

Zur Qualitätssicherung mechanischer Eigenschaften von Baustahl

T 1987

T 1987

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

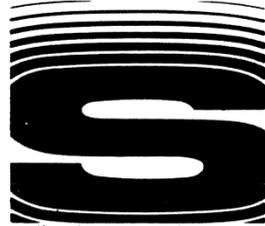
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BRAUNSCHWEIG
INSTITUT FÜR STAHLBAU

Abteilung Stahlbau: Prof. Dr.-Ing. J. Scheer



Bericht Nr. 6087/1

**Zur Qualitätssicherung mechanischer
Eigenschaften von Baustahl**

1987

Dieser Bericht entstand am Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig im Rahmen des Forschungsvorhabens "Sammlung von Daten über das Festigkeitsverhalten von Baustählen für den Stahlhochbau". Das Vorhaben wurde vom Institut für Bau-technik, Berlin, durch eine Sachmittelbeihilfe gefördert.

Die Autoren möchten sich auch an dieser Stelle für die Förderung bedanken.

Der Leiter der
Abteilung Stahlbau:

Prof. Dr.-Ing. J. Scheer

Der Projektleiter:

Dr.-Ing. W. Maier

Der Sachbearbeiter:

Dr. Ing. M. Rohde

Die Berichte können bezogen werden vom
Institut für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig,
Beethovenstr. 51, 3300 Braunschweig.

S U M M A R Y

On the determination of the mechanical behaviour of steels for general structural purposes

In future standards steel constructions will be calculated more realistically. In some cases the safety might be reduced. This can be accounted for, if the quality of the steels is sufficiently secured and its mechanical behaviour is described correctly.

In this thesis the quality of the steels, which is used in the Federal Republic of Germany, is proved on a statistic basis.

This thesis is essentially divided into five parts:

1 The interpretation of certificates on material tests

About 3500 of these certificates are interpreted with the aim, to determine statistical statements.

2 An external examination

About 400 specimens are representatively taken from the steel processing industries in order to examine them statistically.

3 The development of a new test standard

A new test standard is developed to determine the mechanical properties. It also includes, because of the further development of the evidence methods, data which is not normed till today.

4 The blind-examination

The quality of the tests of testing laboratories is tested to examine the reliability of the data declared in the certificates. In case of positive results the new test standard could be tested in the same time.

5 The suggestion of a model for standardized stress-strain-curves

A model for the calculation of the distribution of the stress for any strain is developed. With this the calculations are based on the statistical interpretation of the results of the foreign tests of the steel.

RESUME

"Description du comportement mécanique de l'acier de construction"

Selon les normes futures, les constructions métalliques seront soumises à une vérification plus réaliste. Dans certains cas, il sera possible de réduire les distances de sécurité. Cette réduction ne sera justifiée que si la qualité des aciers est suffisamment assurée et que si leur comportement mécanique est décrit avec justesse.

Au sein du projet de recherche présent, il s'agit de tester, sur une base statistique, la qualité des aciers qui sont utilisés, en ce moment, dans les entreprises de construction métallique de l'Allemagne Fédérale.

Le rapport se compose en gros de 5 parties :

1. d'une évaluation de certificats

Environ 3500 certificats d'essais des matériaux ont été évalués dans le but d'en tirer des conclusions en matière de statistique sur la répartition des valeurs caractéristiques des matériaux.

2. d'un essai de matériaux étrangers

Environ 400 échantillons sont prélevés dans des entreprises de construction métallique, puis testés pour déterminer les valeurs caractéristiques du matériau et finalement évalués sous l'angle statistique.

3. du développement d'une méthode d'essai

Une méthode d'essai est développée pour déterminer les valeurs caractéristiques du matériau. Du fait du développement continu des modes de vérification, elle comprend aussi des valeurs qui ne sont toujours pas normées.

4. d'un essai clandestin

La qualité des essais exécutés par les laboratoires d'essai des matériaux est testée pour étudier la fiabilité des valeurs caractéristiques indiquées sur les certificats. En cas de résultat positif, la méthode d'essai développée a pu être, par là-même, contrôlée.

5. de la proposition d'un modèle de courbes de travail normées

Un modèle de calcul de la fonction de répartition des contraintes pour des dilatations quelconques a été développé.

Pour cela, l'exploitation statistique des résultats de l'essai de matériaux étrangers est utilisée comme base du calcul.

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
INHALTSVERZEICHNIS	I
LITERATURVERZEICHNIS	VI
BEZEICHNUNGEN	XII
1 <u>EINLEITUNG</u>	1
2 <u>AUSWERTUNG VON BESCHEINIGUNGEN ÜBER MATERIALPRÜFUNGEN</u>	4
2.1 ALLGEMEINES	4
2.2 QUALITÄTSSICHERUNG	4
2.3 GRUNDGESAMTHEIT	5
2.3.1 Definition der Grundgesamtheit	5
2.3.2 Unterteilung der Grundgesamtheit	6
2.4 AUFGENOMMENE BESCHEINIGUNGEN	9
2.4.1 Auswahl der Bescheinigungen	9
2.4.2 Bestandsaufnahme	9
2.5 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN	11
2.5.1 Verteilungsfunktionen	11
2.5.2 Anpassungstest	14
2.5.3 Fraktilwerte	16
2.5.4 Bestimmung der Verteilungsparameter mit der Maximum-Likelihood-Methode	16
2.5.5 Korrelation	17
2.5.6 Regression	18
2.6 VERTEILUNGEN	19
2.6.1 Grenzwerte für die chemische Zusammensetzung und die Festigkeitskennwerte der Stähle	19
2.6.2 Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte von der Erzeugnisform	20

2.6.3	Unterteilung der Bescheinigungen	22
2.6.4	Auswertung der Festigkeitskennwerte	26
2.6.4.1	Allgemeines	26
2.6.4.2	Zu den Tabellen	29
2.6.4.3	Obere Streckgrenze R_{eH}	31
2.6.4.4	Zugfestigkeit R_m	35
2.6.4.5	Bruchdehnung A_5	37
2.6.4.6	Kerbschlagarbeit A_k	37
2.6.5	Auswertung der Ergebnisse der chemischen Analyse	40
2.7	KORRELATION	44
2.8	REGRESSIONSRECHNUNG	46
2.8.1	Einflüsse auf die Festigkeitskennwerte	46
2.8.2	Berechnung der Regressionskoeffizienten	48
3	<u>STICHPROBENENTNAHME FÜR EINE FREMDPRÜFUNG</u>	52
3.1	ALLGEMEINES	52
3.2	AUSWAHL DER STAHLBAUBETRIEBE	52
3.2.1	Zur statistischen Stichprobe	52
3.2.2	Systematische Einflüsse bei der Stichprobenentnahme	53
3.2.3	Schichtung	55
3.3	STICHPROBENANWEISUNG	55
3.4	ZUR QUALITÄTSSICHERUNG	57
3.4.1	Geforderte Qualitätssicherung	57
3.4.2	Zur Qualitätssicherung in den Betrieben	59
4	<u>PRÜFKÖRPERENTNAHME UND PRÜFMODUS FÜR ZUGVERSUCHE</u>	62
4.1	PRÜFKÖRPER	62
4.1.1	Allgemeines	62
4.1.2	Geometrie	62
4.1.3	Zugproben	62
4.1.4	Kerbschlagproben	64
4.2	PRÜFMODUS FÜR ZUGVERSUCHE	64

5	<u>BLINDPRÜFUNG</u>	67
5.1	ALLGEMEINES	67
5.2	BLINDPRÜFUNG UND VERGLEICH ZUM PRUFMODUS	68
5.3	MEHRFACHE PRÜFUNG VON PROBEN AUS EINER SCHMELZE	77
5.3.1	Allgemeines	77
5.3.2	Vergleich der Ergebnisse	78
5.4	VERGLEICH BLINDPRÜFUNG - MEHRFACHPRÜFUNG	81
6	<u>AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DER FREMDPRÜFUNG</u>	84
6.1	ALLGEMEINES	84
6.2	BESTANDSAUFNAHME	84
6.3	VERWECHSELUNGEN UND AUSREISSER	85
6.4	ELASTISCHER BEREICH	87
6.5	FLIEßBEREICH	91
6.5.1	Definition der Streckgrenze	91
6.5.2	Auswertung der Ergebnisse für die Streckgrenze	92
6.5.3	Abhängigkeit der Streckgrenze von der Dehngeschwindigkeit	103
6.5.3.1	Allgemeines	103
6.5.3.2	Ist die Größe des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ von der Stahlsorte abhängig?	105
6.5.3.3	Kann die statische Streckgrenze mit einfach zu ermittelnden Kenngrößen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden ?	106
6.5.3.4	Kann eine Beziehung zwischen unterer Streckgrenze und der Dehngeschwindigkeit angegeben werden, die es erlaubt, die statische Streckgrenze mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen ?	108
6.6	ÜBERGANG VOM FLIESSBEREICH IN DEN VERFESTIGUNGSBEREICH	109
6.7	VERFESTIGUNGSBEREICH	112
6.7.1	Allgemeines	112
6.7.2	Zugfestigkeit	113
6.7.3	Gleichmaß- und Bruchdehnung	115

6.7.4	Beschreibung des Verfestigungsbereiches mit der Ludwிகgleichung	116
6.8	KERBSCHLAGARBEIT	119
6.9	ABHÄNGIGKEIT DER WERKSTOFFKENNWERTE VON DER ERZEUGNISFORM	120
6.9	KORRELATION	121
7	<u>VERGLEICH DER ERGEBNISSE AUS BESCHEINIGUNGEN UND FREMDPRÜFUNG</u>	122
8	<u>MODELL DER SPANNUNGS DEHNUNGS-KURVE VON BAUSTAHL</u>	127
8.1	ALLGEMEINES	127
8.2	VERTEILUNGSFUNKTION DER SPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DEHNUNG	127
8.2.1	Allgemeines	127
8.2.2	Zuordnung	128
8.2.2.1	Allgemeines	128
8.2.2.2	Übergang vom elastischen Bereich in den Fließbereich	130
8.2.2.3	Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich	130
8.2.2.4	Überschreitung der Gleichmaßdehnung	131
8.3	BESCHREIBUNG DER BEREICHE	131
8.3.1	Elastischer Bereich	131
8.3.2	Fließbereich	131
8.3.3	Verfestigungsbereich	132
8.4	VERTEILUNGSFUNKTION DER SPANNUNG BEI BEKANNTER DEHNUNG	133
8.5	PARAMETER DER SPANNUNGS-DEHNUNGS-KURVE	134
8.6	DARSTELLUNG DER SPANNUNGS-DEHNUNGS-KURVE	135
8.7	ZUSAMMENFASSUNG	140
9	<u>ZUSAMMENFASSUNG</u>	141

ANHANG

A1	<u>PRUFMODUS UND AUSWERTUNG DER ZUGVERSUCHE</u>	144
A1.1	DEHNMEßGERÄTE	144
A1.2	PRUFANLAGE	145
A1.2.1	Prüfeinrichtung	145
A1.2.2	Eichung	146
A1.3	AUSWERTUNG DER ZUGVERSUCHE	148
A1.3.1	Allgemeines	148
A1.3.2	Elastischer Bereich	149
A1.3.3	Untere Streckgrenze	150
A1.3.4	Statische Streckgrenze	152
A1.3.5	Entlastung	155
A1.3.6	Übergang Fließbereich in den Verfestigungsbereich	156
A1.3.7	Verfestigungsbereich	159
A1.4	AUSWERTUNG EINES ZUGVERSUCHES	162
A2	<u>DATENBANK</u>	167
A2.1	ALLGEMEINES	167
A2.2	DATENBANK "BESCHEINIGUNGEN"	167
A2.3	DATENBANK "FREMDPRÜFUNG"	168

L I T E R A T U R

1. Scheer, J., Maier, W., Paustian, O.: Planung und Auswertung von Versuchen an geschraubten Verbindungen, Teil 1, Herstellung, Basisvariable, Gütekontrolle von geschraubten Verbindungen sowie statistische Planung und Auswertung. Braunschweig, Bericht Nr. 6065 des Instituts für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig 1985
2. Fisz, M.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 4. Auflage, Berlin 1966
3. Rasch, D.: Elementare Einführung in die mathematische Statistik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1968
4. Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer Verlag, 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York 1978
5. Schüeller, G.J.: Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, München 1981
6. Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Werkstoffkunde Stahl. Band 1 und 2. Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf 1985
7. Scheer, J., Maier, W., Bahr, G.: Basisversuche zur statischen Streckgrenze. Braunschweig, Bericht Nr. 6081 des Instituts für Stahlbau der Technischen Universität Braunschweig 1982
8. Hall, E.O.: Yield point phenomena in metals and alloys. Australia, University of Newcastle
9. Dahl, W., Rees, H.: Die Spannungs-Dehnungs - Kurve von Stahl, Verlag Stahleisen m.b.H., Düsseldorf 1976

10. Dahl, W., Belche, F.: Kennzeichnung des Stahls durch die statische Streckgrenze bei Verwendung im Hochbau. Aachen, Forschungsbericht des Instituts für Eisenhüttenkunde der Rheinisch Westfälischen Hochschule Aachen 1982
11. Van Rooyen, G.T.: Basic factors which influence the Lüders strain during discontinuous yielding. *Materials Science and Engineering* 7(1971) 37-48
12. Van Rooyen, G.T.: The stress and strain distribution in a propagating Lüders front accompanying the yield point phenomenon in iron. *Materials Science and Engineering* 3(1968-69) 105-117
13. Moser, M.: Grundsätzliches zur Streckgrenze. In der Festgabe zum achtzigsten Geburtstag von Carl von Bach, VDI-Verlag GmbH, Berlin 1927, 74-79
14. Scheer, J., Maier, W.: Zum Einfluß der statischen Streckgrenze auf die Knicklast mittelschlanker Stäbe. In der Festschrift Roik, Mitteilung Nr. 84-3 des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr Universität Bochum, September 1984, 298-315
15. Scheer, J., Maier, W., Rohde, M.: Basisversuche zur statischen Streckgrenze. *Stahlbau* 3(1987) 79 - 84
16. Regec, J.E., Huang, J.S., Chen, W.F.: Mechanical properties of C-Series connections. Bethlehem, Pennsylvania, Lehigh University, Fritz Engineering Laboratory Report No. 333.17, April 1972
17. Desai, S.: Tension testing procedures. Bethlehem, Pennsylvania, Lehigh University, Fritz Engineering Laboratory Report No. 237.44, February 1969

VIII

18. Alpsten, G.A.: Variations in Mechanical and Cross-sectional Properties of Steel. Lehigh University, Vol. Ib, Proceedings, International Conference on Planning and Design of tall buildings, August 1972, 21-26
19. Reichel, U. : Sinnvolle Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Kurve. Vortrag zum 2. Aachener Stahlkolloquium Werkstofftechnik 1986, Tagungsband, 3.1-1 - 3.1-4.
20. Vincze, I.: Mathematische Statistik mit industriellen Anwendungen. Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich, Band 1 und 2, 2. Auflage, 1984
21. Mang, F.; Steidl, G.; Bucak, Ö.: Stahl im Altbau und Wohnungsbau. Abschlußbericht, Karlsruhe, Bericht der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Karlsruhe, Teil 1, Karlsruhe, 1980
22. Barth, W.-D.; Mühlner, W.: Niedersächsische Bauordnung. Textausgabe mit Anmerkungen, Architektenkammer Niedersachsen, Hindenburgstr. 26, Hannover, 1986
23. Sedlacek, G.: Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz von hochfesten schweißbaren Baustählen im Stahlbau. Vortrag, 2. Aachener Stahlkolloquium, Werkstofftechnik, 1986
24. Rohde, W.: Überlegungen zur Anwendung statistischer Verfahren bei der Abnahmeprüfung von Stahl und Stahlerzeugnissen. Vortrag, Sitzung des FES- Arbeitsausschuß DIN 17 010, Teil 2, 1981
25. Schrupp, K.; Rackwitz, R.: Einfluß der Verteilung von Qualitätsangebot und Qualitätskontrolle auf die Bauwerkssicherheit. München, Bericht des Lehrstuhls für Massivbau der Technischen Universität München, 1984

26. Vrouwenfelder, A.: Statistische Gegevens ten behoeve von het Projekt Veiligheid van Bouwconstructies. Rapport No.Bi-84-4, Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Delft, 1984
27. Edlund, B.; Leopoldson, U.: Monte Carlo simulation of the strength of the steel structures. Part 1 , Part 2, Chalmers Tekniska Högskola, Institutionen för Konstruktionsteknik, Stal- och Träbyggnad, Göteborg, 1971
28. Paustian, O.: Geschraubte Verbindungen - Analyse des Tragverhaltens, statistische Versuchsplanung und -auswertung unter besonderer Berücksichtigung von Vorinformationen. Dissertation, TU Braunschweig, 1985
29. Evans, R. W.: Effect of prior cold reduction on ductility of annealed rimmed steel. Journal of The Iron and Steel Institute 11(1967) 1150 - 1155
30. Siebel, E.; Wellinger, K.: Über ein neues Verfahren zur Bestimmung der Dauerstandfestigkeit metallischer Werkstoffe. Die Abnahme; Sonderteil des Anzeigers für Maschinenwesen für die Abnahme von Werkstoffen und Betriebsbedarf 9(1939)
31. Tall, L.; Ketter, R. L.: On the yield properties of structural steel shapes. Bethlehem, Pennsylvania, Lehigh Universiy, Fritz Engineering Laboratory Report No. 220A.33, November 1958
32. Tall, L.; Alpsten, G. A.: On the scatter in yield strength and residual stresses in steel members. Symposium on concepts of safety of structures and methods of design, Final report, London, 1969, 151-163

