations- und Bauvorschriften, I - Schiffstechnik, Teil 1 - Seeschiffe, Kapitel 1 - Schiffskörper, Ausgabe 1992.
- [16] K.N. Smith, P. Watson, T.H. Topper. A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals. Journal of Materials, vol. 5, No 4, pp. 767 - 778, 1970.
- [17] H. Paetzold. Erstellen von Schädigungsparameter-Wöhlerlinien für normal- und höherfesten Schiffbaustahl. Bericht Nr. 507, Institut für Schiffbau, 1990.

A Tabellen

Tabelle 1

Modell-Nr.	Hersteller	Stahlsorte	thermisches Schnittverfahren	Nacharbeit	Schwingfestigkeitsprüfung
1	Seebeck	NF	autogen	keine	Einstufen
2	HDW	HF	Plasma	keine	Einstufen
3	Seebeck	NF	autogen	keine	Einstufen
4	HDW	HF	Plasma	keine	Einstufen
5	HDW	HF	Plasma	werftüblich geschliffen	Einstufen
6	TNSW	HF	Plasma	poliert	Einstufen
7	TNSW	HF	Plasma	keine	Random
8	TNSW	HF	Plasma	keine	Random

Erläuterung:

Hersteller: Seebeck = Schichau-Seebeck, Bremerhaven
 HDW = Howaldtswerke - Deutsche Werft AG, Kiel
 TNSW = Thyssen Nordseewerke, Emden

Stahlsorte: NF = normalfester Schiffbaustahl
 HF = höherfester Schiffbaustahl

thermisches Plasma = Unterwasser Plasma mit
 Schnittverfahren: Trägergas Sauerstoff

B Parameter zur Generierung der Last-Zeit-Funktion

Halbschwingspiele pro Block: 1181240

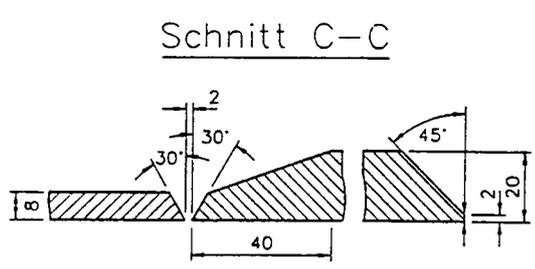
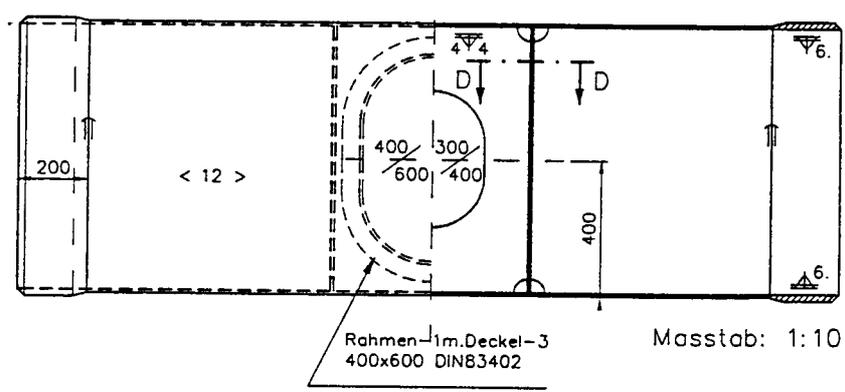
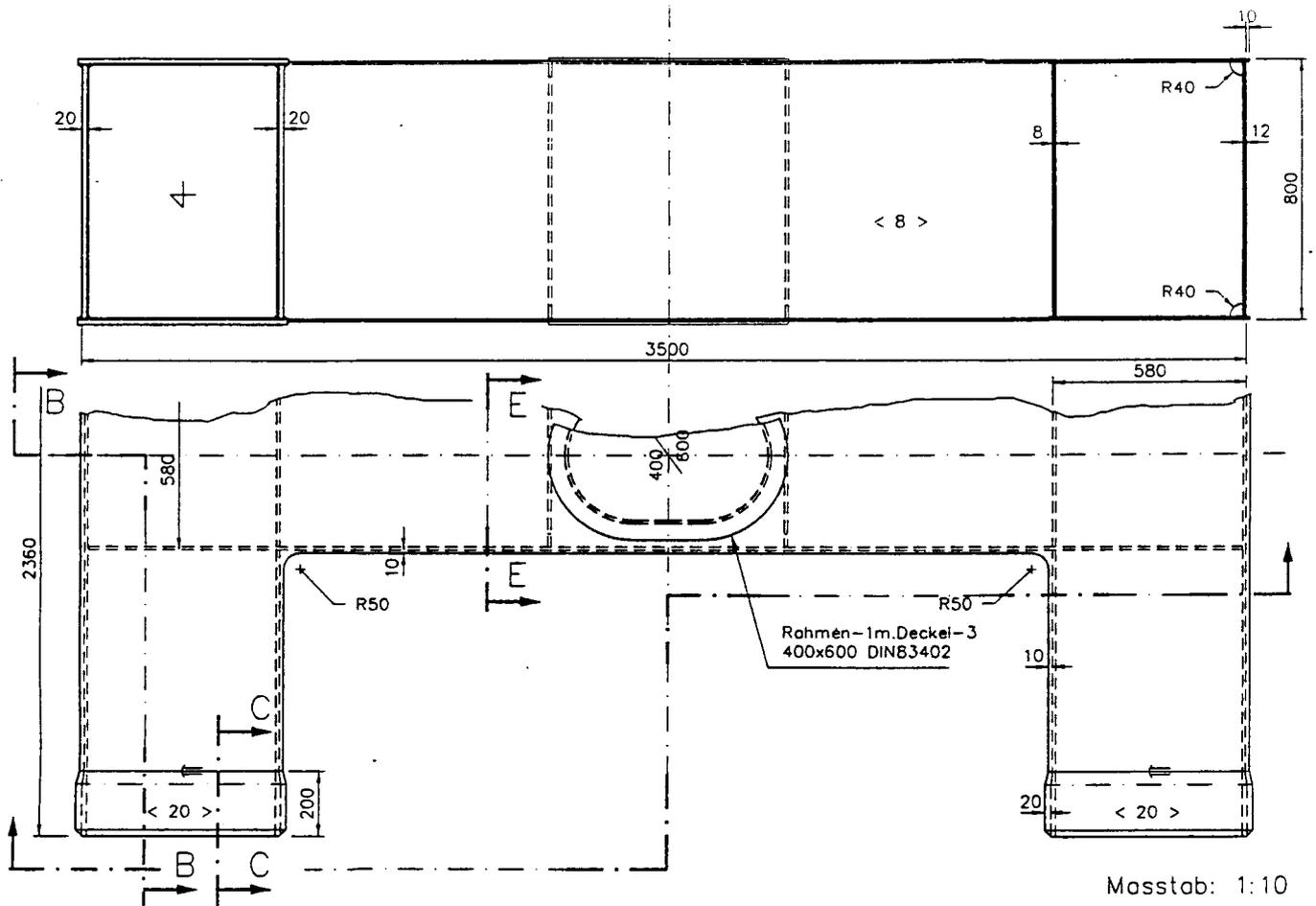
Teilzeilen über der Hauptdiagonale:

Zeile	r	A	B	D	R ₀
1	2	5	3	2	2
2	2	5	3	2	2
3	3	5	3	3	3
4	4	5	3	2	2
5	5	13	7	0	0
6	7	61	31	48	48
7	8	125	63	63	63
8	9	253	127	39	39
9	11	1021	511	898	901
10	12	2045	1023	1329	1329
11	13	4093	2047	1220	1220
12	15	16381	8191	15292	15293
13	16	32765	16383	25084	25108
14	17	65533	32767	29462	30543
15	18	131069	65535	24653	99179
16	18	131069	65535	80726	186992
17	9	253	127	31	31
18	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0
21	0	0	0	0	0
22	2	5	3	3	3
23	2	5	3	3	3
24	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0

Teilzeilen unter der Hauptdiagonale:

Zeile	r	A	B	D	R ₀
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0
10	2	5	3	3	3
11	2	5	3	3	3
12	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0
16	9	253	127	31	497
17	18	131069	65535	80726	262143
18	18	131069	65535	24653	25119
19	17	65533	32767	29462	131071
20	16	32765	16383	25084	65535
21	15	16381	8191	15292	32756
22	13	4093	2047	1220	8068
23	12	2045	1023	1329	3631
24	11	1021	511	898	1439
25	9	253	127	39	101
26	8	125	63	63	67
27	7	61	31	48	48
28	5	13	7	0	27
29	4	5	3	2	10
30	3	5	3	3	4
31	2	5	3	2	2
32	2	5	3	2	2

Anzahl der Matrixwerte = 590620*2
 Unregelmäßigkeitsfaktor = 0.99836



Nicht vermasste Kehlnahte $a=4\text{mm}$

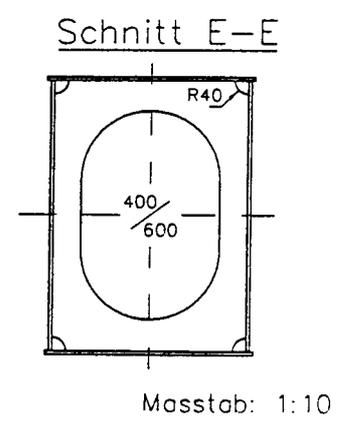
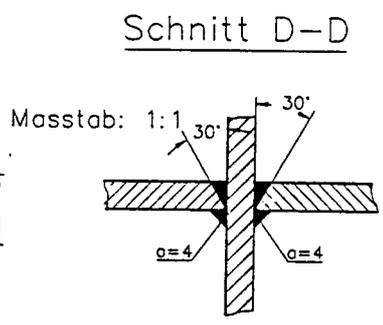