33. Nagarajo Rao, N. R.; Lohrmann, M.; Tall, L.: Effect of strain rate on the yield stress of structural steels. American society for Testing and Materials. Authorized reprint, March 1966
34. Galambos, T. V.; Ravindra, M. K.: Properties of steel for use in LFRD. Journal of Structural Division, 104/St9(1978), 1459-1468
35. Hawranek, R.; Petersen, C.: Sicherheit gedrückter Stahlstützen unter Berücksichtigung der statistischen Verteilung von E-Modul, Fließgrenze, Eigenspannungen, Querschnittsfläche und Vorkrümmung. München, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Sonderforschungsbereich 96, Heft 8(1975)
36. Schneider, E.: Erfahrungen des Prüfers der Gütegemeinschaft Stahlhochbau. Stahlbauseminar in Lindau in: Wissenschaft und Praxis, Band 23, Fachhochschule Biberach/Riss, 1981
37. Basler, K.: Kommentar zur Norm SIA 161, Stahlbauten. Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau, Zürich, 1979
38. Robiller, G.; Straßburger, C.: Zum Bauschinger-Effekt unlegierter Stähle, Materialprüfung 11(1969) 89-95
39. Schmidt, W.: Die Abhängigkeit der Poisson-Zahl von der Verformung bei verschiedenen Stählen. Sonderdruck aus "Archiv für das Eisenhüttenwesen" 35(1964) 241-246
40. Lenz, E.: Der Einfluß des Mangangehaltes auf die Ausscheidung von Kohlenstoff und Stickstoff und die Auswirkung auf die mechanischen und technologischen Eigenschaften. Dissertation, RWTH Aachen 1973

41. Jänicke, W.; Thiel, G.: Kriechen von Stahl unter statischer Beanspruchung bei Raumtemperatur. Archiv für das Eisenhüttenwesen 3/4(1950) 105-118
42. Glos, P.; Maier, W.; Weigle, U.: Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Fichtenbrettschichtholz als Grundlage für ein probabilistisches Bemessungsverfahren, Teil 1, Versuchseinrichtung für Kurzzeit-Druckversuche. München, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Sonderforschungsbereich 96, Heft 7(1973)
43. Glos, P.: Zur Bestimmung des Festigkeitsverhaltens von Brettschichtholz bei Druckbeanspruchung aus Werkstoff- und Einwirkungskenngrößen. München, Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke, Sonderforschungsbereich 96, Heft 35(1978)
44. Maier, W.; Rohde, M.: Zur Zuverlässigkeit von Lastdosierern. Bauingenieur 61(1986) 267-273

BEZEICHNUNGEN

Allgemein

w	Weg
F	Kraft
t	Zeit
w	Weg
\dot{w}	Weggeschwindigkeit
ϵ	Dehnung
$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit
σ	Spannung

Abmessungen

b	Probenbreite
l	Probenlänge
S ₀	Probenfläche zu Versuchsbeginn
t	Probendicke

Materialkennwerte (falls genormt, nach DIN 50 145)

A _g	Gleichmaßdehnung
A _k	Kerbschlagarbeit
A _{l\ddot{u}}	Lüdersdehnung
A ₅	Bruchdehnung
E _v	Verfestigungsmodul
E ₁	E-Modul im elastischen Bereich
E ₂	E-Modul im Fließbereich
E ₃	E-Modul im Verfestigungsbereich
F _m	Höchstzugkraft
k _{1,n}	Konstanten der Ludwிகgleichung

R_{eH}	obere Streckgrenze
$R_{eL, \dot{\epsilon}}$	untere Streckgrenze (von Dehngeschwindigkeit abhängig)
R_{eLUA1}	untere Streckgrenze vor Haltepause ($\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%./s}$)
R_{eLUA2}	untere Streckgrenze nach Haltepause ($\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%./s}$)
R_{eLUB}	untere Streckgrenze nach Entlastung ($\dot{\epsilon} = 5/60 \text{ \%./s}$)
R_{eS}	statische Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit
$R_{m,S}$	statische Zugfestigkeit
R_p	Streckgrenze: obere Streckgrenze R_{eH} ; falls keine obere Streckgrenze vorhanden: 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
$\Delta\sigma$	Spannungsabfall von dynamischer Spannungs-Dehnungs-Kurve ($\dot{\epsilon} > 0$) auf statischen Wert ($\dot{\epsilon} = 0$)

Messsystem

F_0	Vorlast
$l_B(DA1)$	aktuelle Meßbasis DA1
$l_B(DD1)$	aktuelle Meßbasis DD1
$l_0(DA1)$	Meßbasislänge DA1 zu Versuchsbeginn
$l_0(DD1)$	Meßbasislänge DD1 zu Versuchsbeginn
$\Delta l(DD1)$	Schneidenabstandsverlängerung
m	Anzahl der registrierten Messungen
w_O	Weg der oberen Schneide DA1
w_U	Weg der unteren Schneide DA1
$\epsilon(DA1)$	Dehnung, gemessen mit DA1
$\epsilon(DD1)$	Dehnung, gemessen mit DD1
$\epsilon_w(DD1)$	wahre Dehnung, gemessen mit DD1

statistische Auswertung

D, D_a	Testgrößen für Anpassungstest
f	Dichtefunktion
F	Verteilungsfunktion
k	Normierungskonstanten
L	Likelihood-Funktion
p	Wahrscheinlichkeiten
r	Schätzwert für Korrelationskoeffizient
x_0	Lageparameter (nur bei Lognormalverteilung)
x_p	Fraktilwert
θ	Verteilungsparameter
μ	Mittelwert
σ	Standardabweichung
	Korrelationskoeffizient

Abkürzungen

SFK	geordnete Stichprobenfunktion nach Gl. 2.1
NV	Normalverteilung nach Gl. 2.2
LNV	Lognormalverteilung nach Gl. 2.3
NVF	normalverteilte Grundgesamtheit mit normalverteilter Filterfunktion nach Gl. 2.6

1 EINLEITUNG

Baustähle werden in der Bundesrepublik Deutschland im Gegensatz zu vielen anderen Baustoffen, wie z.B. der Beton, nicht bauaufsichtlich überwacht. Die Sicherung der Qualität der Baustähle erfolgt durch Kontrollen der Hersteller. Sie ist in Gütenormen festgelegt, z.B. für die Allgemeinen Baustähle in DIN 17 100. Hier sind für die mechanischen Kennwerte Grenzwerte festgelegt, die einzuhalten sind. Statistische Gesichtspunkte spielen bei den Festlegungen der Normen noch keine Rolle.

Der derzeitige Zustand der Sicherung der Werkstoffgüte kann für die derzeitigen Normen i. allg. als zufriedenstellend angesehen werden. Schäden wegen zu geringer Festigkeiten sind nicht bekannt, wenn man von Verwechslungen oder Fehlbehandlungen von Stahl bei der Verarbeitung absieht. Das liegt vor allem an den z. Zt. relativ hohen Sicherheiten, mit denen wir unsere Konstruktionen nachweisen.

Nach künftigen Normen dürfen Stahlkonstruktionen wirklichkeitsnäher nachgewiesen werden. Damit einher gehen kann eine Reduktion der Sicherheitsabstände, die dann verantwortet werden kann, wenn die Qualität der Stähle hinreichend gesichert ist und ihr mechanisches Verhalten zutreffend beschrieben wird.

Hier setzt die Untersuchung ein, die dieser Arbeit zugrunde liegt. Mit ihr soll auf statistischer Grundlage die Qualität der Stähle geprüft werden, die z.Zt. in Stahlbaubetrieben der Bundesrepublik Deutschland verwendet werden. Für die fortschrittlichen Nachweismethoden ist ein erweiterter Prüfmodus erforderlich. Mit den danach ermittelten Materialkennwerten kann das Verhalten von Stahl bis in den Verfestigungsbereich einheitlich beschrieben werden.

Die Arbeit besteht im wesentlichen aus fünf Teilen:

1 Der Auswertung von Bescheinigungen

Auswertung von rd. 3500 Bescheinigungen über Werkstoffprüfungen mit dem Ziel, aus ihnen statistische Aussagen über die Verteilung von Materialkennwerten zu erhalten.

2 Einer Fremdprüfung

Entnahme von ca. 400 Proben in Stahlbaubetrieben und Prüfung zur Feststellung von Materialkennwerten mit statistischer Auswertung.

3 Der Entwicklung eines Prüfmodus

Entwicklung eines Prüfmodus zu Feststellung der Materialkennwerte der Proben aus der Fremdprüfung. Er erfaßt wegen der Weiterentwicklung der Nachweismethoden auch Werte, die heute noch nicht genormt sind.

4 Einer Blindprüfung

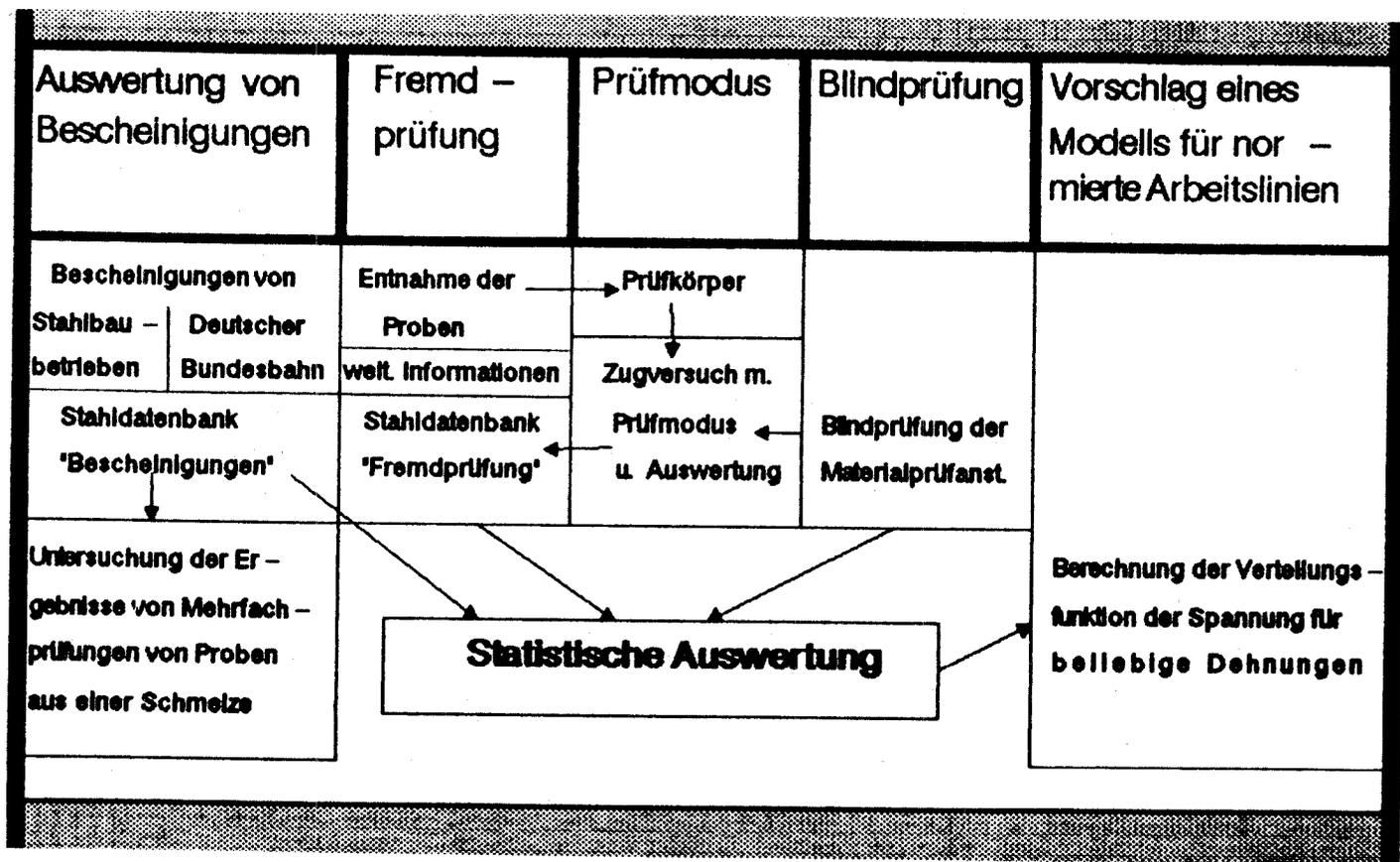
Prüfung der Qualität der Prüfungen von Materialprüf- und Versuchsanstalten zur Bestätigung der Zuverlässigkeit der in den Bescheinigungen angegebenen Materialkennwerte. Gleichzeitig konnte bei positivem Ergebnis der Prüfmodus überprüft werden.

5 Dem Vorschlag eines Modells für normierte Arbeitslinien

Modell zur Berechnung der Verteilungsfunktion der Spannung für beliebige Dehnungen. Hierbei wird die statistische Auswertung der Ergebnisse der Fremdprüfung der Berechnung zugrunde gelegt.

Eine Übersicht über den Ablauf der Untersuchungen ist im Bild 1.1 dargestellt.

Bild 1.1. Übersicht über den Ablauf der Untersuchungen



2 AUSWERTUNG VON BESCHEINIGUNGEN ÜBER MATERIALPRÜFUNGEN

2.1 ALLGEMEINES

Stähle werden nach Ergebnissen von Qualitätsprüfungen beurteilt, die in Bescheinigungen über Materialprüfungen nach DIN 50 049 - im weiteren kurz mit Bescheinigungen bezeichnet - festgehalten werden müssen. Sind Grenzwerte für die mechanischen und technologischen Eigenschaften für eine bestimmte Stahlsorte nicht eingehalten, müssen die Stähle zurückgewiesen werden. Für die meisten Allgemeinen Baustähle müssen Bescheinigungen der Lieferung beigelegt werden. Weitere Qualitätsprüfungen werden nur in Ausnahmefällen durchgeführt. So bieten die Bescheinigungen eine einfache und für bereits bestehende Bauwerke i .allg. die einzige Möglichkeit, Materialkennwerte zu erfassen und auszuwerten.

2.2 QUALITÄTSSICHERUNG

Die Fertigung der Stähle muß vom Hersteller nach eigenem Ermessen und in eigener Verantwortung überwacht werden.

Der Prüfumfang und die erforderlichen Prüfungen werden durch die Gütenormen festgelegt. Zusätzliche Prüfungen können auf Wunsch der Besteller durchgeführt werden.

Die Art von Bescheinigungen wird jedoch zwischen Hersteller und Besteller vereinbart.

Bescheinigungen werden in zwei Kategorien unterteilt, in diejenigen, die vom herstellenden oder verarbeitenden Werk selbst ausgestellt werden, und in diejenigen, die von Sachverständigen, die von der Fertigung im herstellenden oder verarbeitenden Werk unabhängig sind, unterschrieben werden (Abnahmeprüfzeugnisse).

Für die erste Gruppe ist ein sog. Werkszeugnis nach DIN 50 049 -

2.2 gebräuchlich, mit dem der Hersteller bestätigt, daß das gelieferte Erzeugnis den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht. I. allg. werden hier nur die Ergebnisse einer Schmelzanalyse angegeben.

Bei den Abnahmeprüfzeugnissen müssen die Ergebnisse aus Prüfungen an der Lieferung selbst oder an in den Normen, amtlichen Vorschriften oder technischen Lieferbedingungen angegebenen Prüfeinheiten durchgeführt werden. Gebräuchlich sind Abnahmeprüfzeugnisse nach DIN 50 049 - 3.1A und 3.1B. Speziell für Abnahmeprüfzeugnisse 3.1B müssen die erforderlichen Prüfungen neben der Unterschrift eines Sachverständigen, die auch bei den Abnahmezeugnissen 3.1A notwendig ist, von einer von der Fertigung des herstellenden oder verarbeitenden Werks unabhängigen Prüfstelle durchgeführt werden.

Die erforderlichen Prüfungen sind für die Allgemeinen Baustähle in DIN 17 100 festgelegt. Für alle Stähle ist ein Zugversuch und zusätzlich bei Flachzeug aus Stählen der Güteklasse 3 der Kerbschlagbiegeversuch durchzuführen. Je Schmelze ist weiterhin eine Probe zur Analyse der chemischen Zusammensetzung zu entnehmen; eine Stückanalyse muß jedoch besonders vereinbart werden.

Für Stähle mit besonderen Anforderungen sind weitere Prüfungen erforderlich. Der Prüfumfang ist DIN 17 100 zu entnehmen.

2.3 GRUNDGESAMTHEIT

2.3.1 Definition der Grundgesamtheit

DIN 18 800 Teil 1 erlaubt im Stahlbau als Werkstoffe nur die Stahlsorten St37-2, USt37-2, RSt37-2, St37-3 und St52-3, die im weiteren kurz mit St37 und St52 bezeichnet werden. Andere Stähle dürfen nur in Ausnahmefällen bei bestimmten Voraussetzungen verwendet werden. Lediglich für die hochfesten schweißgeeigneten

Feinkornbaustähle StE460 und StE690 existieren Richtlinien. Sie spielen jedoch trotz höherer Festigkeit keine wesentliche Rolle. Die vorliegende Untersuchung beschränkt sich deshalb auf die Stahlsorten St37 und St52:

Die Grundgesamtheit wird als die Gesamtmenge aller in der Bundesrepublik Deutschland im Stahlbau eingesetzten gewalzten Baustähle definiert, die als St37 oder St52 eingebaut werden.

Zur Grundgesamtheit gehören also auch die Stähle, die nicht den Anforderungen der DIN 17 100 entsprechen, jedoch als St37 bzw. St52 eingebaut werden.