Abbildung 1: Konstruktionszeichnung des Bauteilmodells *Lukenecke*

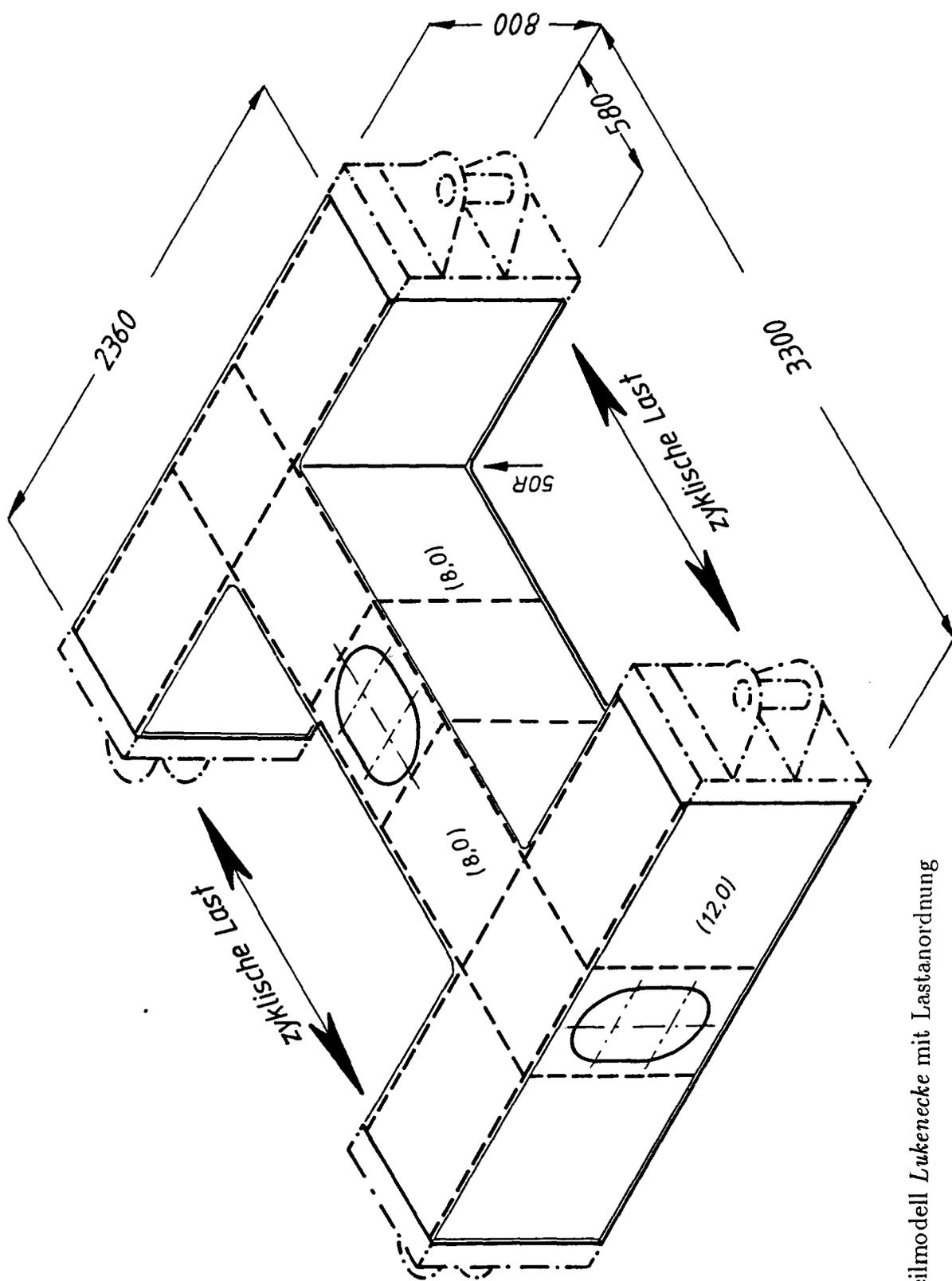


Abbildung 2: Bauteilmodell Lukenhecke mit Lastanordnung

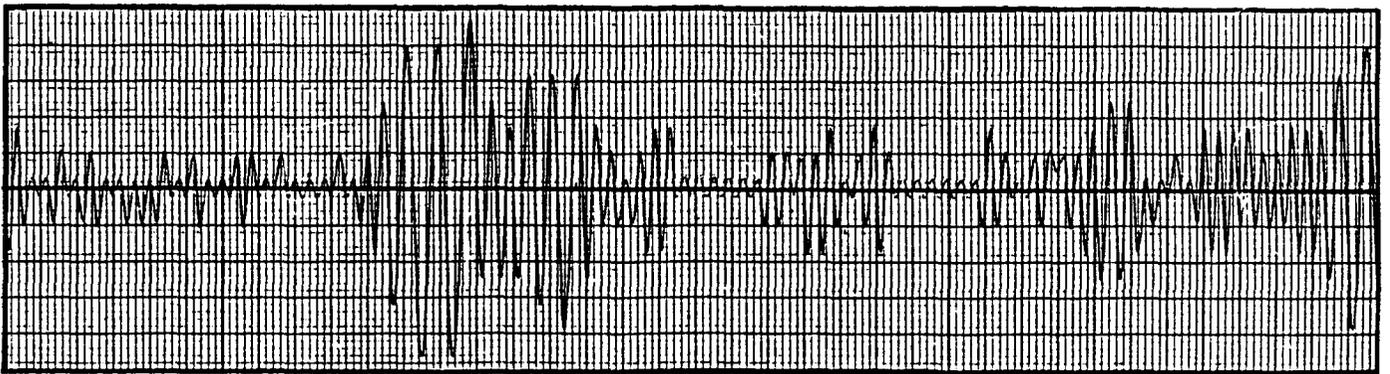
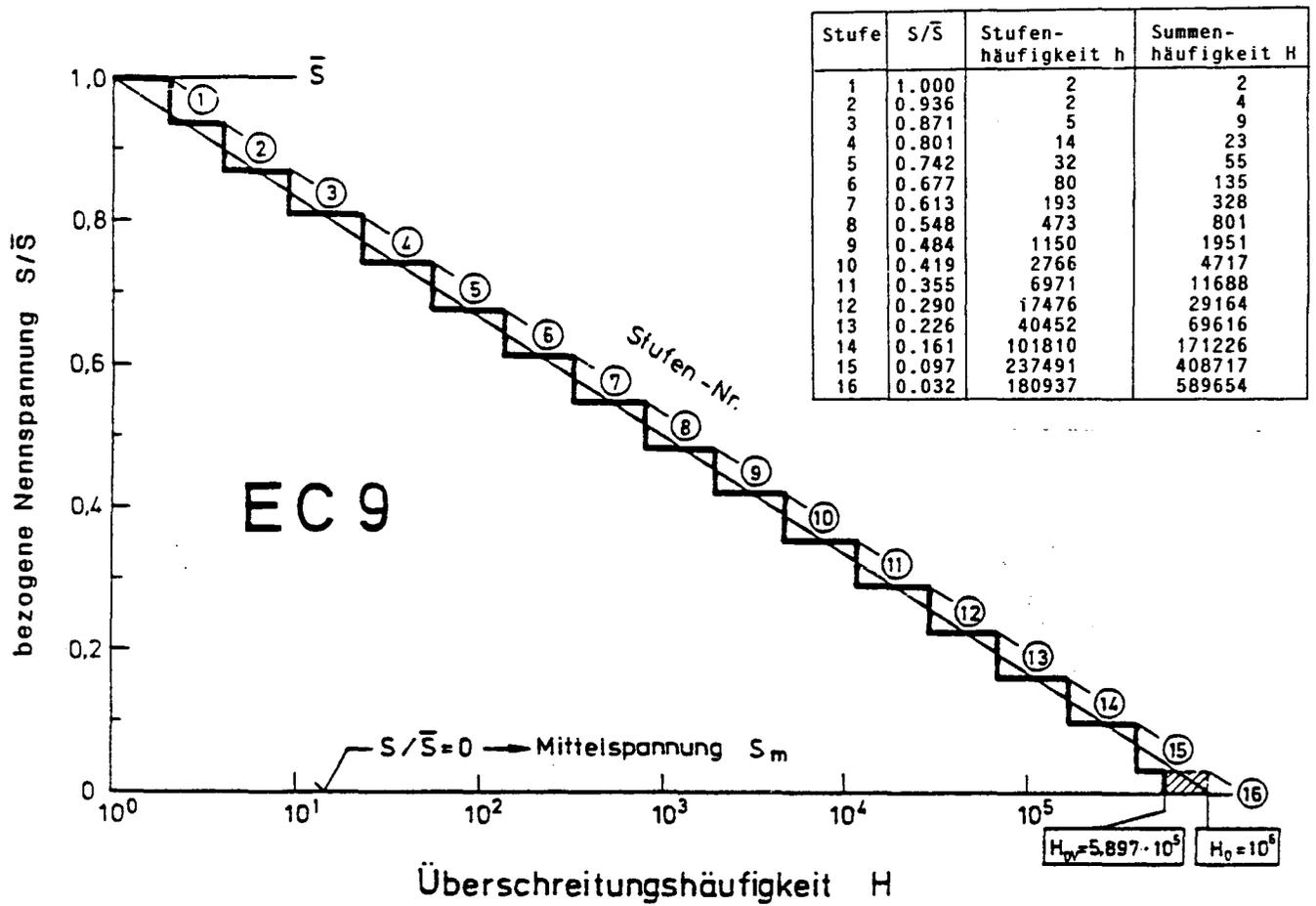


Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung für die nach dem Matrixverfahren erzeugten Last-Zeit-Funktion mit einem Ausschnitt