2.3.2 Unterteilung der Grundgesamtheit

Die Grundgesamtheit kann neben der Einteilung in die Stahlsorten St37 und St52 in verschiedene Teilmengen unterteilt werden, die im Bild 2.1 skizziert sind:

1 Unterteilung in Stahlhersteller

Jeder Stahlhersteller stellt eine unterschiedlich große Teilmenge an Allgemeinen Baustählen her. In der Grundgesamtheit können auch im Ausland hergestellte Stähle vorhanden sein, die in der Bundesrepublik Deutschland als St37 bzw. St52 verkauft werden.

Es kann auch unterschieden werden, ob die Stähle direkt vom Stahlhersteller oder über einen Zwischenhändler geliefert werden.

Eine Unterteilung nach Herstellern ist im Bild 2.1 nicht vorgenommen worden.

2 Unterteilung in Stahlbaubetriebe

Jeder Stahlbaubetrieb verarbeitet eine unterschiedlich große

Teilmenge von Stählen aus der Grundgesamtheit.

Die Grundgesamtheit kann weiterhin in die Standorte der Betriebe z.B. nach Bundesländern oder in Regionen wie z.B. Norddeutschland unterteilt werden.

Diese Unterteilung ist jedoch nicht im Bild 2.1 vorgenommen worden.

Die für Bauwerke der Deutschen Bundesbahn eingesetzten Stähle repräsentieren eine weitere Teilmenge. Da sie als Bauherr zur Errichtung ihrer Bauwerke Stahlbaubetriebe beauftragt, überschneidet diese Teilmenge diejenigen der Stahlbaubetriebe.

3 Erzeugnisform

Die Untersuchungen beschränken sich auf Flachstähle, Bleche und offene Walzprofile, jedoch nicht auf Rohre (rund, eckig) oder Gußstahlerzeugnisse.

4 Erzeugnisdicke

DIN 17 100 unterscheidet die Erzeugnisse nach der Erzeugnisdicke. Für die Mindestwerte der oberen Streckgrenze wird in folgende Erzeugnisdicken unterschieden:

0 bis einschließlich 16 mm,
 größer 16 bis einschließlich 40 mm,
 größer 40 bis einschließlich 63 mm,
 größer 63 bis einschließlich 80 mm,
 größer 80 bis einschließlich 100 mm und
 größer 100 mm.

5 Bescheinigungen

Nicht alle Stähle werden mit Bescheinigungen geliefert, so daß die Grundgesamtheit in Teilmengen der Stähle mit und ohne Bescheinigungen aufgeteilt werden kann.

6 Zeit

Die Stähle können nach dem Herstellungsdatum unterteilt werden. Diese Unterteilung ist jedoch im Bild 2.1 nicht vorgenommen worden.

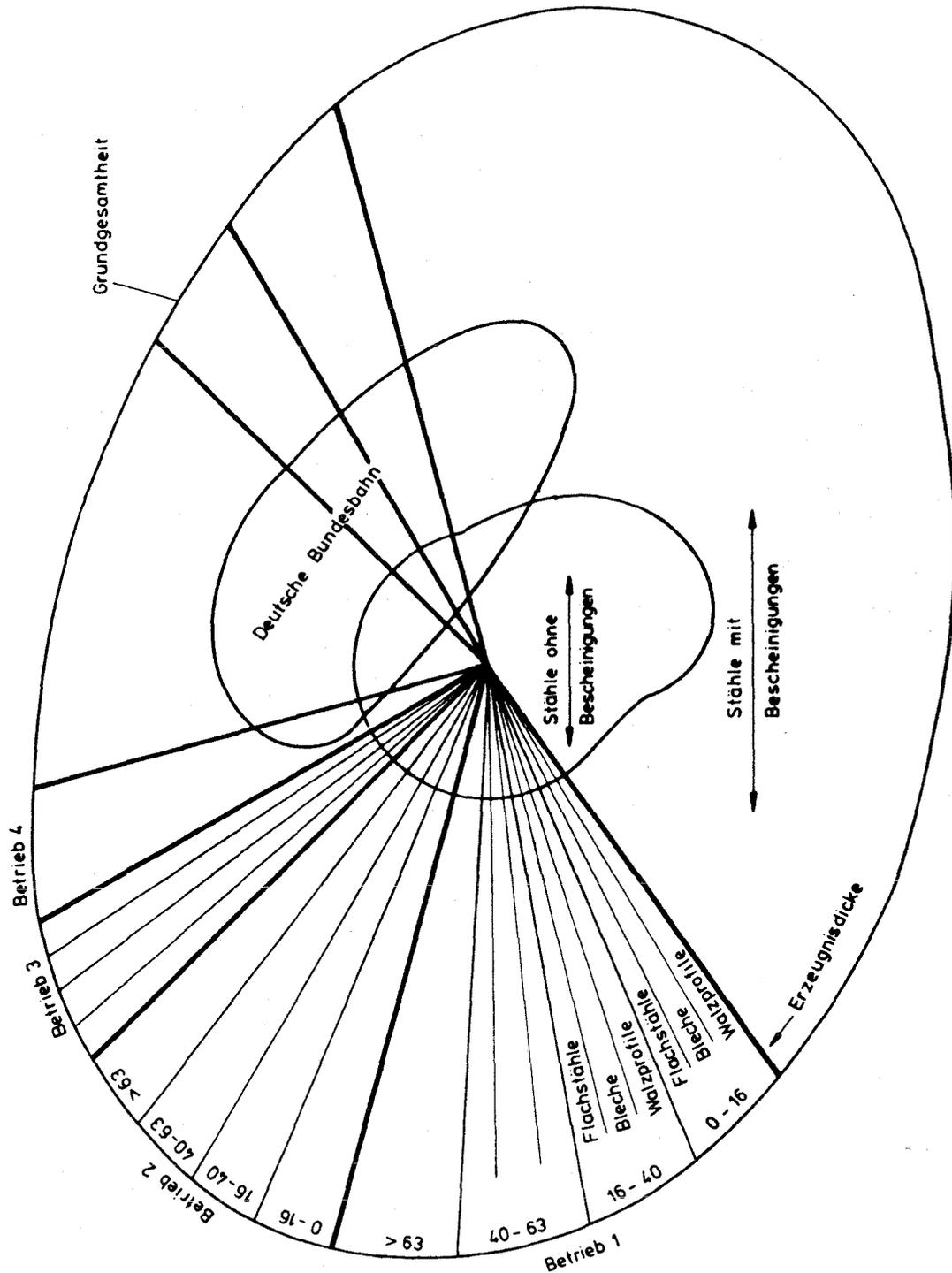


Bild 2.1. Unterteilung der Grundgesamtheit

2.4 AUFGENOMMENE BESCHEINIGUNGEN

2.4.1 Auswahl der Bescheinigungen

Es standen Bescheinigungen von insgesamt 3 Betrieben mit über 400 Mitarbeitern und von der Deutschen Bundesbahn zur Verfügung. Die Betriebe hatten ihren Sitz ausschließlich im Westen und Norden der Bundesrepublik Deutschland. Davon wurden alle vorhandenen Bescheinigungen berücksichtigt, die eindeutig der Grundgesamtheit zugeordnet werden konnten. Von den von der Deutschen Bundesbahn zur Verfügung gestellten Bescheinigungen wurden alle Stähle berücksichtigt, die im Jahr 1969 und nach 1979 geprüft bzw. hergestellt wurden. Es ist nicht gesichert, daß alle Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn vorlagen, und daß somit nicht unbedingt die Gesamtmenge aller in diesem Zeitraum für sie verarbeiteten Stähle berücksichtigt worden ist.

2.4.2 Bestandsaufnahme

Insgesamt wurden von allen zur Verfügung stehenden Bescheinigungen 3583 in eine Datenbank, die im Anhang A2 beschrieben ist, aufgenommen.

Speziell bei der Deutschen Bundesbahn wird eine zweite Qualitätskontrolle vor dem Einbau der Stähle durchgeführt. Deshalb ist in der Tabelle 2.1 die Bestandsaufnahme getrennt für Betriebe und Deutsche Bundesbahn durchgeführt worden.

Nicht alle Bescheinigungen werden bei den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt. Sind z.B. mehrere Bescheinigungen aus einer Schmelze vorhanden, wird jeweils nur eine pro Schmelze berücksichtigt.

Es wird hierbei davon ausgegangen, daß von jeder Schmelze gleichviel Erzeugnisse hergestellt werden. Sind zufällig mehrere Ergebnisse pro Schmelze vorhanden, würden die betreffenden Schmelzen überbewertet, d.h. gewichtet werden.

In der Neufassung von DIN 17 100 vom Januar 1980 sind Grenzwerte gegenüber den älteren Fassungen vom Oktober 1957 und September 1966 geändert worden. Deshalb ist in den letzten zwei Spalten der Tabelle 2.1 die Bestandsaufnahme für Stähle, die nach 1979 geprüft wurden, durchgeführt worden.

Tabelle 2.1. In die Datenbank aufgenommene Bescheinigungen

Bescheinigung von	Stahl- sorte	gesamt aufgenommen		nach 1979 geprüft	
		gesamt	für Auswertung berücksichtigt	gesamt	für Auswertung berücksichtigt
Deutsche Bundesbahn	St37	647	530	269	230
	St52	560	384	87	75
Betriebe	St37	2231	1222	2231	1222
	St52	118	55	118	55
Zusammen	St37	2878	1746	2500	1452
	St52	678	440	205	131

Es konnten keine Bescheinigungen von Stählen aufgenommen werden, die von kleineren und mittleren sowie ausländischen Betrieben in der Bundesrepublik Deutschland verarbeitet werden.

2.5 BERECHNUNGSGRUNDLAGEN

2.5.1 Verteilungsfunktionen

I. allg. liegt eine ungeordnete Stichprobe vor, die zunächst in Form von Histogramm dargestellt wird, um aus ihr den Typ einer Verteilung zu schätzen (s. Bild 2.2). Als Rechengrundlage ist ein Histogramm jedoch nicht geeignet.

Ordnet man die n Ergebnisse x_i ($i = 1, n$) der Stichprobe der Größe nach mit $\min = x_1$, $\max = x_n$ und $x_1 < x_2 < \dots < x_n$, so ist

$$\begin{aligned}
 F(x) &= 0 && \text{für } x < \min \\
 &= (m-1)/n && \text{für } x_{m-1} \leq x < x_m, \quad m = 2, n \\
 &= 1 && \text{für } x \geq \max
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

die Summenhäufigkeitskurve mit den Parametern $\theta_1 = \min = x_1$, $\theta_2 = \max = x_n$ und $\theta_3, \theta_4, \dots, \theta_{n+2} = x_1, x_2, \dots, x_n$ (linker oberer Teil von Bild 2.2). Aus ihr können z.B. durch Abzählen die Fraktilwerte ermittelt werden (s. Abschnitt 2.5.3). Als Rechengrundlage ist diese Funktion jedoch auch nicht geeignet. Hierfür sind mathematisch leicht handhabbare Verteilungsfunktionen sinnvoll.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die drei im Bild 2.2 dargestellten Verteilungsfunktionen untersucht und ausgewertet, die im folgenden beschrieben werden.

Die Dichtefunktion der Normalverteilung ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(\mu-x)^2}{2\sigma^2}} \tag{2.2}$$

mit den Parametern $\theta_1 = \mu$ und $\theta_2 = \sigma$.

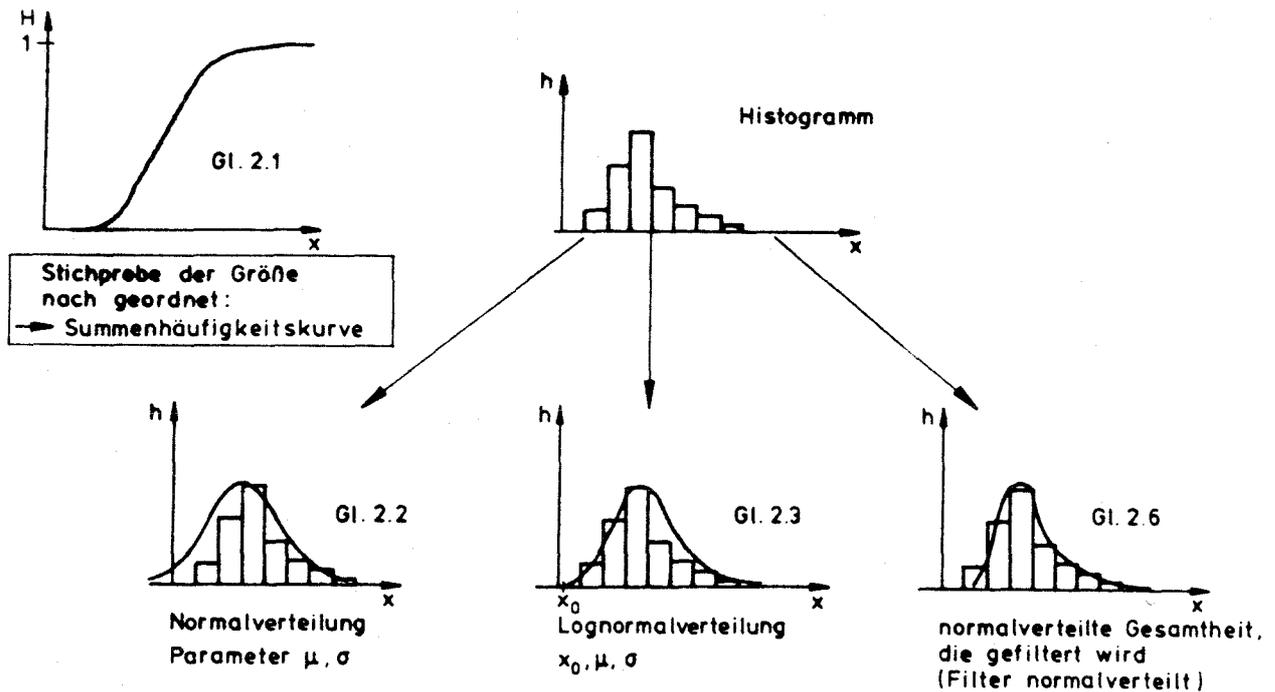


Bild 2.2. Ermittlung der Verteilungsfunktionen aus einer Stichprobe

Die Dichtefunktion der Lognormalverteilung ist

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma (x-x_0)} e^{-\frac{(\ln(x-x_0)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3)$$

mit den Parametern $\theta_1 = \mu$, $\theta_2 = \sigma$ und $\theta_3 = x_0$.

Die Herleitung der dritten Verteilungsfunktion ist im Bild 2.3 dargestellt.

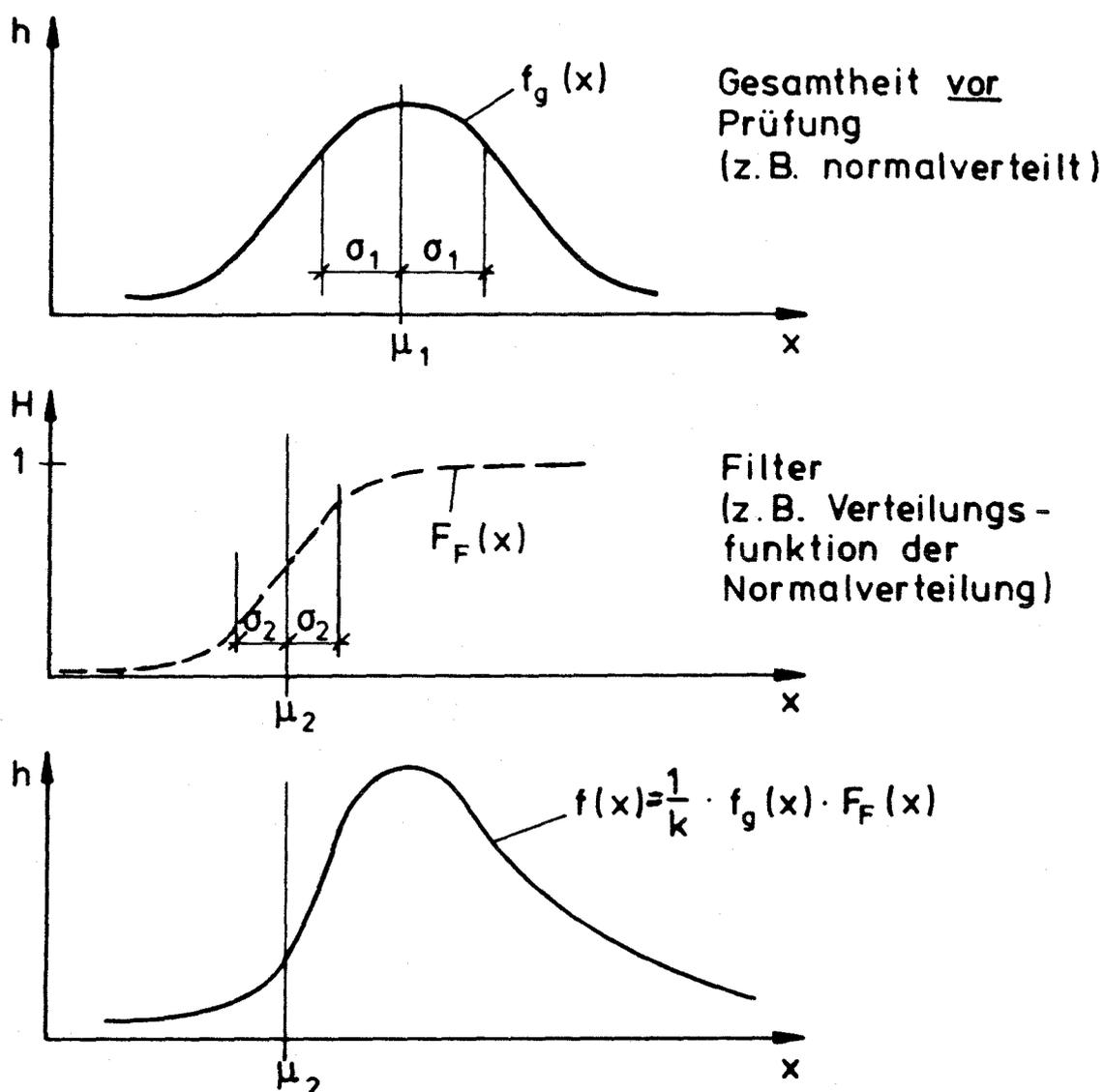


Bild 2.3. Berücksichtigung von Filtern

In DIN 17 100 sind z.B. für die obere Streckgrenze Mindestwerte angegeben. Ist die Streckgrenze bei der Prüfung unterhalb des Mindestwertes, muß das Erzeugnis zurückgewiesen werden, d.h. die Gesamtheit wird gefiltert. In der Praxis ist der Übergang stetig, d.h. daß Ergebnisse unterhalb der geforderten Werte mit einer Wahrscheinlichkeit p_1 angenommen werden, obwohl sie abgelehnt werden müßten. Auch Ergebnisse oberhalb der geforderten Werte werden mit einer Wahrscheinlichkeit p_2 abgelehnt, obwohl sie angenommen werden können. Diese sog. Filterfunktion $F_F(x)$ ist im Idealfall eine Sprungfunktion

$$F_F(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x < x_0 \\ 1 & \text{für } x \geq x_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Mit der Dichtefunktion $f_G(x)$ der ungefilterten Gesamtheit der Prüfergebnisse ergibt sich die Dichtefunktion der gefilterten Ergebnisse zu

$$f(x) = \frac{1}{k} f_G(x) F_F(x) \quad (2.5)$$

Im weiteren wird als Filterfunktion die Verteilungsfunktion der Normalverteilung angenommen. Unter der Annahme, daß die ungefilterte Grundgesamtheit der Prüfergebnisse normalverteilt ist, ergibt sich die Dichtefunktion der gefilterten Ergebnisse

$$f(x) = \frac{1}{k\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(\mu_1-x)^2}{2\sigma_1^2}} \times \int_{-\infty}^1 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(\mu_2-x)^2}{2\sigma_2^2}} dx \quad (2.6)$$

mit den Parametern $\theta_1 = \mu_1$, $\theta_2 = \sigma_1$, $\theta_3 = \mu_2$ und $\theta_4 = \sigma_2$.

k ist ein Normierungsfaktor, der aus der Bedingung $\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = 1$ berechnet wird. k ist gleich mit der Wahrscheinlichkeit, daß das Prüfstück nicht zurückgewiesen wird. θ_1 und θ_2 können als Verteilungsparameter der ungefilterten Grundgesamtheit, θ_3 als Zielwert des Filters und θ_4 als Güte des Filters gedeutet werden.

2.5.2 Anpassungstest

Die Güte der Anpassung an die Summenhäufigkeitskurve wird mit dem Kolmogoroff-Smirnoff-Test (K/S-Test) geprüft. Auf andere Testverfahren wird verzichtet, da sie i. allg. normalverteilte Grundgesamtheiten voraussetzen, während der K/S-Test verteilungsfrei ist /2,3,4/. Berechnet man aus der Summenhäufigkeitskurve nach Gl.

2.1 die Summenhäufigkeiten F_E der n Ergebnisse und bildet die Differenzen $F_E - F_B$ mit der zu testenden Anpassungsfunktion F_B , so ist der Prüfquotient

$$D = \sup |F_E - F_B| / n, \quad (2.7)$$

bzw. für relative Häufigkeiten

$$D = \sup |F_E - F_B| \quad (2.8)$$

die Testgröße mit $0 \leq D \leq 1$. Mathematisch streng setzt der K/S-Test unendlich viele Klassen k voraus, ist aber für $k > 5$ ausreichend genau /4/. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher F_E aus den Histogrammen mit einer Unterteilung in mindestens 30 Klassen berechnet. Geprüft wird die Nullhypothese: "Die Stichprobe entstammt der bekannten Verteilung". Der kritische Wert bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ist

$$D_a = 1.36 / \sqrt{n} \quad (2.9)$$

Ist $D_a < D$, wird die Nullhypothese abgelehnt.

Zwei unabhängige Stichproben werden mit dem gleichen Verfahren verglichen. Hierbei werden sie hinsichtlich der Frage verglichen, ob sie aus derselben Grundgesamtheit stammen (K/S/O-Test). Die Prüfgröße

$$D = \sup |F_{E1} - F_{E2}| \quad (2.10)$$

mit der Anzahl der Stichprobenelemente n_1 und n_2 zweier unabhängiger Stichproben wird der Testgröße

$$D_a = 1.36 \sqrt{(n_1 + n_2) / (n_1 n_2)} \quad (2.11)$$

gegenübergestellt /4/. Ist $D_a < D$, liegt hinsichtlich der Verteilungsfunktionen bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% ein signifikanter Unterschied vor.

2.5.3 Fraktilwerte

Als Fraktilwert ist derjenige Wert x_p definiert, der mit einer Wahrscheinlichkeit p unterschritten wird:

$$\int_{-\infty}^{x_p} f(x) dx = p. \quad (2.12)$$

Im Fall der Summenhäufigkeitskurve nach Gl. 2.1 ist $x_p = x_j$ mit $j = \text{int}(n \cdot p)$.

2.5.4 Bestimmung der Verteilungsparameter mit der Maximum-Likelihood-Methode

Nicht immer können Schätzwerte für die Parameter der Verteilungsfunktion analytisch aus den Ergebnissen berechnet werden. In diesen Fällen werden mit der Likelihood-Schätzfunktion für die unbekannt Parameter Schätzwerte $\hat{\theta}$ bestimmt. Ist

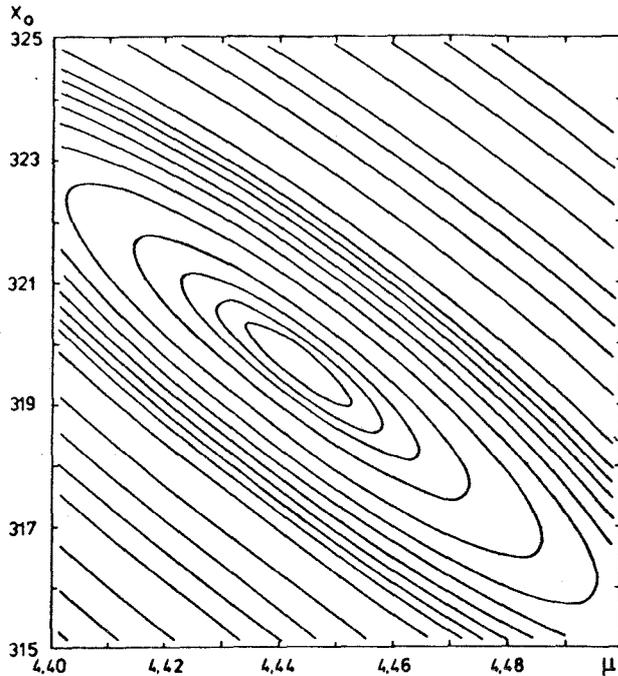
$$L(\underline{\theta}/x) = \prod f(\underline{\theta}/x_j) \quad (2.13)$$

die Likelihood-Funktion der Parameter $\underline{\theta}$, so ist

$$L(\hat{\theta}/x) = \prod f(\hat{\theta}/x_j) \quad (2.14)$$

die Maximum-Likelihood-Funktion, wenn $L(\underline{\theta}/x)$ an den Stellen $\hat{\theta}$ ein absolutes Maximum annimmt.

Die Bestimmung der Schätzwerte für die Parameter $\hat{\theta}$ erfolgt numerisch mit einem hierfür entwickelten Fortran-5-Programm, mit dem beliebige Dichte- und Verteilungsfunktionen multiplikativ verknüpft werden können. Die implementierten Funktionstypen sind in /28/ beschrieben. In Bild 2.4 ist beispielhaft die Likelihoodfunktion für $\theta_1 = 0.313$, $4.40 \leq \theta_2 \leq 4.50$ und $315 \leq \theta_3 \leq 325$ für



die Lognormalverteilung in Form von Höhengschichtlinien dargestellt. Als Stichprobe wurden die Ergebnisse aus den Bescheinigungen der oberen Streckgrenze R_{eH} für den St52 mit den Erzeugnisdicken $t = 0$ bis einschließlich 16mm bei einem Stichprobenumfang $n = 255$ gewählt. Die Parameter $\hat{\theta}$ sind $(0.313, 4.44, 320)$.

Bild 2.4. Exemplarische Darstellung der Likelihood-Funktion für die Parameter θ_2 und θ_3 der Lognormalverteilung einer Zufallsstichprobe

2.5.5 Korrelation

Als Maßzahl für die Straffheit eines linearen Zusammenhangs zwischen gleichwertigen Zufallsvariablen einer Stichprobe wird der Korrelationskoeffizient ρ mit $-1 \leq \rho \leq +1$ gewählt.

Ein Schätzwert für zwischen zwei Parametern x_1 und x_2 einer Stichprobe mit n Elementen ist

$$r = \frac{\sum x_1 x_2 - (\sum x_1)(\sum x_2)/n}{\sqrt{(\sum x_1^2 - (\sum x_1)^2/n)(\sum x_2^2 - (\sum x_2)^2/n)}} \quad (2.15)$$

Zur Abschätzung der Vertrauensbereiche für ρ kann nach R.A. Fisher z.B. in /4/ über die z -Transformation r approximativ in eine normalverteilte Zufallsgröße überführt werden mit

$$\hat{z} = \tanh^{-1}r \quad (2.16)$$

und der Standardabweichung

$$s_{\hat{z}} = 1 / \sqrt{n-3} . \quad (2.17)$$

Der 95 %- Vertrauensbereich für ρ ist

$$\tanh(\hat{z}-1.96s_{\hat{z}}) \leq \rho \leq \tanh(\hat{z}+1.96s_{\hat{z}}) . \quad (2.18)$$

Schließt der Vertrauensbereich $\rho = 0$ ein, kann nicht ausgeschlossen werden, daß die Ergebnisse x_1 und x_2 unkorreliert sind.

Nur in Ausnahmefällen ergeben sich Korrelationskoeffizienten $|\rho| = 1$, die einen exakten linearen Zusammenhang kennzeichnen. Der Grund liegt in nichtlinearen Zusammenhängen zwischen x_1 und x_2 und darin, daß weitere Einflüsse vorhanden sind. Der Nachweis mehrerer Einflüsse kann über partielle Korrelationskoeffizienten erfolgen. Da jedoch die Einflüsse auch hier linear eingehen und bekannt sein müssen, wird auf eine Berechnung verzichtet.

2.5.6 Regression

Verschiedene Einflüsse x_j ($j = 1, 2, \dots, m$) auf die Festigkeitskennwerte werden mit einem multiplen Regressionsansatz abgeschätzt mit

$$f(\underline{x}) = \hat{a}_1 f_1(\underline{x}) + \hat{a}_2 f_2(\underline{x}) + \dots + \hat{a}_l f_l(\underline{x}) . \quad (2.19)$$

Die Parameter a_i ($i = 1, 2, \dots, l$) werden mit der Fehlerquadratmethode ermittelt. Die Voraussetzungen und die Herleitung sind in /4,5,6/ beschrieben. Die Berechnung der Restvarianz erfolgt entsprechend Gl. A1.2 und A1.3.

2.6 VERTEILUNGEN

2.6.1 Grenzwerte für die chemische Zusammensetzung und die Festigkeitskennwerte der Stähle

In DIN 17 100 sind Grenzwerte angegeben, um wichtige Eigenschaften der Stähle zu gewährleisten. So werden für die Elemente Kohlenstoff, Phosphor, Schwefel, Stickstoff sowie Silizium und Mangan, die als Legierungselemente im Stahl enthalten sind, Höchstwerte festgelegt. Die Höchstwerte sind in Tabelle 2.2 für die Schmelzanalyse zusammengestellt, wobei beim Kohlenstoffgehalt auf eine Differenzierung nach Erzeugnisdicken verzichtet wurde.

Andere Elemente werden in der DIN 17 100 nicht geregelt, wie z.B. Kupfer, Nickel, Chrom, Molybdän und Vanadium, obwohl sie die Schweißbarkeit beeinflussen können /6/.

Tabelle 2.2. Höchstwerte der Schmelzanalysen nach DIN 17 100

Stahlsorte	C / % /	Mn / % /	Si / % /	P / % /	S / % /	N / % /
St 37-2	0.20	-	-	0.050	0.050	0.009
USt 37-2	0.20	-	-	0.050	0.050	0.007
RSt 37-2	0.20	-	-	0.050	0.050	0.009
St 37-3	0.17	-	-	0.040	0.040	-
St 52-3	0.22	1.60	0.55	0.040	0.040	-

Die Grenzwerte für die Festigkeitseigenschaften nach DIN 17 100 sind in Tabelle 2.3 für die Stahlsorten St37 und St52 zusammengestellt.

Tabelle 2.3. Grenzwerte der Festigkeitseigenschaften nach DIN 17 100

	t /mm/	St37	St52
R_m /N/mm ² /	-	340 - 470	490 - 630
R_{eH} (min.) /N/mm ² /	0-≤16	235	355
	<16-≤40	225	345
	<40-≤63	215	335
A_5 (min.) /‰/	< 3-≤40	260	- längs - 220
		240	- quer - 200
	<40-≤63	250	- längs - 210
		230	- quer - 190
A_K /J/ (min.)	-	27	27

2.6.2 Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte von der Erzeugnisform

In DIN 17 100 und DIN 18 800 wird nicht nach der Erzeugnisform unterschieden. Da aber z.B. durch verschiedene Formgebungsverfahren Unterschiede auftreten können, wird nach Gl. 2.10 und 2.11 getestet, ob signifikante Unterschiede zwischen den Festigkeitskennwerten von Blechen, Flachstählen und Walzprofilen bestehen. In Tabelle 2.4 sind die 5, 50 und 95%-Faktilen angegeben. Für diese Untersuchung wurden die in der Datenbank eingegebenen Werte nach Erzeugnisdicken unterschieden, jedoch nicht nach Prüfdatum und nach Herkunft (Deutsche Bundesbahn bzw. Betriebe). Auf eine Auswertung für Erzeugnisdicken $t > 40$ mm wurde verzichtet, weil nicht genügend Werte vorlagen.

Bei den umrahmten Werten konnte ein signifikanter Unterschied der

Ergebnisse jeweils im Vergleich zu denen der anderen beiden Erzeugnisformen nicht ausgeschlossen werden.

Tabelle 2.4. Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte von der Erzeugnisform

--- St37 ---													
		0 - ≤16 mm				<16 - ≤40 mm				0 - 100 mm			
Material-kennwert	Erzeug-nisform	An-zahl	Fraktile			An-zahl	Fraktile			An-zahl	Fraktile		
			5%	50%	95%		5%	50%	95%		5%	50%	95%
R_{eH} /N/mm ² /	Bleche	521	255	295	350	164	238	273	306	702	249	288	343
	Flachst.	44	254	297	325	3	-	-	-	47	253	297	335
	Profile	517	250	285	322	451	233	252	289	987	235	267	315
R_m /N/mm ² /	Bleche	521	387	420	462	164	378	414	453	702	381	419	460
	Flachst.	44	384	417	459	3	-	-	-	47	384	420	468
	Profile	517	382	416	454	450	387	421	450	986	385	418	453
A_5 /%. /	Bleche	521	280	360	410	164	280	350	390	702	280	360	400
	Flachst.	44	240	360	410	3	-	-	-	47	290	360	410
	Profile	517	283	360	410	451	300	350	400	987	290	350	410
--- St52 ---													
		0 - ≤16 mm				<16 - ≤40 mm				0 - 100 mm			
Material-kennwert	Erzeug-nisform	An-zahl	Fraktile			An-zahl	Fraktile			An-zahl	Fraktile		
			5%	50%	95%		5%	50%	95%		5%	50%	95%
R_{eH} /N/mm ² /	Bleche	116	363	409	450	81	355	392	436	203	362	400	441
	Flachst.	54	357	401	450	2	-	-	-	56	357	400	450
	Profile	85	374	404	448	94	353	389	428	181	355	396	443
R_m /N/mm ² /	Bleche	116	522	570	610	81	530	578	623	203	530	572	621
	Flachst.	54	540	588	620	2	-	-	-	56	540	587	620
	Profile	84	540	571	607	94	540	571	608	180	542	572	610
A_5 /%. /	Bleche	116	230	250	300	81	220	250	310	203	220	250	300
	Flachst.	54	260	300	340	2	-	-	-	56	260	300	340
	Profile	85	250	300	340	94	240	290	330	181	250	300	330

Die obere Streckgrenze R_{eH} ist beim St37 bei den Walzprofilen im Vergleich zu denjenigen der Bleche und Flachstähle signifikant kleiner. Da nach DIN 17 100 bei Walzprofilen der Entnahmeort im Flansch liegen muß, kann die Abhängigkeit auf nicht homogene Verteilungen der Legierungselemente, z.B. durch Seigerungszone im Übergangsbereich Steg/Flansch und unterschiedliche Abkühlge-

schwindigkeiten im Steg, Flansch und Übergangsbereich zurückgeführt werden. /18,26,27/. Diese Abhängigkeit konnte beim St52 nicht nachgewiesen werden, weil durch eine besondere Beruhigung beim St52 (Güteklasse 3 ist vorgeschrieben) Seigerungszone praktisch nicht auftreten.