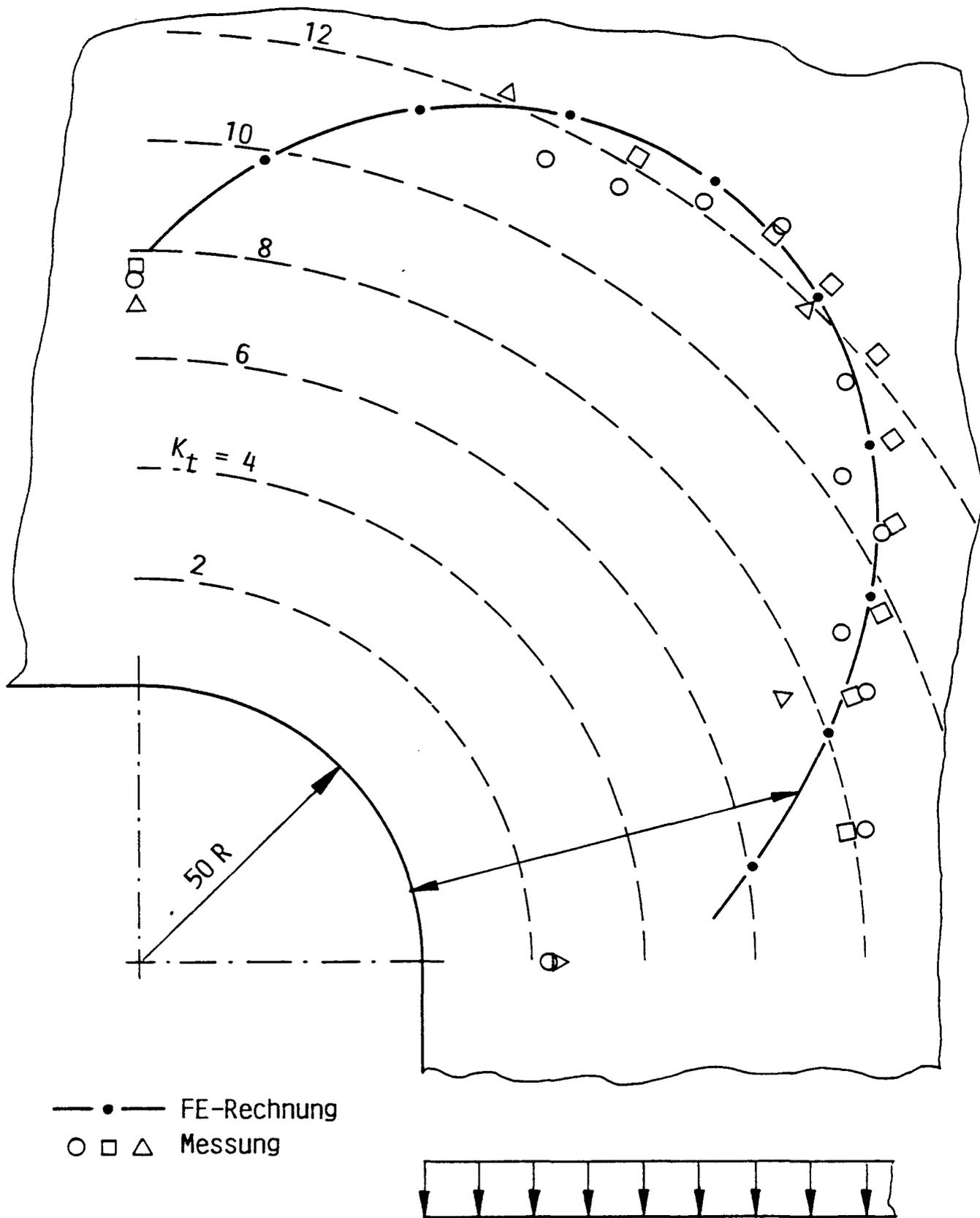


Abbildung 4: Randspannungsverlauf in der Lukenecke des Bauteilmodells

ADINA ORIGINAL XVMIN -523.3
 XVMAX -459.6
 YVMIN -200.0
 YVMAX -142.8

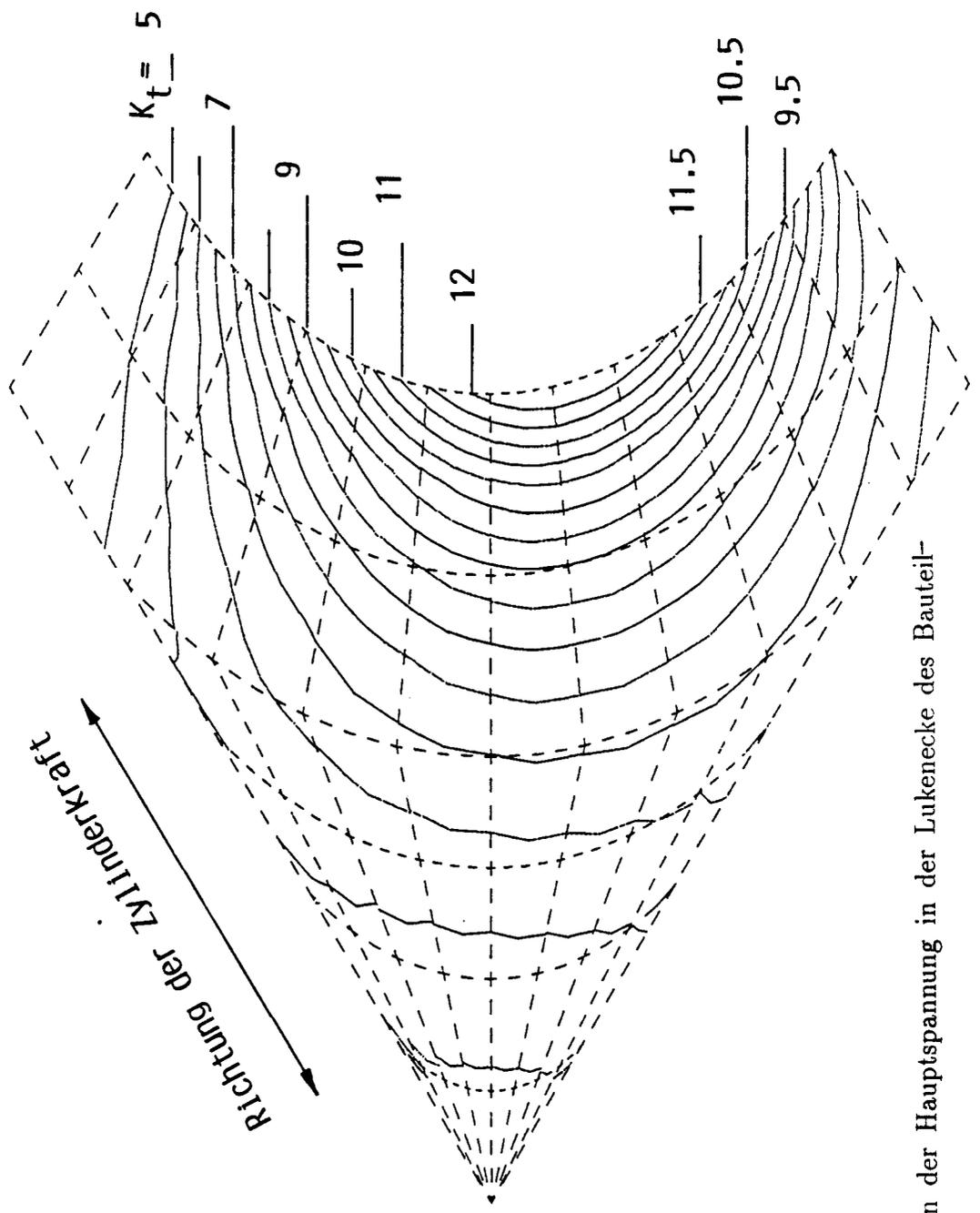
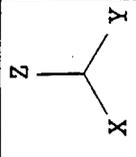