Eine Untersuchung kann jedoch anhand der Bescheinigungen nicht durchgeführt werden, da Festigkeitskennwerte nur für die Flansche angegeben werden.

Die Bruchdehnung A_5 ist für den St52 bei Blechen im Vergleich zu denjenigen der Flachstähle und Walzprofile signifikant kleiner. Es ist bekannt, daß sie quer zur Walzrichtung niedriger ist /z.B. in 6/. Da Angaben in den Bescheinigungen größtenteils fehlen, wird angenommen, daß die Zugproben bei Blechen quer zur Walzrichtung entnommen werden.

Eine Untersuchung der Abhängigkeit von A_5 von der Walzrichtung wurde nicht durchgeführt.

Für die weiteren Untersuchungen wird nicht nach der Erzeugnisform unterschieden.

2.6.3 Unterteilung der Bescheinigungen

Eine statistische Auswertung der Bescheinigungen ist nur sinnvoll, wenn hinsichtlich eventueller Abhängigkeiten vorher Rechenschaft abgelegt wird.

Deshalb werden die Festigkeitskennwerte getrennt für die Erzeugnisdicken $0 < t \leq 16$ mm, $16 < t \leq 40$ mm und $40 < t \leq 63$ mm entsprechend der Einteilung für die obere Streckgrenze in DIN 17 100 untersucht. Da für größere Erzeugnisdicken $t > 63$ mm nicht genügend Bescheinigungen vorlagen, wird auf eine Untersuchung verzichtet.

Eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Erzeugung wird berücksichtigt. Es wird angenommen, daß sich die Materialkennwerte nach Einführung der überarbeiteten DIN 17 100 im Januar 1980 signifikant verändert haben können. Die Untersuchungen beschränken sich

deshalb auf die Stähle, die nach 1979 geprüft wurden.

Um eine Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Erzeugung zu untersuchen, werden die in der Datenbank aufgenommenen Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn aus dem Jahr 1969 ausgewertet.

Die für die Deutsche Bundesbahn verarbeiteten Stähle werden von ihr zusätzlich geprüft. Deshalb kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich die Verteilungsfunktionen der Materialkennwerte dieser Stähle signifikant von denjenigen aus den Betrieben unterscheiden. Im Bild 2.5 sind beispielhaft die Verteilungsfunktionen der Stichprobenfunktion nach Gl. 2.1 für die obere Streckgrenze, die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung für nach 1979 geprüfte Stähle aus St37 dargestellt.

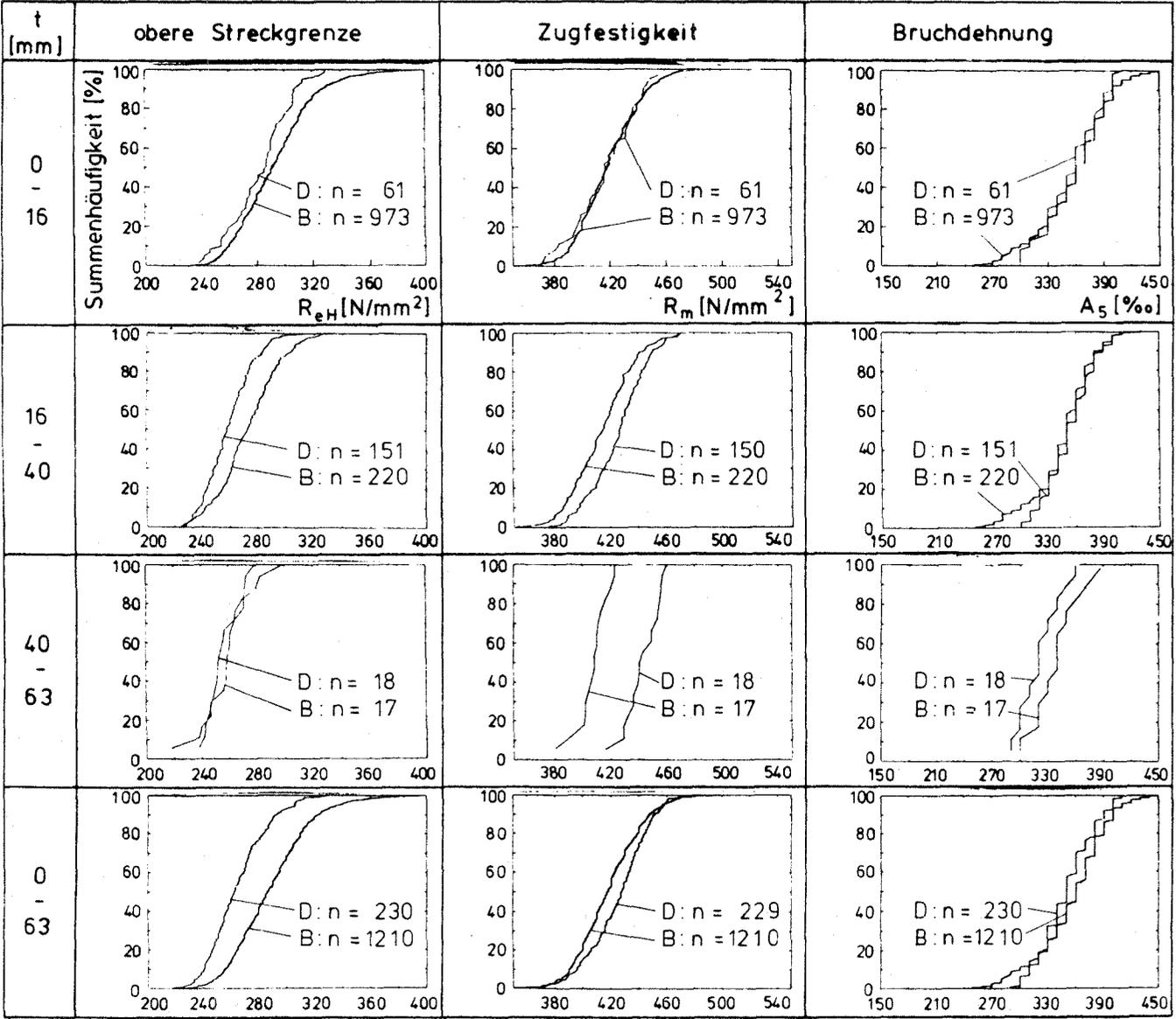
Es ist auffällig, daß der Anteil der Erzeugnisse mit Dicken $16 < t \leq 40$ mm bei der Deutschen Bundesbahn mit ca. 65% im Verhältnis zu allen Erzeugnissen wesentlich größer ist als bei den Betrieben (ca. 20%). Da ein Einfluß der Erzeugnisdicke auf R_{eH} vorhanden ist (s. Abschnitt 2.6.4), unterscheiden sich die Verteilungsfunktionen bei der Auswertung ohne Berücksichtigung der Erzeugnisdicke t stark (Bild 2.5, unten links).

Allgemein kann festgestellt werden, daß die Verteilungsfunktionen von R_{eH} der Deutschen Bundesbahn oberhalb derjenigen der Betriebe liegen, d.h. die charakteristischen Werte (z.B. in Form der Fraktilwerte) sind bei Stählen der Deutschen Bundesbahn niedriger.

Der K/S/O-Test nach Gl. 2.10 und 2.11 ergab für den Vergleich der beiden Verteilungsfunktionen in den meisten Fällen, daß die Verteilungen nicht aus einer Grundgesamtheit stammen.

Eine Trennung der Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn und der Betriebe ist somit notwendig.

Bild 2.5. Vergleich der Stichprobenfunktionen für nach 1979
 hergestellte Stähle aus St37
 D Deutsche Bundesbahn; B Betriebe



Die nachfolgenden Auswertungen werden mit folgenden Nebenbedingungen durchgeführt:

- Auswertung getrennt für St37 und St52
- Auswertung getrennt für Erzeugnisdicken $0 < t \leq 16$ mm, $16 < t \leq 40$ mm und $40 < t \leq 63$ mm und zusätzlich $0 < t \leq 63$ mm
- je Schmelze eine Bescheinigung
- keine Unterscheidung nach der Erzeugnisform

Ausgewertet werden:

1. Bescheinigungen ohne Berücksichtigung des Prüfdatums und der Herkunft
2. Bescheinigungen aus den Betrieben, wobei die Stähle nach 1979 geprüft wurden
3. Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn, wobei die Stähle nach 1979 geprüft wurden
4. Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn, wobei die Stähle im Jahr 1969 geprüft wurden

2.6.4 Auswertung der Festigkeitskennwerte

2.6.4.1 Allgemeines

Ein Überblick über die Festigkeitskennwerte wird in diesem allgemeinen Teil vorerst mit der Auswertung der Bescheinigungen ohne Berücksichtigung des Prüfdatums und der Herkunft gegeben. Zahlenmäßige Ergebnisse - z.B. Parameter der Verteilungsfunktionen - werden an dieser Stelle noch nicht aufgeführt.

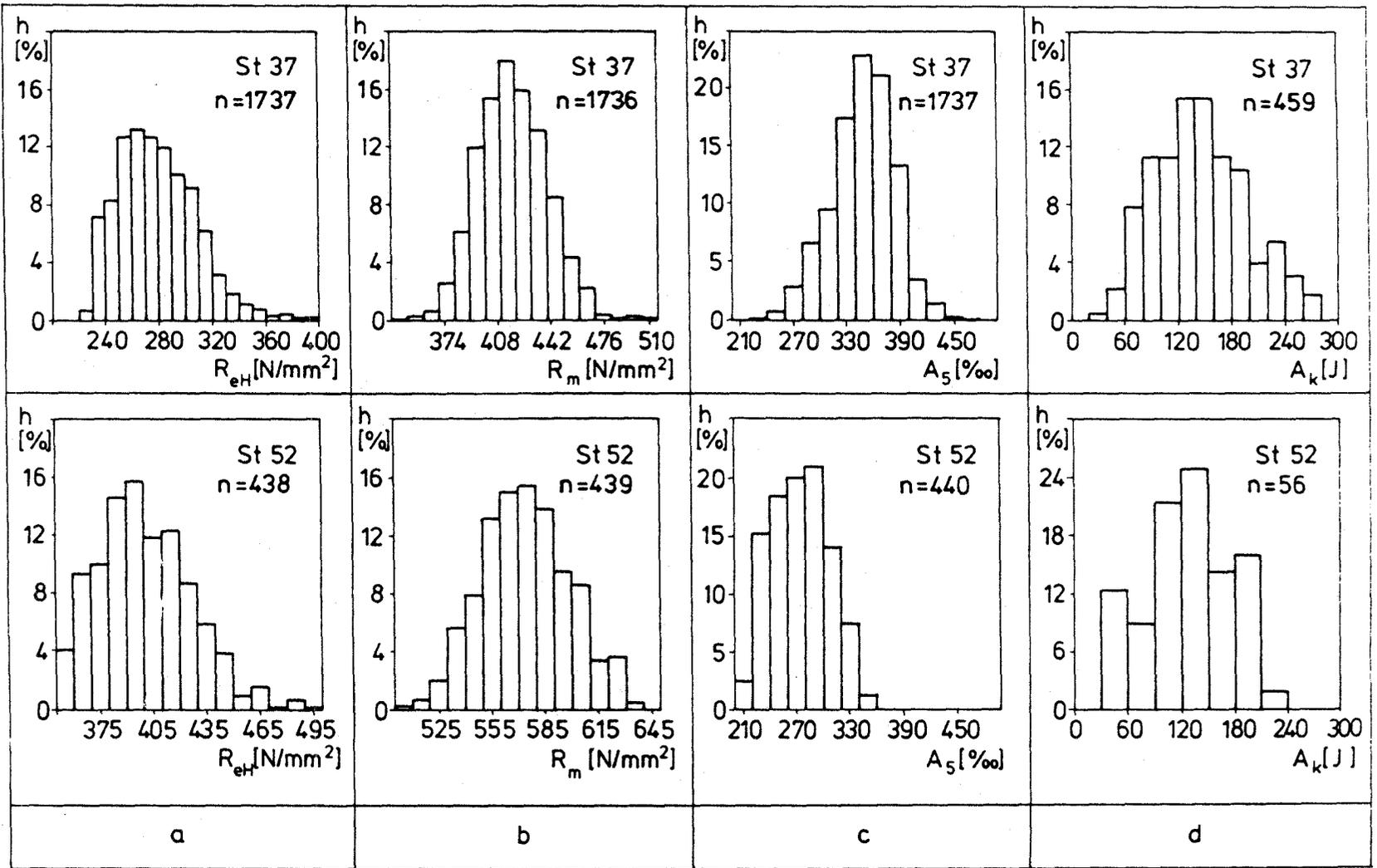
Im Bild 2.6 sind die Histogramme für die obere Streckgrenze R_{eH} , die Zugfestigkeit R_m , die Bruchdehnung A_5 und die Kerbschlagarbeit A_k getrennt für die Stähle St37 und St52 angegeben. Die unterschiedlichen Stichprobenumfänge sind darauf zurückzuführen, daß die Ergebnisse in den Bescheinigungen nicht angegeben oder nicht lesbar waren.

Die Histogramme lassen bei R_{eH} vermuten, daß Erzeugnisse durch eine Gütekontrolle zurückgewiesen wurden, weil die Histogramme anscheinend links abgeschnitten sind. Da die Mindestwerte für R_{eH} für verschiedene Erzeugnisdicken unterschiedlich sind, ist es sinnvoll, die Filter nach Gl. 2.4 - 2.6 getrennt für die verschiedenen Erzeugnisdicken zu bestimmen.

Bei R_m und A_5 kann dagegen nicht festgestellt werden, ob Erzeugnisse durch die Gütekontrolle zurückgewiesen wurden, obwohl durch Rückweisung infolge zu niedriger oberer Streckgrenzen ein Einfluß vorhanden sein muß. Dieser Einfluß ist gering, weil die Korrelation zwischen R_{eH} und R_m klein ist, d.h. aus einer kleinen oberen Streckgrenze muß nicht unbedingt eine kleine Zugfestigkeit folgen. Auf die Korrelation wird im Abschnitt 2.7 eingegangen.

Die Bruchdehnung ist beim St52 im Vergleich zum St37 kleiner, d.h. mit zunehmender Festigkeit nimmt die Bruchdehnung ab.

Bild 2.6. Histogramme für die Festigkeitskennwerte ohne Berücksichtigung von Prüfdatum, Herkunft und Erzeugnisdicke; a R_{eH} ; b R_m ; c A_5 ; d A_k



Die Werte von A_k , die weit über dem Mindestwert von 27 J liegen, zeigen, daß die Allgemeinen Baustähle die geforderte Zähigkeit bei vorgeschriebenen Prüftemperaturen bis zu $-20\text{ }^\circ\text{C}$ weit überschreiten.

In der Literatur wird speziell für R_{eH} eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke t angegeben /6,8,9,24/. Auf die metallurgischen Hintergründe wird im Abschnitt 2.8 eingegangen.

Im Bild 2.7 sind exemplarisch die Einzelwerte für R_{eH} über der Erzeugnisdicke t aufgetragen, wobei nicht nach Herstelldatum, Herkunft und Erzeugnisdicke unterschieden wurde. Im rechten Teil des Bildes sind die 5, 50 und 95%-Fraktilen entsprechend den Festlegungen von DIN 17 100 getrennt für $0 < t \leq 16$, $16 < t \leq 40$ und $40 < t \leq 63$ mm aufgetragen. Die gestrichelten Linien sind die Fraktilwerte für $0 < t \leq 63$ mm. Man erkennt eine deutliche Abhängigkeit von R_{eH} von der Erzeugnisdicke.

Die entsprechenden Histogramme für R_{eH} , R_m und A_5 sind dazu im Bild 2.8 aufgetragen. Da für A_k wenig Meßwerte vorlagen und die

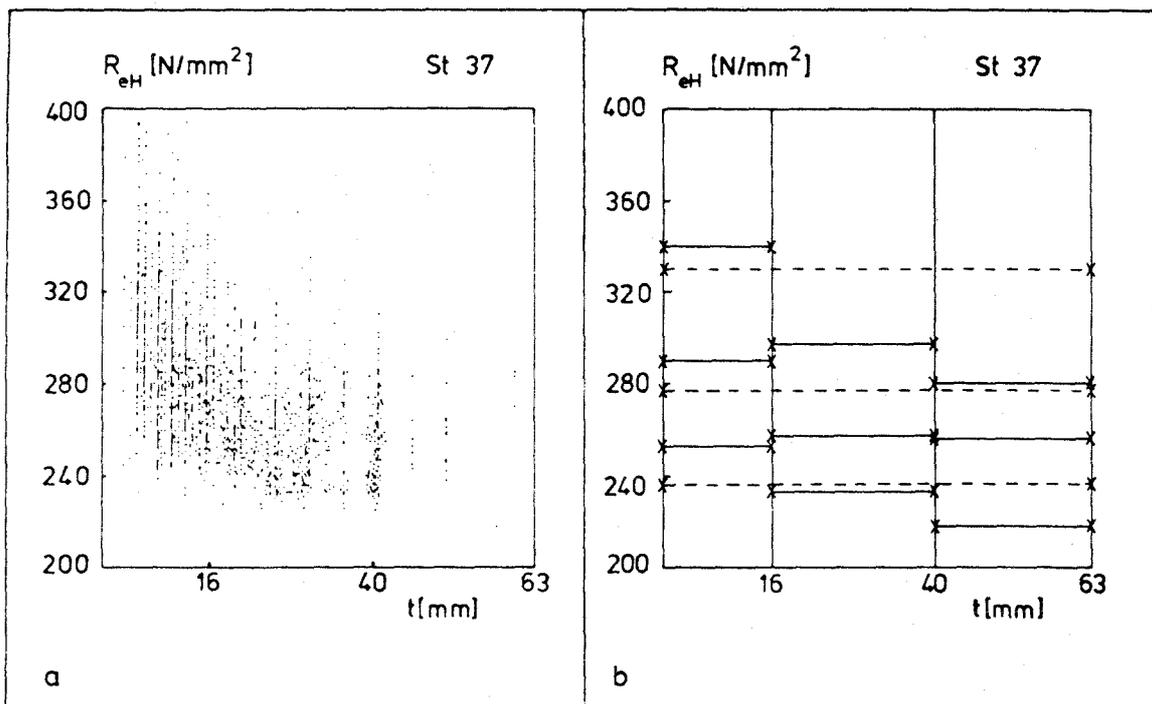


Bild 2.7. Einfluß der Erzeugnisdicke t auf R_{eH} ; a Einzelwerte; b 5, 50 und 95%-Fraktile

Ergebnisse weit über den zulässigen Werten liegen, wurde auf eine Darstellung von A_k für verschiedene Erzeugnisdicken verzichtet. Auch hier ist die Tendenz, daß R_{eH} mit der Erzeugnisdicke abnimmt, deutlich zu erkennen.

Im Bild 2.8 ist für $0 < t \leq 16$ mm ein Filter aus den Histogrammen praktisch nicht zu erkennen, da R_{eH} i. allg. viel größer als der zulässige Wert ist. Für $16 < t \leq 40$ mm wird dagegen ein stark ausgeprägter Filter deutlich, d.h. der Mittelwert von R_{eH} aller geprüften Erzeugnisse liegt bei gleicher Streuung wie für $0 < t \leq 16$ mm niedriger, bzw. sehr viele Erzeugnisse haben Streckgrenzen unterhalb der Mindestwerte und mußten deshalb zurückgewiesen werden. Für Erzeugnisdicken $t > 40$ mm kann keine Aussage gemacht werden, da nicht genügend Bescheinigungen in der Datenbank vorlagen.

Für R_m und A_5 kann keine Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke festgestellt werden.

2.6.4.2 Zu den Tabellen

Die nachfolgenden Auswertungen werden in Tabellenform angegeben. Die Parameter der Verteilungsfunktionen werden nach Abschnitt 2.5.1 berechnet. Sie werden zur Vereinfachung mit θ_1 bis θ_4 bezeichnet:

Stichprobenfunktion (SFK) nach Gl. 2.1

θ_1 = kleinster Wert, θ_2 = größter Wert

Normalverteilung (NV) nach Gl. 2.2

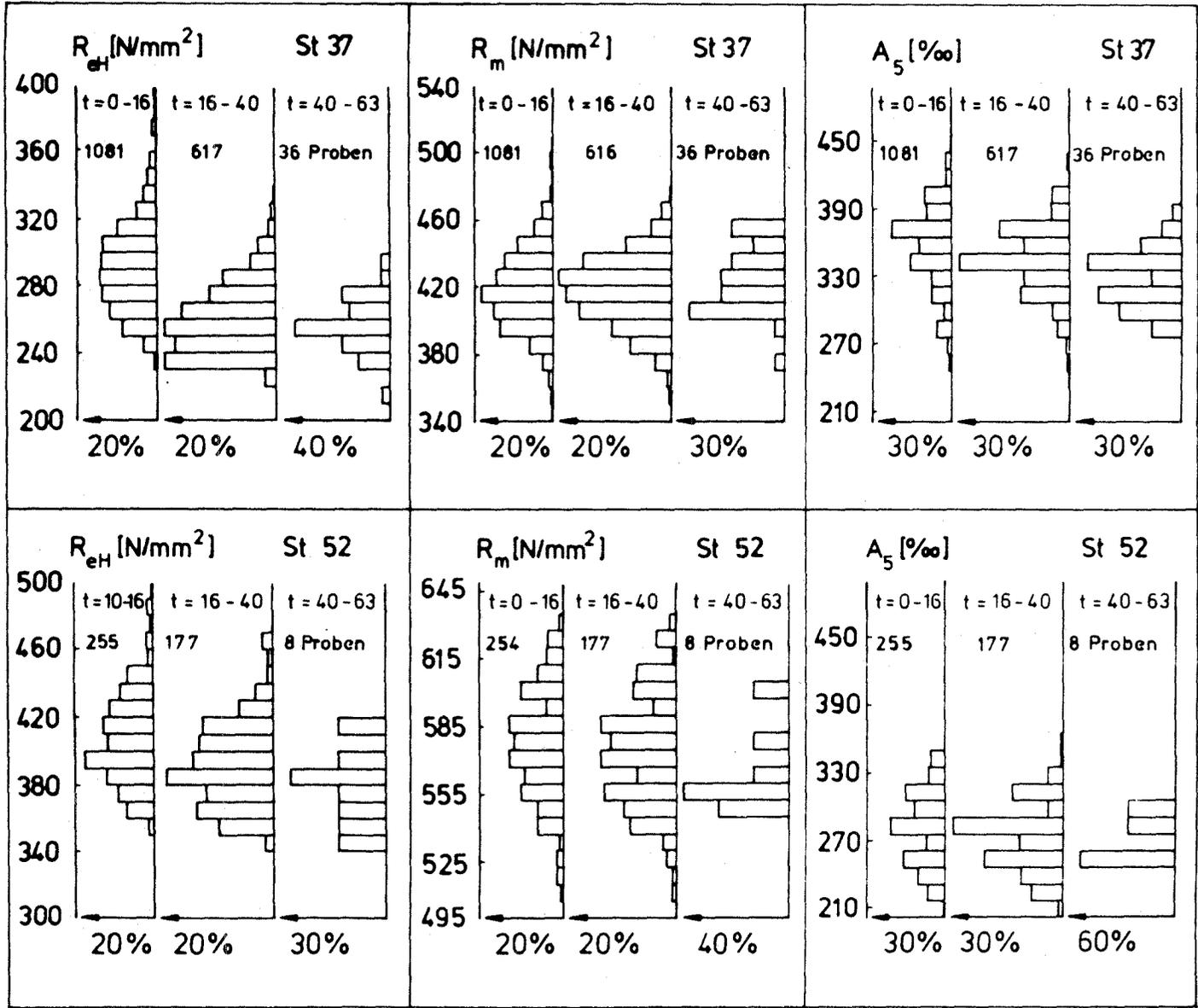
θ_1 = Mittelwert μ , θ_2 = Standardabweichung σ

Lognormalverteilung (LNV) nach Gl. 2.3

θ_1 = Mittelwert μ , θ_2 = Standardabweichung σ ,

θ_3 = Lageparameter x_0

Bild 2.8. Histogramme für R_{eH} , R_m und A_5 in Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke ohne Berücksichtigung von Prüfdatum und Herkunft



Normalverteilte Grundgesamtheit mit normalverteilter
 Filterfunktion (NVF) nach Gl. 2.6

θ_1 = Mittelwert μ_1 , θ_2 = Standardabweichung σ_1 (Gesamtheit)
 θ_3 = Mittelwert μ_2 , θ_4 = Standardabweichung σ_2 (Filter)
 k = Normierungskonstante

Die Verteilungsfunktionen werden mit Hilfe des K/S-Tests nach Abschnitt 2.5.2 mit der Stichprobenfunktion verglichen. In den Tabellen ist die Testgröße D nach Gl. 2.7 angegeben. Der kritische Wert D_a nach Gl. 2.8 wird nicht mit angegeben, weil er ausschließlich vom Stichprobenumfang abhängt und leicht zu berechnen ist. Allgemein ist die Anpassung umso besser, je kleiner D ist.

In den letzten 3 Spalten werden die 5, 50 und 95%-Fraktilen angegeben (s. Abschnitt 2.5.3). Die Fraktilen der Stichprobenfunktion werden hierbei durch Abzählen der geordneten Stichprobe ermittelt.

2.6.4.3 Obere Streckgrenze R_{eH}

Die Auswertung der Ergebnisse der oberen Streckgrenze ist in Tabelle 2.5 zusammengestellt.

Es kann festgestellt werden, daß die 5%-Fraktilen der Stichprobenfunktion die Mindestwerte nach DIN 17 100 erfüllen.

Die 5%-Fraktile liegt für $0 < t \leq 16$ mm im Vergleich zu $16 < t \leq 40$ mm bis zu 20 N/mm^2 höher.

Der Parameter μ_2 der Filterfunktionen (θ_3 in der Tabelle) liegt oberhalb der Mindestwerte nach DIN 17 100, wobei σ_2 (θ_4 in der Tabelle) mit Standardabweichungen unter 10 N/mm^2 sehr gut ist, d.h. die Filterfunktionen sind praktisch Sprungfunktionen nach Gl. 2.4, und Stähle, deren obere Streckgrenze unterhalb der Filter liegt, werden praktisch immer zurückgewiesen.

Bei der Auswertung der Deutschen Bundesbahn aus dem Jahr 1969 trifft die Deutung für diese Dichtefunktion für den St37 nicht

zu, weil der Mittelwert der Gesamtheit (θ_1) kleiner als der Filter (θ_3) ist. Die Normierungskonstante k wird klein, d.h. ein großer Anteil der geprüften Stähle wurde der Rechnung zufolge zurückgewiesen. Durch die Berechnung nach der Maximum-Likelihood-Methode können diese Ergebnisse auftreten, wenn eine andere Form der Funktion rechnerisch "wahrscheinlicher" ist.

Wird die Normalverteilung als Maßstab herangezogen, kann festgestellt werden, daß sowohl die Standardabweichung als auch die Mittelwerte mit größer werdender Erzeugnisdicke abnehmen.

Der Vergleich Deutsche Bundesbahn - Betriebe ist bereits im Abschnitt 2.6.4.1 gemacht worden. Die zahlenmäßige Auswertung bestätigt die Feststellung, daß sich die Ergebnisse signifikant unterscheiden und daß die Fraktile bei der Deutschen Bundesbahn etwas unterhalb derjenigen der Betriebe liegen.

Der Vergleich der Ergebnisse der Deutschen Bundesbahn für nach 1979 und für 1969 geprüfte Stähle zeigt nur geringe Unterschiede. Die nach 1979 geprüften Stähle haben etwas höhere Fraktilwerte (bis ca. 10 N/mm^2) als die 1969 geprüften.

Im allgemeinen paßt sich die Normalverteilung mit Filter nach Gl. 2.6 der Stichprobenfunktion am besten an. Die Normalverteilung nach Gl. 2.1 hat durch die nicht berücksichtigten Filter den Nachteil, daß speziell kleine Fraktilwerte (z.B. 1 oder 5%-Fraktile) zu klein geschätzt werden können. Der Normalverteilung ist deshalb die Lognormalverteilung vorzuziehen.

Tabelle 2.5. Auswertung der Ergebnisse der oberen Streckgrenze
/N/mm²/ für den St52 (Fortsetzung)

	An- zahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter				K/S- Test- gr.	Fraktile		
				θ_1	θ_2	θ_3	θ_4		5%	50%	95%
alle Bescheinigungen	440	0-63	SFK	349	495				360	400	446
			NV	402.2	26.6			0.072	359	402	446
			LNV	4.42	0.310	314.7		0.035	369	398	456
			NVF	398.9	28.6	350.7	1.1	0.050	361	401	448
			k =	0.95							
255	0-16	SFK	357	495				370	406	450	
		NV	408.7	26.4			0.088	365	409	452	
		LNV	4.65	0.248	300.9		0.043	370	405	458	
		NVF	405.8	29.1	356.4	0.5	0.065	368	409	454	
			k =	0.96							
177	16-40	SFK	49	464				353	390	431	
		NV	393.4	24.3			0.064	353	393	434	
		LNV	4.50	0.265	300.1		0.045	358	390	439	
		NVF	388.9	28.1	349.3	1.9	0.035	357	392	436	
			k =	0.92							
8	40-63	SFK	349	417				-	378	-	
		NV	377.9	21.7			0.056	342	378	413	
		LNV	4.14	0.34	311.5		0.102	347	374	421	
nur Betriebe, nach 1979 geprüfte Stähle	55	0-63	SFK	355	495				364	417	463
			NV	415.5	26.7			0.103	372	416	459
			LNV	5.38	0.13	197.1		0.081	371	414	466
			NVF	413.7	30.6	353.5	0.5	0.738	369	415	464
			k =	0.98							
30	0-16	SFK	373	495				373	421	464	
		NV	420.5	28.6			0.081	374	421	468	
		LNV	5.40	0.29	197.7		0.077	377	419	470	
			NVF	412.5	34.7	371.9	0.4	0.099	379	418	472
			k =	0.88							
23	16-40	SFK	355	463				355	405	447	
		NV	410.3	28.2			0.112	364	410	457	
		LNV	5.33	0.14	201.0		0.097	361	408	461	
			NVF	407.6	30.8	353.1	0.6	0.093	366	409	459
			k =	0.96							
nur Deutsche Bundesbahn, nach 1979 geprüfte Stähle	75	0-63	SFK	353	490				355	415	464
			NV	407.3	31.4			0.063	356	407	459
			LNV	5.34	0.15	196.7		0.047	360	405	462
			NVF	400.2	37.1	352.1	0.4	0.060	361	405	463
			k =	0.90							
42	0-16	SFK	373	490				374	413	464	
		NV	414.8	30.1			0.093	365	415	464	
		LNV	5.37	0.13	197.8		0.079	370	413	462	
			NVF	388.4	45.0	372.4	0.5	0.041	376	410	463
			k =	0.64							
32	16-40	SFK	355	464				355	403	440	
		NV	399.1	29.7			0.118	350	399	448	
		LNV	5.23	0.15	197.6		0.118	354	397	452	
			NVF	383.1	40.1	353.0	0.5	0.127	358	395	454
			k =	0.77							
nur Deutsche Bundesbahn, 1969 geprüfte Stähle	192	0-63	SFK	352	463				363	400	444
			NV	400.1	24.4			0.111	360	400	440
			LNV	5.30	0.12	198.2		0.085	363	399	442
			NVF	394.0	29.1	358.2	5.0	0.081	364	398	444
			k =	0.89							
145	0-16	SFK	360	463				364	400	444	
		NV	403.7	25.1			0.117	362	404	445	
		LNV	5.32	0.12	198.2		0.100	366	403	448	
			NVF	398.2	29.6	359.5	0.2	0.085	366	402	449
			k =	0.91							
47	16-40	SFK	352	420				358	390	420	
		NV	389.0	17.8			0.112	360	389	418	
		LNV	5.25	0.09	198.3		0.112	361	388	420	
			NVF	388.0	18.8	349.8	3.0	0.105	360	389	420
			k =	0.98							

2.6.4.4 Zugfestigkeit R_m

Die Auswertung der Ergebnisse ist in Tabelle 2.6 zusammengestellt.

Die Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke t ist nur gering. Es ist lediglich ein leichter Abfall der Zugfestigkeit von der Erzeugnisdicke festzustellen.

Die Grenzwerte nach DIN 17 100 (s. Tabelle 2.3) werden in fast allen Fällen eingehalten; bei der Auswertung der Bescheinigungen der Betriebe sind beim St37 zwei Werte oberhalb des Höchstwertes. Die Unterschiede zwischen den Verteilungsfunktionen Deutsche Bundesbahn und Betriebe sind gering; die Fraktilwerte liegen jedoch bei den Bescheinigungen der Betriebe im Gegensatz zu R_{eH} etwas niedriger.

Der Vergleich der Summenhäufigkeitskurven der Ergebnisse der Deutschen Bundesbahn zwischen nach 1979 und 1969 geprüften Stählen ergab nach dem K/S/O-Test nur beim St37 für $16 < t \leq 40$ mm einen signifikanten Unterschied, wobei für die 1969 geprüften Stähle geringere Fraktilwerte festgestellt wurden.

Da aus den Histogrammen keine ausgeprägten Filter ersichtlich sind, wird für die normalverteilte Gesamtheit mit Filter nach Gl. 2.6 die Dichtefunktion nicht angegeben.

Allgemein paßt sich hier die Normalverteilung der Stichprobenfunktion besser als die Lognormalverteilung an.