Abbildung 5: Isolinien der Hauptspannung in der Lukenecke des Bauteilmodells

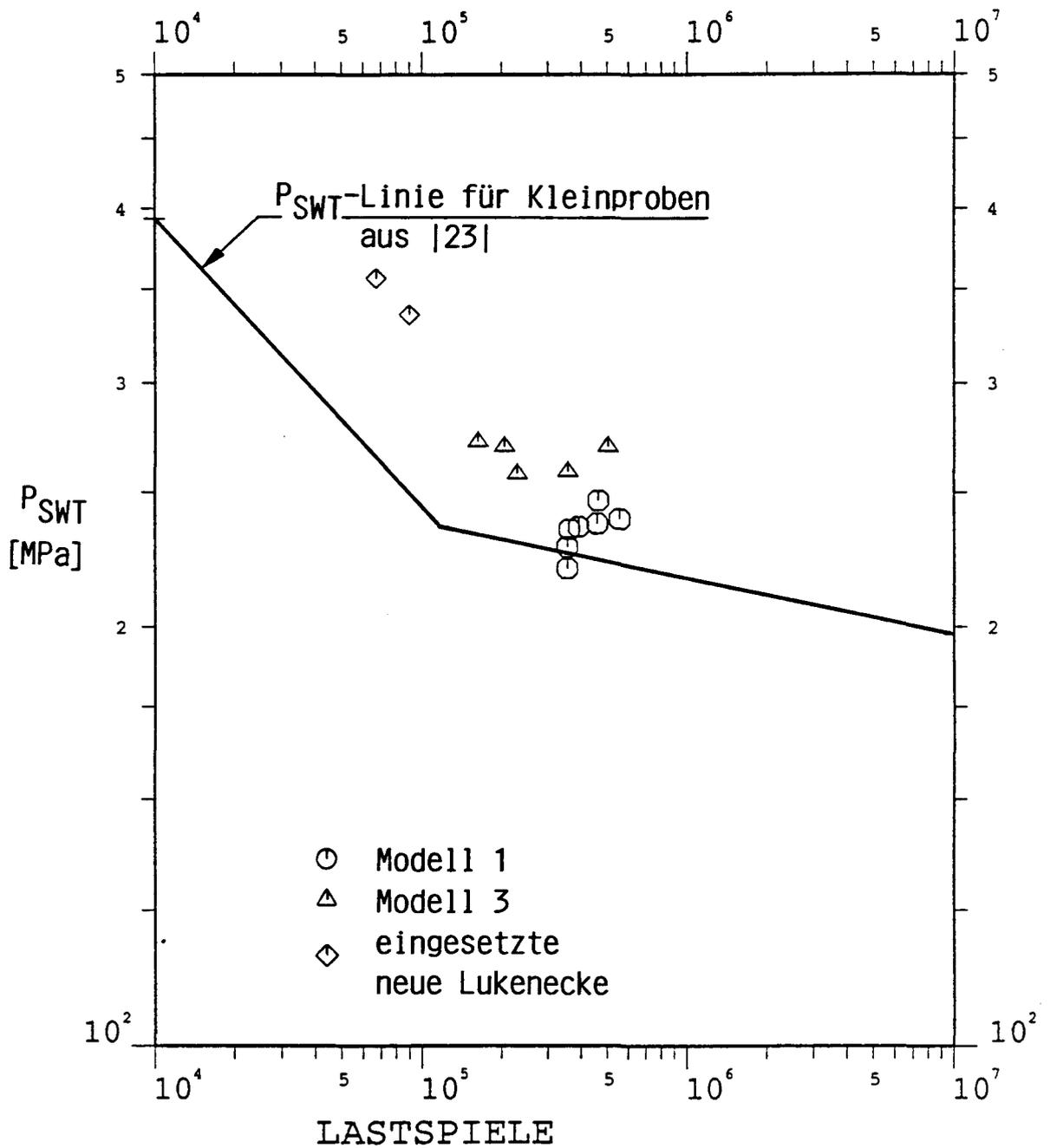


Abbildung 6: Einstufen-Dauerschwingversuche mit dem Bauteilmodell Lukenecke aus normalfestem Schiffbaustahl GL-A24

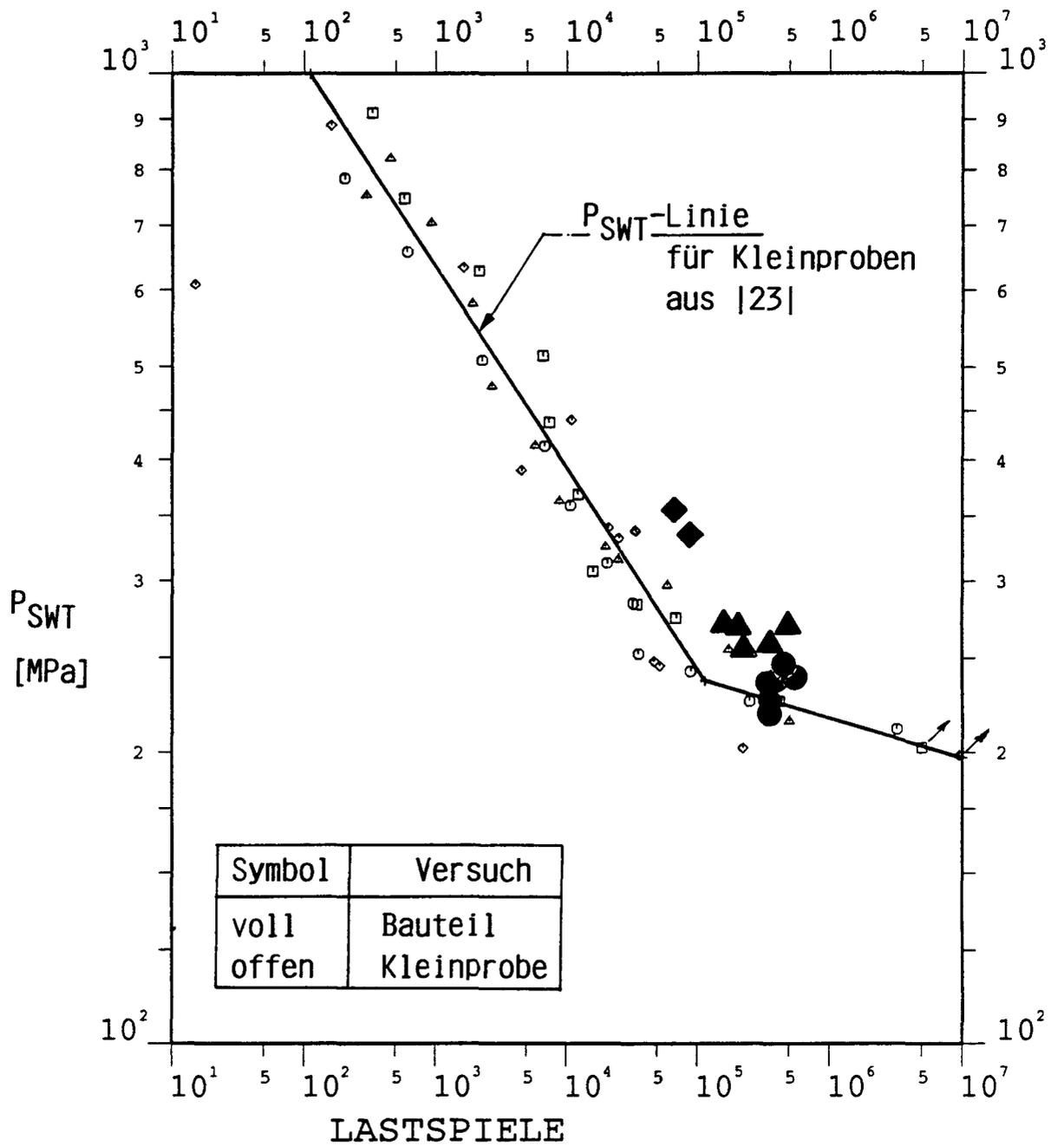


Abbildung 7: Vergleich der Schwingfestigkeit für das Bauteilmodell Luken-
ecke und Kleinprobe aus normalfestem Schiffbaustahl GL-A24

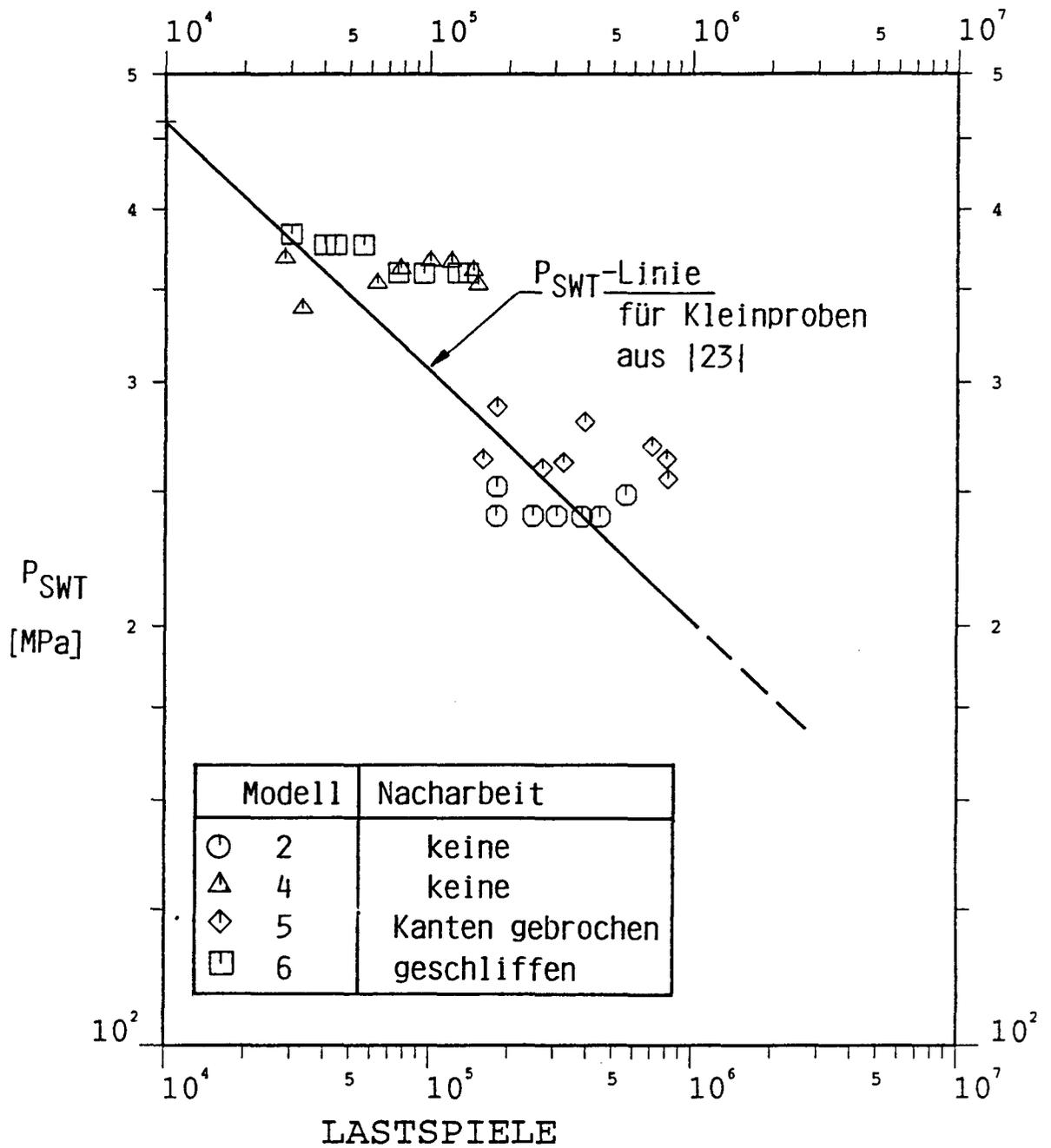


Abbildung 8: Einstufen-Dauerschwingversuche mit dem Bauteilmodell Lukenecke und Kleinprobe aus höherfestem Schiffbaustahl GL-D36