St37

St52

	An- zahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile			An- zahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
				θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%				θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
alle Bescheinigungen	1733	0-63	SFK NV LNV	349 418.9 4.51	504 21.9 0.248	325.2	0.031 0.026	384 383 386	419 419 416	456 455 461	439	0-63	SFK NV LNV	509 575.7 4.68	634 24.3 0.238	464.8	0.032 0.032	540 536 538	575 576 573	619 616 624
	1081	0-16	SFK NV LNV	349 419.1 4.65	504 22.7 0.224	312.1	0.033 0.023	385 382 384	418 419 417	456 456 463	254	0-16	SFK NV LNV	509 577.1 4.72	633 24.5 0.233	462.1	0.047 0.037	532 537 538	575 577 574	619 617 627
	616	16-40	SFK NV LNV	352 418.2 4.45	471 20.5 0.250	329.3	0.016 0.043	384 385 386	419 418 415	451 452 459	177	16-40	SFK NV LNV	514 574.2 4.59	634 24.5 0.257	472.3	0.047 0.030	536 534 537	573 574 571	611 614 623
	36	40-63	SFK NV LNV	380 423.9 4.61	460 19.9 0.20	321.3	0.085 0.058	380 391 394	422 424 422	456 457 461	8	40-63	SFK NV LNV	546 563.4 4.26	601 17.3 0.216	490.6	0.202 0.171	- 535 541	563 563 562	- 592 592
Betriebe, nach geprüfte Stähle	1210	0-63	SFK NV LNV	352 418.9 5.23	504 22.7 0.121	233.4	0.049 0.064	383 381 385	417 419 419	456 456 460	55	0-63	SFK NV LNV	523 575.5 4.88	623 19.8 0.154	442.6	0.028 0.041	536 543 545	576 576 574	609 608 612
	973	0-16	SFK NV LNV	355 419.3 5.14	504 22.5 0.133	225.3	0.086 0.086	385 382 387	418 419 421	457 457 463	30	0-16	SFK NV LNV	543 575.4 4.865	615 17.6 0.135	444.5	0.026 0.025	543 546 548	576 575 574	602 604 607
	220	16-40	SFK NV LNV	352 414.5 5.12	471 22.5 0.135	249.0	0.032 0.067	379 378 383	415 415 416	453 452 458	23	16-40	SFK NV LNV	523 575.8 4.87	623 21.7 0.135	358.6	0.102 0.100	523 540 542	572 576 574	602 612 613
	17	40-63	SFK NV LNV	380 407.5 4.93	423 10.6 0.08	271.7	0.122 0.150	- 390 393	408 408 410	- 425 429										
Deutsche Bundesbahn, nach 1979 geprüfte Stähle	229	0-63	SFK NV LNV	371 425.2 5.22	470 21.4 0.119	242.5	0.034 0.064	387 390 395	427 425 427	457 460 467	75	0-63	SFK NV LNV	530 572.6 4.84	628 21.1 0.162	444.1	0.055 0.050	543 538 541	571 573 571	610 607 610
	61	0-16	SFK NV LNV	371 417.5 5.22	458 22.8 0.126	234.4	0.069 0.072	373 380 385	417 418 419	448 455 462	42	0-16	SFK NV LNV	540 575.7 4.86	623 20.7 0.159	445.2	0.070 0.050	547 542 544	572 576 574	607 610 613
	150	16-40	SFK NV LNV	375 426.1 5.13	470 20.2 0.121	258.3	0.023 0.047	389 393 396	427 426 427	459 459 465	32	16-40	SFK NV LNV	530 569.3 4.84	610 21.0 0.164	441.0	0.071 0.079	530 535 538	571 569 568	608 604 607
	18	40-63	SFK NV LNV	416 442.9 4.54	460 11.7 0.13	348.8	0.098 0.094	- 424 425	440 443 442	- 462 463										
Deutsche Bundesbahn, 1969 geprüfte Stähle	299	0-63	SFK NV LNV	375 417.2 4.90	458 17.1 0.128	284.6	0.028 0.069	384 389 393	419 417 416	444 445 450	192	0-63	SFK NV LNV	520 579.0 5.39	633 26.6 0.124	363.3	0.070 0.106	532 535 542	580 579 582	620 623 631
	44	0-16	SFK NV LNV	377 417.3 5.00	554 17.7 0.120	270.8	0.035 0.077	370 388 393	416 417 419	440 446 452	145	0-16	SFK NV LNV	520 577.4 5.42	633 27.3 0.123	355.0	0.087 0.106	530 533 539	580 577 580	620 622 631
	251	16-40	SFK NV LNV	375 417.3 4.92	458 17.1 0.126	282.6	0.034 0.088	384 389 394	417 417 420	444 445 451	47	16-40	SFK NV LNV	540 583.3 4.37	628 23.6 0.326	501.0	0.072 0.098	540 544 547	584 583 580	610 622 636
	4	40-63	SFK NV LNV	405 415.5 4.57	462 7.4 0.08	320.8	0.197 0.174	- 403 406	412 415 417	- 428 431										

Tabelle 2.6. Auswertung der Ergebnisse der Zugfestigkeit /N/mm²/ für den St37 und St52

2.6.4.5 Bruchdehnung A_5

In Tabelle 2.7 ist die Auswertung der Ergebnisse der Bruchdehnung zusammengestellt.

Alle Mindestwerte nach DIN 17 100 (s. Tabelle 2.3) wurden eingehalten.

Da beim St52 für $40 < t \leq 63$ mm nicht genügend Werte zur Verfügung standen, wurde auf eine Auswertung verzichtet.

Erwartungsgemäß sind alle Fraktilwerte beim St52 im Vergleich zum St37 um ca. 50 bis 100% kleiner.

Weiterhin nimmt die Bruchdehnung bei größeren Erzeugnisdicken ab.

Die Fraktilwerte sind bei allen Auswertungen jeweils für eine Erzeugnisdicke nahezu gleich. Der K/S-Test nach Abschnitt 2.5.2 bestätigt diese Annahme, sodaß davon ausgegangen werden kann, daß die Werte im Vergleich Deutsche Bundesbahn und Betriebe, sowie Deutsche Bundesbahn für nach 1979 und 1969 geprüfte Stähle sich nicht signifikant unterscheiden.

I. allg. paßt sich die Lognormalverteilung der Sichprobenfunktion am besten an. Da jedoch der Lageparameter x_0 (θ_3 in der Tabelle) relativ klein ist und die Lognormalverteilung bei kleinem x_0 sich der Normalverteilung annähert, liegt zwischen beiden Verteilungen kein großer Unterschied vor.

2.6.4.6 Kerbschlagarbeit A_k

Die Ergebnisse der Auswertung der Kerbschlagarbeiten sind in Tabelle 2.8 ausschließlich für die Bescheinigungen der Betriebe für nach 1979 geprüfte Stähle zusammengestellt. Da von der Deutschen Bundesbahn und für $40 < t \leq 63$ mm beim St52 nicht genügend Ergebnisse vorlagen, wurde auf eine Auswertung verzichtet.

St37											St52										
	An- zahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile			An- zahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile			
				θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%				θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%	
alle Bescheinigungen	1734	0-63	SFK	240	480		289	360	410	440	0-63	SFK	210	360		0.080	230	280	330		
			NV	353.1	35.8		294	353	412			NV	279.0	31.7			227	279	331		
			LNV	5.28	0.193	151.9	0.067	296	350			423	LNV	4.69	0.304		165.0	0.069	231	274	345
	1081	0-16	SFK	240	480		284	360	410	255	0-16	SFK	210	350		0.090	230	290	340		
NV			357.6	38.2		295	358	420	NV			283.0	32.9		229		283	337			
LNV			5.32	0.202	148.3	0.084	296	354	434			LNV	4.77	0.295	161.0		0.079	233	278	353	
617	16-40	SFK	240	430		300	350	390	177	16-40	SFK	210	360		0.088	230	270	320			
		NV	346.8	29.9		298	347	396			NV	274.0	30.4			224	274	323			
		LNV	5.17	0.183	168.1	0.069	296	344			409	LNV	4.64	0.300		166.0	0.062	229	269	335	
36	40-63	SFK	290	390		290	330	410	8	40-63	SFK	250	300		0.196	-	270	-			
		NV	329.7	26.2		287	330	373			NV	271.0	22.0			235	271	308			
		LNV	4.84	0.203	200.3	0.130	291	327			377	LNV	3.90	0.385		214.0	0.144	242	267	314	
nur Betriebe, nach 1979 geprüfte Stähle	1210	0-63	SFK	240	450		281	360	410	55	0-63	SFK	230	340		0.107	240	280	320		
			NV	355.5	37.9		293	356	418			NV	280.4	23.8			241	280	320		
			LNV	5.61	0.145	80.9	0.073	296	355			427	LNV	4.87	0.184		147.3	0.081	244	278	324
	973	0-16	SFK	240	450		281	360	410	30	0-16	SFK	240	340		0.142	240	290	320		
NV			357.4	38.9		293	357	421	NV			280.9	21.9		245		281	317			
LNV			5.62	0.148	79.6	0.072	296	355	431			LNV	4.89	0.166	154.4		0.126	256	288	330	
220	16-40	SFK	250	430		280	350	400	23	16-40	SFK	230	320		0.187	230	270	280			
		NV	348.5	33.0		294	349	403			NV	267.3	20.6			233	267	301			
		LNV	5.30	0.179	145.9	0.121	295	346			414	LNV	4.76	0.176		149.2	0.164	236	265	304	
17	40-63	SFK	300	390		-	340	-													
		NV	340.0	24.5		300	340	380													
		LNV	5.24	0.129	150.0	0.050	302	338	383												
nur Deutsche Bundesbahn, nach 1979 geprüfte Stähle	230	0-63	SFK	290	430		300	350	400	75	0-63	SFK	240	350		0.110	250	300	340		
			NV	350.3	28.7		303	350	398			NV	302.1	27.9			256	302	348		
			LNV	5.30	0.144	148.9	0.075	306	348			402	LNV	5.29	0.147		103.0	0.129	258	301	355
	61	0-16	SFK	300	410		300	360	400	42	0-16	SFK	250	350		0.130	250	310	340		
NV			355.7	30.5		306	356	406	NV			306.7	27.3		262		307	352			
LNV			5.32	0.152	147.9	0.080	308	353	412			LNV	5.30	0.148	104.3		0.137	264	306	358	
151	16-40	SFK	300	430		310	350	400	32	16-40	SFK	240	340		0.121	240	300	330			
		NV	351.5	26.7		308	352	395			NV	296.3	28.03			250	296	342			
		LNV	5.30	0.132	149.1	0.077	311	350			399	LNV	5.24	0.154		105.8	0.126	253	295	350	
18	40-63	SFK	290	360		-	320	-													
		NV	321.7	21.4		287	322	357													
		LNV	5.14	0.124	150.0	0.050	289	320	359												
nur Deutsche Bundesbahn, 1969 geprüfte Stähle	299	0-63	SFK	280	420		300	350	400	192	0-63	SFK	210	350		0.139	230	260	320		
			NV	345.0	27.3		300	345	390			NV	268.2	32.1			215	268	321		
			LNV	4.84	0.218	216.0	0.088	304	343			397	LNV	5.11	0.185		99.3	0.121	222	265	324
	44	0-16	SFK	320	420		322	360	420	142	0-16	SFK	220	350		0.105	230	270	330		
NV			362.1	23.1		324	362	400	NV			273.6	32.5		220		274	327			
LNV			4.96	0.160	218.0	0.087	328	361	403			LNV	5.14	0.184	99.3		0.112	226	271	331	
251	16-40	SFK	280	420		290	340	390	47	16-40	SFK	210	320		0.224	210	250	290			
		NV	342.7	26.5		299	343	386			NV	251.7	24.2			212	252	291			
		LNV	4.82	0.215	216.0	0.087	303	340			393	LNV	5.01	0.152		100.3	0.194	217	250	292	
4	40-63	SFK	290	310		-	290	-													
		NV	300.0	7.1		288	300	412													
		LNV	4.44	0.084	215.0	0.250	289	300	313												

Tabelle 2.7. Auswertung der Ergebnisse der Bruchdehnung
/‰ / für den St37 und St52

Die Mindestwerte von 27 J nach DIN 17 100 wurden bis auf das Ergebnis eines Versuches eingehalten.

Die Fraktilewerte liegen beim St37 etwas höher als beim St52. Eine Abhängigkeit von A_k von der Erzeugnisdicke kann nicht festgestellt werden.

I. allg. paßt sich die Normalverteilung besser als die Lognormalverteilung der Stichprobenfunktion an.

Tabelle 2.8. Auswertung der Ergebnisse der Kerbschlagarbeit /J/ für den St37 und St52; nur nach 1979 geprüfte Stähle aus den Bescheinigungen der Betriebe

--- St37 ---									
Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
432	0-63	SFK	26	270			66	140	235
		NV	141.2	49.0		0.032	61	141	222
		LNV	4.875	0.383	1.1	0.056	71	132	247
305	0-16	SFK	26	270			64	135	239
		NV	139.7	51.0		0.050	56	140	224
		LNV	4.853	0.399	1.7	0.050	68	130	249
110	16-40	SFK	55	242			76	146	218
		NV	148.6	40.3		0.071	82	149	215
		LNV	4.940	0.307	2.7	0.128	87	143	243
17	40-63	SFK	32	235			-	101	-
		NV	121.2	40.3		0.154	32	121	211
		LNV	4.679	0.476	1.5	0.112	51	109	237
--- St52 ---									
54	0-63	SFK	42	221			48	130	192
		NV	127.6	49.4		0.073	51	128	203
		LNV	4.784	0.431	2.4	0.130	59	118	237
30	0-16	SFK	42	221			42	132	192
		NV	127.8	45.8		0.090	53	128	204
		LNV	4.753	0.417	2.4	0.125	61	118	233
22	16-40	SFK	48	221			48	130	188
		NV	130.8	40.8		0.105	54	131	208
		LNV	4.776	0.439	1.9	0.161	60	121	246

2.6.5 Auswertung der Ergebnisse der chemischen Analyse

In den Bescheinigungen werden größtenteils Schmelzanalysen ausgewiesen. Deshalb werden die Auswertungen nicht getrennt für verschiedene Erzeugnisdicken durchgeführt. Im Bild 2.9 sind die Ergebnisse in Form von Histogrammen aufgetragen, wobei nicht nach Herkunft und Prüfdatum unterschieden wurde. Es kann festgestellt werden, daß die Grenzwerte nach DIN 17 100 nur in wenigen Fällen beim Stickstoffgehalt überschritten werden.

In Tabelle 2.9 sind die Parameter der Verteilungsfunktionen zusammengestellt. Um die Zahlenrechnung zu vereinfachen, wurden für C, Si und Mn die Werte, die sämtlich in % angegeben werden, mit 100, für P und S mit 1000 und für N mit 10000 multipliziert und die Parameter berechnet. Um die Dichtefunktionen zu berechnen, müssen die Eingangsparameter entsprechend umgerechnet werden.

Die Werte von C, Mn und Si sind beim St52 im Vergleich zum St37 signifikant größer, wobei speziell Mn und Si zur Festigkeitssteigerung und als Desoxidationsmittel beigegeben werden.

Ein Vergleich der Ergebnisse Betriebe und Deutsche Bundesbahn für nach 1979 geprüfte Stähle ergab keine signifikanten Unterschiede. Der Vergleich nach 1979 und 1969 geprüfte Stähle der Deutschen Bundesbahn ergab ebenfalls keine signifikanten Unterschiede. Lediglich der Mn und Si-Gehalt ist beim St37 bei den nach 1979 geprüften Stählen etwas höher.

Der Einfluß der Legierungselemente auf die Festigkeit wird im Abschnitt 2.8 untersucht.

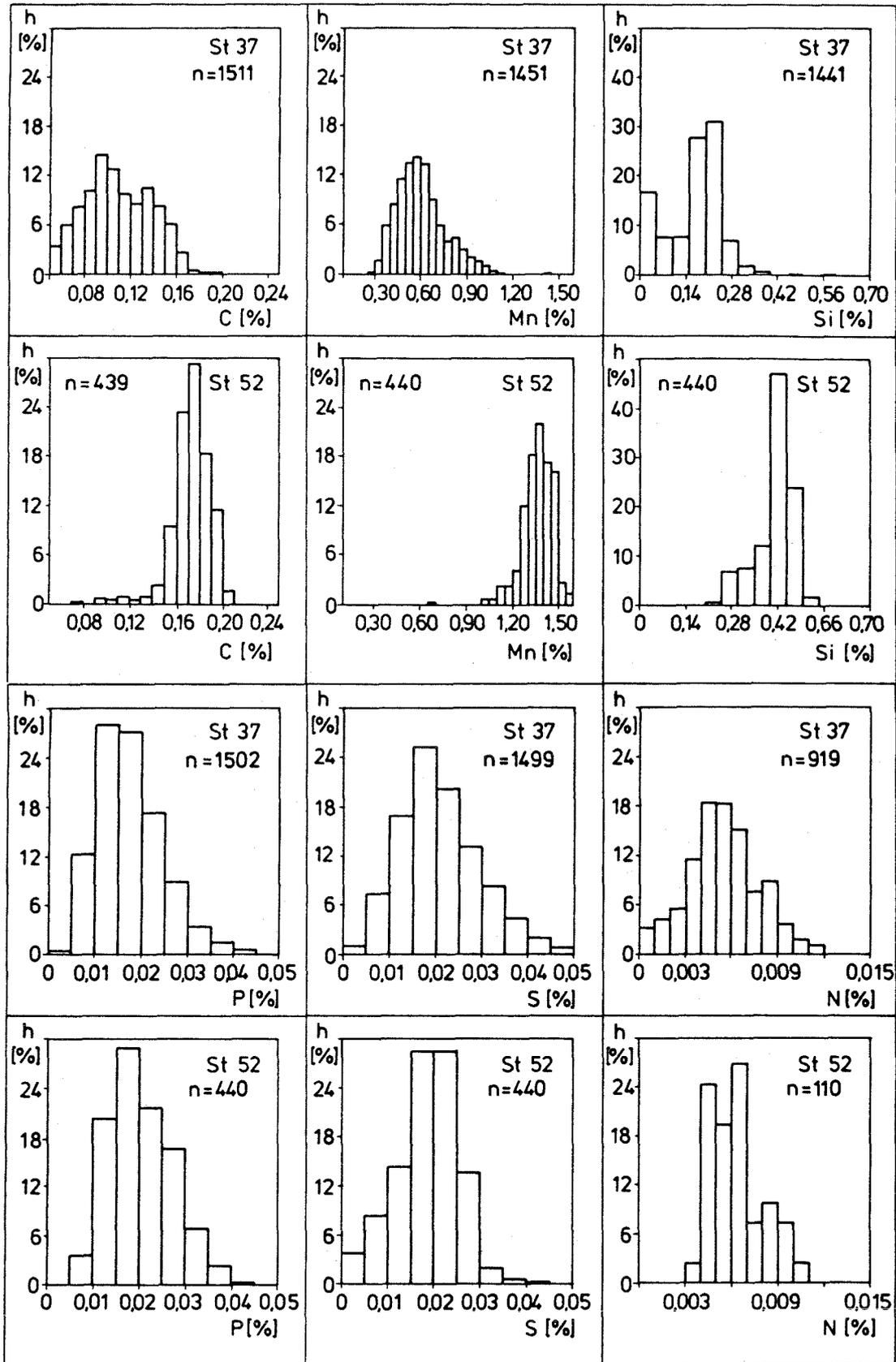


Bild 2.9. Histogramme für die Legierungselemente ohne Berücksichtigung von Prüfdatum und Herkunft