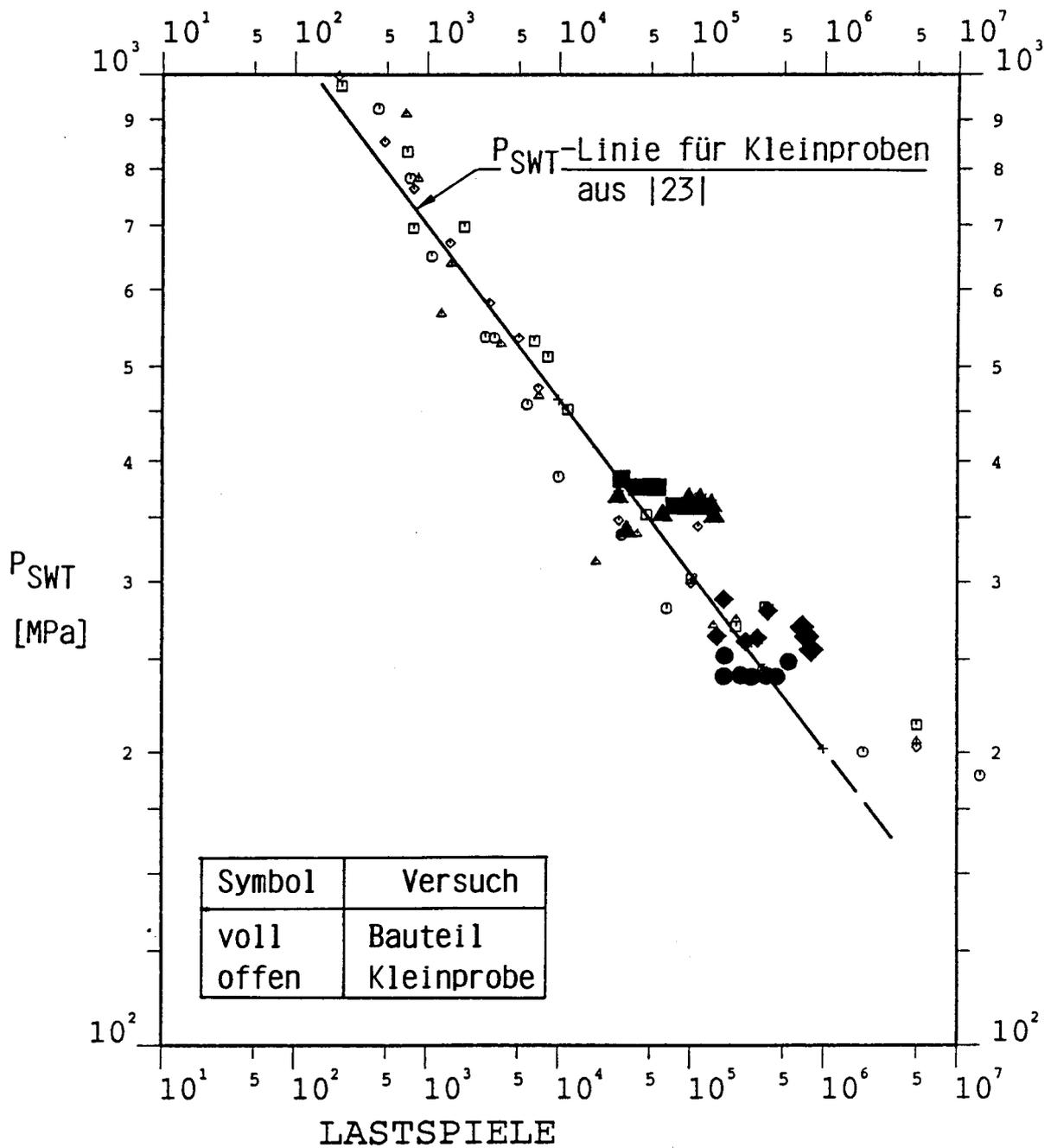
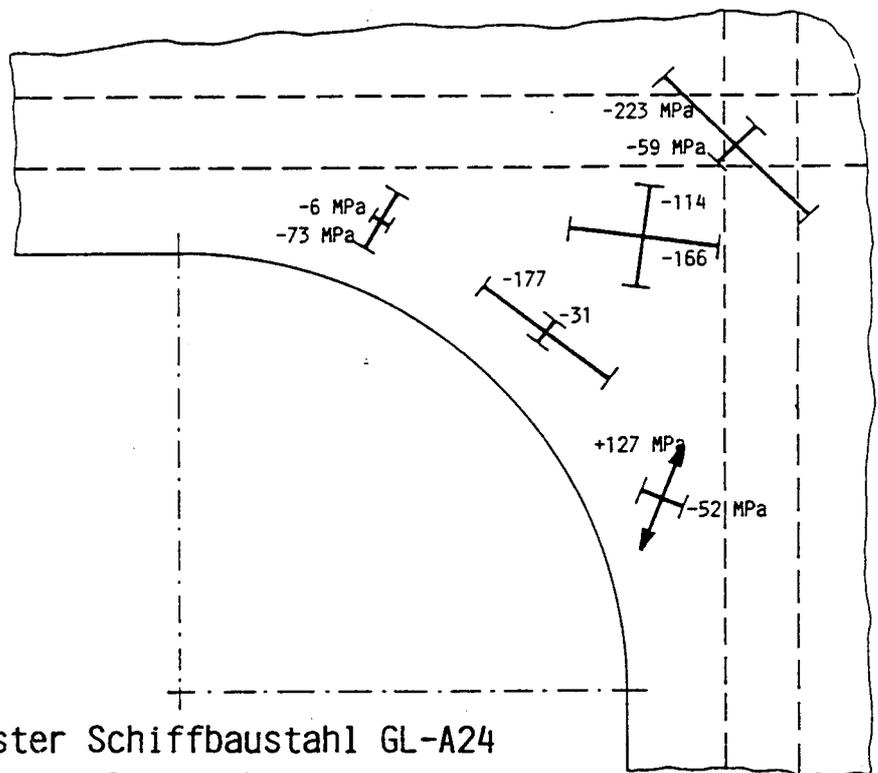
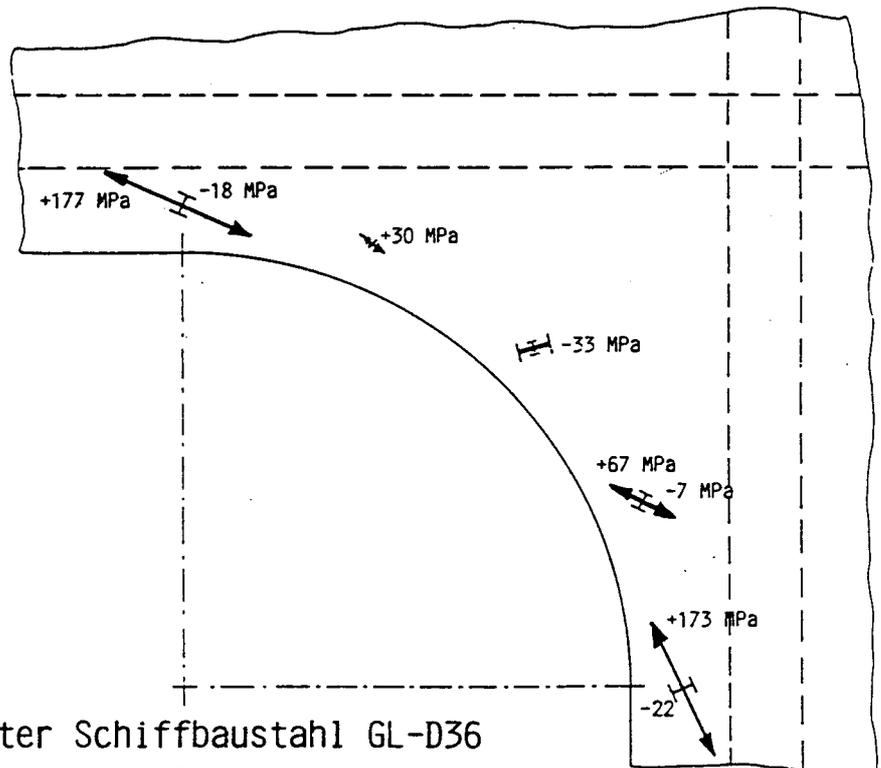


Abbildung 9: Vergleich der Schwingfestigkeit für das Bauteilmodell Luken-ecke und Kleinprobe aus höherfestem Schiffbaustahl GL-D36



normalfester Schiffbaustahl GL-A24
mit autogenem Brennschnitt



höherfester Schiffbaustahl GL-D36
mit unterwasser-plasmageschnittener Kante

Abbildung 10: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen nach dem Bohrlochverfahren an der Lukenecke

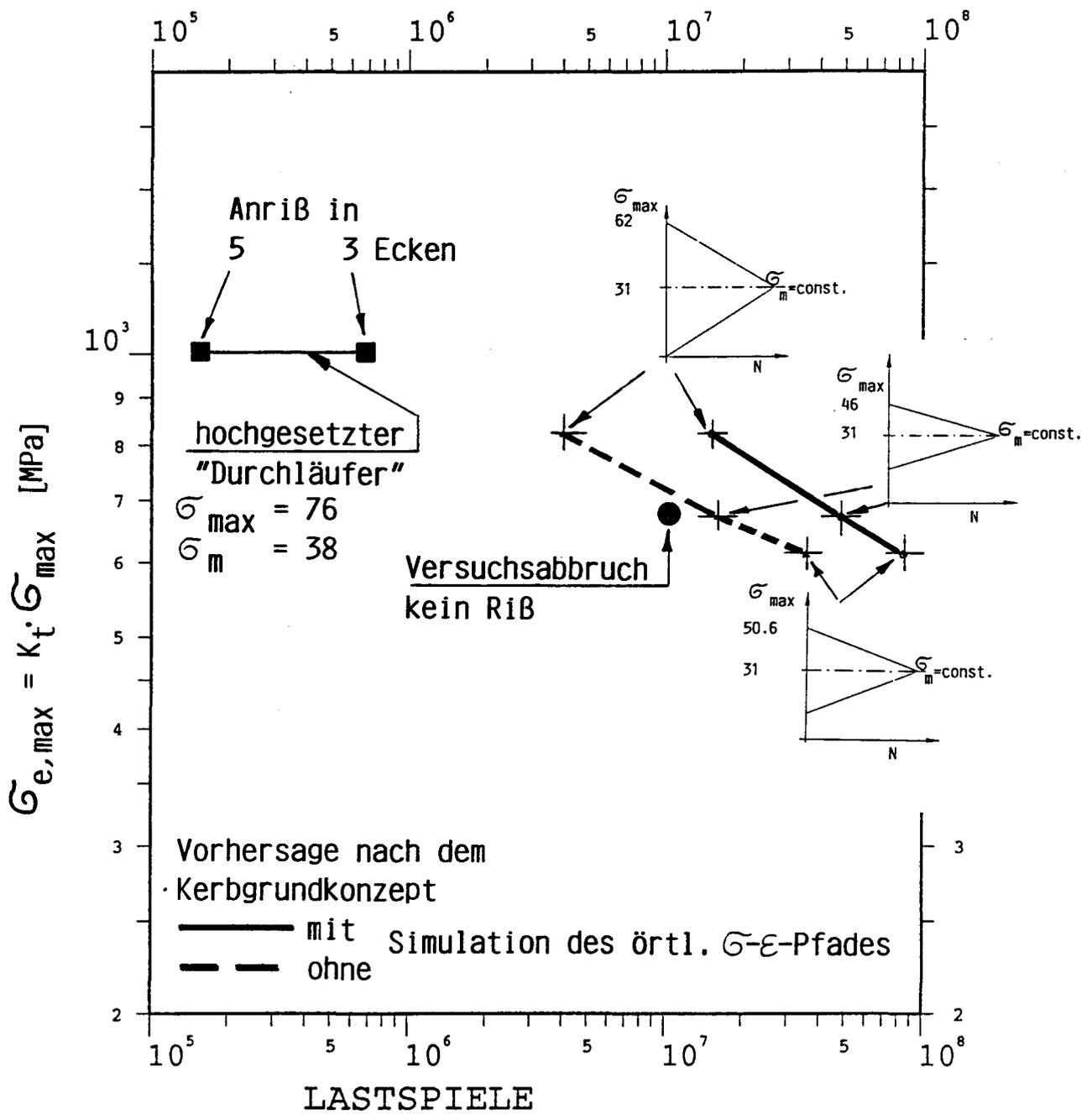


Abbildung 11: Betriebsfestigkeitsversuche mit dem Bauteilmodell 7 aus GL-A24, Vergleich Rechnung - Versuch

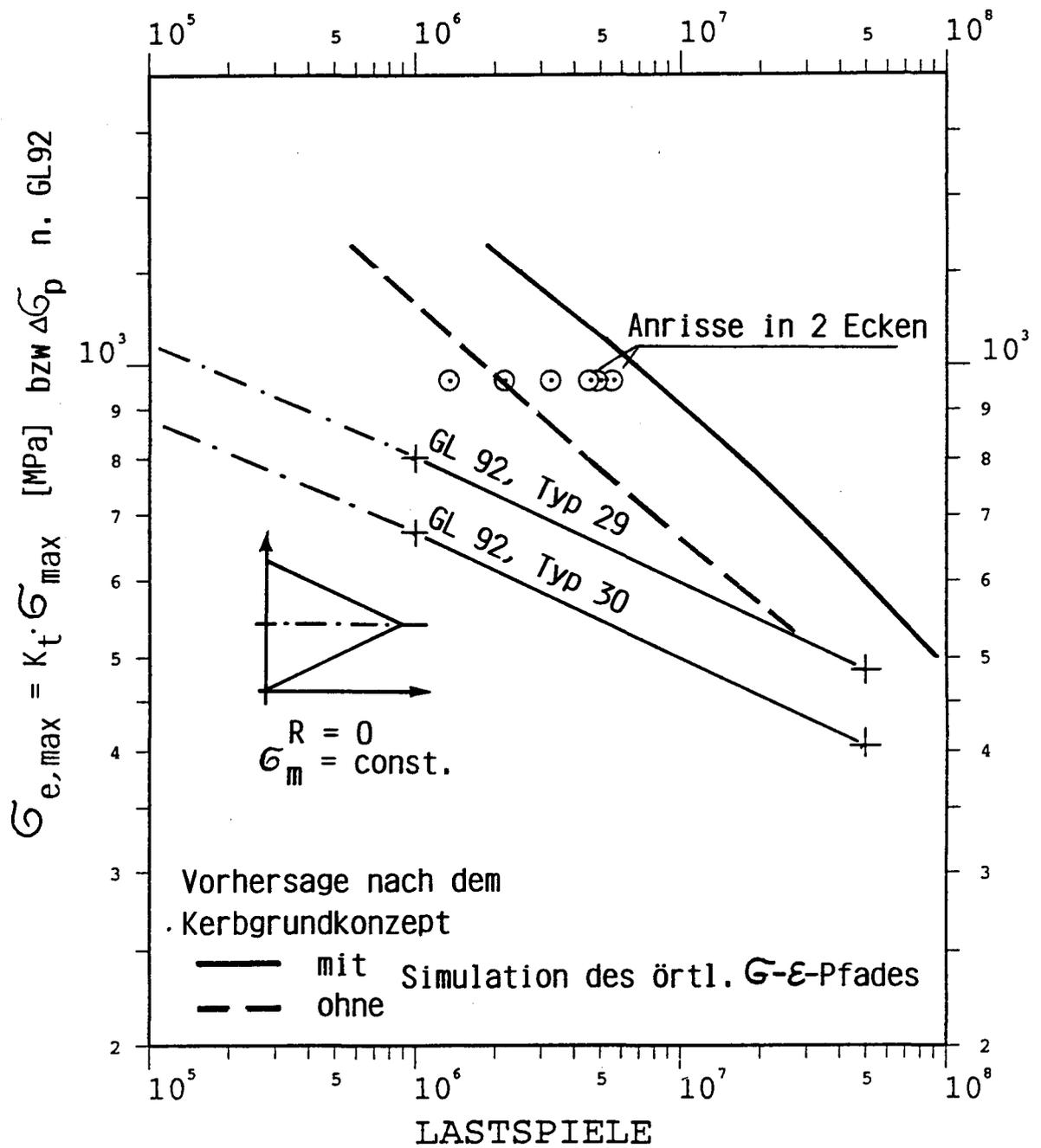


Abbildung 12: Betriebsfestigkeitsversuche mit dem Bauteilmodell 8 aus GL-D36; Vergleich Rechnung - Versuch