Tabelle 2.9. Parameter der Verteilungsfunktion und Fraktilwerte der Legierungselemente für den St37

Element	Anzahl	Funktion	Funktionsparameter			Testgr. K/S	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- alle Bescheinigungen ---									
C	1511	SFK	5	20			7	11	16
/%/*		NV	11.4	2.91		0.102	6.6	11.4	16.2
100		LNV	2.23	0.321	1.6	0.056	7.1	10.9	17.4
Si	1441	SFK	3	57			3	19	27
/%/*		NV	17.1	7.99		0.079	3.9	17.1	30.2
100		LNV	2.65	0.708	0	0.211	4.4	14.2	45.6
Mn	1451	SFK	28	144			39	59	91
/%/*		NV	60.7	15.8		0.077	34.7	60.7	86.5
100		LNV	3.76	0.346	14.9	0.019	39.3	58.0	91.1
P	1502	SFK	1	50			8	17	31
/%/*		NV	18.1	7.15		0.075	6.3	18.1	29.9
1000		LNV	2.82	0.410	0	0.023	8.5	16.7	32.8
S	1499	SFK	1	50			9	20	39
/%/*		NV	21.6	8.84		0.080	7.1	21.6	36.2
1000		LNV	2.98	0.446	0	0.027	9.5	19.8	41.1
N	919	SFK	3	122			20	60	100
/%/*		NV	59.2	23.1		0.099	21.2	59.2	97.2
10000		LNV	3.97	0.545	0	0.098	21.6	53.0	130
--- nur Betriebe, nach 1979 geprüfte Stähle ---									
C	1209	SFK	5	20			7	11	16
/%/*		NV	10.9	2.88		0.111	6.2	10.9	15.7
100		LNV	2.36	0.271	0	0.078	6.8	10.6	16.5
Si	1143	SFK	1	39			3	18	28
/%/*		NV	16.3	7.90		0.111	3.3	16.3	29.3
100		LNV	2.60	0.709	0	0.237	4.2	13.5	43.2
Mn	1142	SFK	28	144			38	59	91
/%/*		NV	60.1	16.1		0.066	33.6	60.1	86.6
100		LNV	4.06	0.262	0	0.132	44.4	58.0	75.7
P	1199	SFK	1	45			8	16	29
/%/*		NV	17.0	6.80		0.091	5.8	17.0	28.2
1000		LNV	2.75	0.406	0	0.022	8.0	15.6	30.5
S	1196	SFK	1	50			9	21	40
/%/*		NV	22.1	9.37		0.077	6.7	22.1	37.5
1000		LNV	3.00	0.474	0	0.034	9.2	20.0	43.6
N	895	SFK	3	122			20	60	100
/%/*		NV	60.3	21.9		0.118	24.3	60.3	96.3
10000		LNV	4.02	0.433	0	0.075	27.3	55.7	113.6
--- Deutsche Bundesbahn, nur nach 1979 geprüfte Stähle ---									
C	230	SFK	8	19			9	14	17
/%/*		NV	13.4	2.24		0.109	9.8	13.4	17.1
100		LNV	2.58	0.178	0	0.116	9.9	13.2	17.7
Si	230	SFK	2	28			3	23	26
/%/*		NV	19.3	7.90		0.238	4.3	19.3	32.3
100		LNV	2.78	0.720	0	0.313	4.9	16.1	52.7
Mn	230	SFK	38	109			46	64	92
/%/*		NV	65.7	15.3		0.045	40.5	65.7	90.9
100		LNV	4.16	0.227	0	0.041	44.1	64.1	93.1
P	230	SFK	11	50			14	21	30
/%/*		NV	22.2	5.22		0.086	13.6	22.2	30.8
1000		LNV	3.08	0.228	0	0.066	15.0	21.8	31.7
S	230	SFK	7	32			11	17	26
/%/*		NV	17.9	4.86		0.117	9.9	17.9	25.8
1000		LNV	2.85	0.273	0	0.074	11.0	17.2	27.0
--- Deutsche Bundesbahn, nur 1969 geprüfte Stähle ---									
C	71	SFK	5	20			7	12	16
/%/*		NV	12.6	2.16		0.102	9.0	12.6	16.1
100		LNV	2.52	0.168	0	0.094	9.4	12.4	16.4
Si	67	SFK	2	27			4.8	21	26
/%/*		NV	21.0	4.04		0.206	14.4	21.0	27.7
100		LNV	3.00	0.364	0	0.318	11.0	20.1	36.6
Mn	71	SFK	41	74			41	54	67
/%/*		NV	54.4	5.93		0.031	44.6	54.4	64.1
100		LNV	3.99	0.110	0	0.031	45.1	54.0	64.8
P	71	SFK	8	48			9	22	36
/%/*		NV	24.3	10.00		0.187	7.9	24.3	40.8
1000		LNV	3.08	0.500	0	0.221	9.6	21.8	49.5
S	71	SFK	17	36			17	26	34
/%/*		NV	26.0	4.74		0.060	18.2	26.0	33.8
1000		LNV	3.24	0.187	0	0.040	18.8	25.6	34.8

Tabelle 2.9. Parameter der Verteilungsfunktion und Fraktilwerte der Legierungselemente für den St52 (Fortsetzung)

Element	Anzahl	Funktion	Funktionsparameter			Testgr. K/S	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- alle Bescheinigungen ---									
C /%/* 100	439	SFK	8	21		0.126	15	18	20
		NV	17.8	1.74		0.125	14.9	17.8	20.6
		LNV	2.69	0.138	3.0		14.6	17.6	21.4
Si /%/* 100	440	SFK	3.9	55		0.106	29	43	49
		NV	41.9	6.08		0.160	31.9	41.9	51.9
		LNV	3.72	0.190	0		30.2	41.3	56.5
Mn /%/* 100	440	SFK	69	160		0.062	119	138	180
		NV	137.0	10.3		0.092	120.1	137.0	153.9
		LNV	4.59	0.116	37.6		119.0	136.0	157.0
P /%/* 1000	440	SFK	8	41		0.081	11	20	33
		NV	21.0	6.79		0.036	9.8	21.0	32.1
		LNV	2.99	0.333	0		8.1	19.7	34.4
S /%/* 1000	440	SFK	2	41		0.033	6	20	29
		NV	19.2	6.86		0.104	7.9	19.2	30.5
		LNV	4.17	0.472	0		8.1	17.5	38.1
N /%/* 10000	110	SFK	40	110		0.169	50	70	91
		NV	67.5	15.8		0.154	41.5	67.5	93.5
		LNV	3.67	0.378	24.6		46.1	64.6	99.1
--- nur Betriebe, nach 1979 geprüfte Stähle ---									
C /%/* 100	55	SFK	14	21		0.060	14	18	20
		NV	17.6	1.73		0.070	14.7	17.6	20.4
		LNV	2.86	0.090	0		15.1	17.5	20.3
Si /%/* 100	55	SFK	30	50		0.132	31	39	48
		NV	39.2	5.57		0.115	30.0	39.2	48.3
		LNV	3.66	0.142	0		30.7	38.8	49.0
Mn /%/* 100	55	SFK	125	160		0.073	126	141	157
		NV	142.7	9.07		0.053	127.8	142.7	156.6
		LNV	4.53	0.098	49.5		128.4	142.3	158.5
P /%/* 1000	55	SFK	8	33		0.111	8	14	26
		NV	15.4	5.48		0.057	6.4	15.4	24.4
		LNV	2.68	0.322	0		8.4	14.6	25.1
S /%/* 1000	55	SFK	2	22		0.095	2	7	19
		NV	8.87	4.64		0.078	1.2	8.9	16.5
		LNV	2.04	0.544	0		3.2	7.7	18.9
N /%/* 10000	40	SFK	40	110		0.132	50	60	91
		NV	67.5	16.02		0.152	41.1	67.5	93.8
		LNV	3.86	0.321	17.6		45.6	65.1	98.1
--- Deutsche Bundesbahn, nur nach 1979 geprüfte Stähle ---									
C /%/* 100	75	SFK	10	20		0.209	11	17	19
		NV	16.9	2.25		0.241	13.2	16.9	20.6
		LNV	2.82	0.152	0		13.0	16.7	21.5
Si /%/* 100	75	SFK	33	52		0.078	37	44	49
		NV	44.1	3.50		0.077	38.3	44.1	49.8
		LNV	3.78	0.082	0		38.4	44.0	50.3
Mn /%/* 100	75	SFK	129	160		0.095	131	142	152
		NV	141.8	6.45		0.101	129.2	141.8	153.2
		LNV	4.52	0.070	49.5		129.8	141.0	153.7
P /%/* 1000	75	SFK	13	34		0.069	15	23	32
		NV	23.2	5.05		0.079	14.9	23.2	31.5
		LNV	3.12	0.228	0		15.5	22.6	32.9
S /%/* 1000	75	SFK	4	37		0.097	7	16	27
		NV	16.5	6.11		0.088	6.5	16.5	26.6
		LNV	2.73	0.386	0		8.2	15.4	29.0
--- Deutsche Bundesbahn, nur 1969 geprüfte Stähle ---									
C /%/* 100	191	SFK	14	21		0.071	16	18	20
		NV	18.1	1.40		0.078	15.8	18.1	20.4
		LNV	2.90	0.078	0		15.9	18.1	20.6
Si /%/* 100	192	SFK	25	55		0.126	28	42	48
		NV	40.8	6.61		0.163	30.0	40.8	51.6
		LNV	3.693	0.179	0		29.9	40.2	53.9
Mn /%/* 100	192	SFK	107	153		0.039	114	133	147
		NV	132.7	9.63		0.064	116.9	132.7	148.6
		LNV	4.41	0.120	49.5		117.3	132.1	150.2
P /%/* 1000	192	SFK	10	41		0.130	11	19	35
		NV	21.1	7.50		0.085	8.7	21.1	33.4
		LNV	2.99	0.350	0		11.5	19.8	35.3
S /%/* 1000	192	SFK	15	39		0.086	17	23	29
		NV	22.9	3.90		0.105	16.5	22.9	29.3
		LNV	3.12	0.169	0		17.1	22.6	29.9

2.7 KORRELATION

Um einen Anhaltswert zu bekommen, ob Abhängigkeiten zwischen den Kennwerten vorliegen, wurden Korrelationsrechnungen durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden ohne eine Unterteilung der Bescheinigungen in Erzeugnisdicke, Herkunft und Herstellungsdatum durchgeführt. Es wurde davon ausgegangen, daß diese Unterteilung nur einen geringen Einfluß auf die Korrelationskoeffizienten hat und eine Korrelationsrechnung nur einen Anhalt gibt, ob eine

Abhängigkeit vorhanden ist und wie stark sie ausgeprägt ist. Bild 2.10 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der Zugfestigkeit R_m und der Streckgrenze R_{eH} für den St37, die bei einem Korrelationskoeffizient $\rho = 0.5$ nicht sehr stark ausgeprägt ist. Die Korrelation zwischen Festigkeitskennwerten und Legierungselementen ist bei den niedrigen Legierungsgehalten der Allgemeinen Baustähle nur schwach ausgebildet. Deshalb wurde eine Korrelationsrechnung auch für alle Stähle ohne Unterscheidung der Stahlsorten durchgeführt. In Tabelle 2.10 sind die Korrelationskoeffizienten zusammengefaßt.

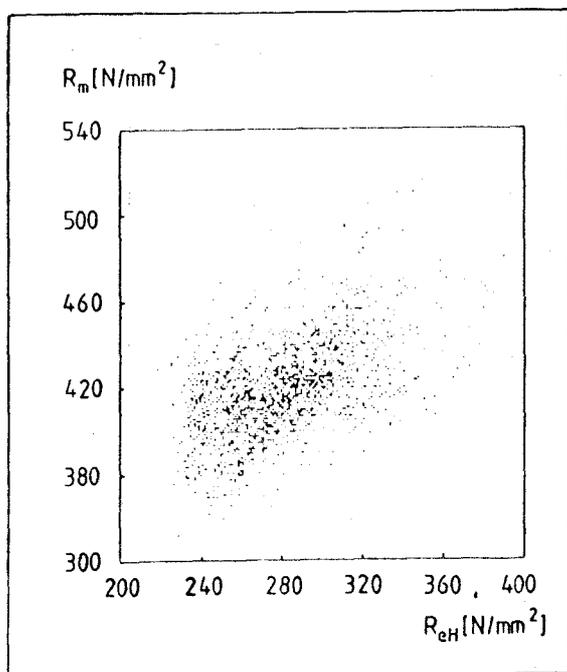


Bild 2.10. Abhängigkeit von R_{eH} und R_m

Tabelle 2.10. Korrelationskoeffizienten

		R_m	A_5	C	Si	Mn
St37	R_{eH}	0.5	-0.1	-0.3	0.2	-
	R_m	-	-0.4	0.2	0.4	0.1
	A_5	-	-	-0.2	-0.3	0.1
St52	R_{eH}	0.7	-0.1	-0.1	0.1	0.3
	R_m	-	-0.3	-0.4	0.4	0.3
	A_5	-	-	-0.1	0.2	-0.1
St37 und St52	R_{eH}	0.9	-0.6	0.5	0.8	0.8
	R_m	-	-0.7	0.7	0.8	0.9
	A_5	-	-	-0.6	-0.6	-0.6

Eine stark ausgeprägte Korrelation konnte bei der Berechnung für die Zusammenfassung beider Stahlsorten festgestellt werden. Die Korrelationskoeffizienten sind – jeweils für eine Stahlsorte berechnet – klein, d.h. die Abhängigkeiten sind nur schwach ausgebildet. Speziell bei den Legierungselementen kann daraus geschlossen werden, daß nicht gezielt ein Legierungselement zur Festigkeitssteigerung hinzugegeben wird. Wahrscheinlich werden zur Erzielung einer gewünschten Festigkeit verschiedene Elemente hinzugegeben, und weil jeder Stahlhersteller eine andere Rezeptur hat, ist eine ausgeprägte Korrelation eines einzelnen Elementes nicht vorhanden. Für die übrigen Legierungselemente konnte keine Korrelation nach dem Testverfahren nach Abschnitt 2.5.5 festgestellt werden.

Auf eine Korrelationsrechnung für die Abhängigkeit von R_{eH} von der Erzeugnisdicke t wurde verzichtet, da bekannt ist, daß ein nichtlinearer Zusammenhang besteht.

2.8 REGRESSIONSRECHNUNG

2.8.1 Einflüsse auf die Festigkeitskennwerte

Die Allgemeinen Baustähle St37 und St52 haben ein sog. ferritisches Gefüge, d. h. beim Abkühlen des Stahls aus der Schmelze lagern sich an sog. Keimen die Eisenatome an (Kornwachstum). Bei Raumtemperatur entsteht nach dem Abkühlvorgang ein Gefüge aus einzelnen Körnern. Die Eisenatome bilden in diesen Körnern ein Kristall mit kubisch-raumzentriertem Gitter: Stellt man sich einen Quader vor, so ist an jeder Ecke sowie im Schwerpunkt jeweils ein Atom angeordnet. An Stelle der Eisenatome können auch Atome anderer Elemente (Fremdatome) eingelagert sein, die bis zu einem bestimmten Gehalt vom kubisch-raumzentrierten Gitter aufgenommen werden können. Man spricht dann von einem Mischkristall. Im Gefüge entstehen während des Abkühlens aus der Schmelze um die Körner Korngrenzen mit erhöhtem Gehalt an nicht vom diesem Gitter lösbaren Legierungselementen. Bei den Allgemeinen Baustählen bestehen diese Korngrenzen größtenteils aus der Eisen-Kohlenstoff-Verbindung Fe_3C (Zementit), weil speziell der Kohlenstoff bei Raumtemperatur im Gitter praktisch unlösbar ist.

Bei langsamen Abkühlvorgängen können Körner oberhalb ca. 550°C zusammenwachsen, d. h. die mittlere Korngröße ist von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig.

Eine Festigkeitssteigerung erfolgt grundsätzlich durch eine Behinderung von Versetzungen bei Belastung. Hindernisse sind z. B. Fremdatome, Versetzungen im Kristallgitter, Korngrenzen und Ausscheidungen von im Gitter unlöslichen Elementen auf den Korngrenzen.

Die Festigkeit ist weiterhin von der Temperatur und von der Belastungsgeschwindigkeit abhängig.

Die Zusammenhänge können durch empirische Formeln beschrieben werden. Die Beziehung für die untere Streckgrenze für eine Kombination von Einflüssen ist z. B. in /6/ ohne Berücksichtigung

von Temperatur- und Belastungsgeschwindigkeit angegeben

$$R_{eL} = \sigma_i + k_y d^{-1/2} + \sigma_C + \sigma_H \quad (2.20)$$

mit

- σ_i = Reibungsspannung des unlegierten Grundwerkstoffs
 $k_y d^{-1/2}$ = Einfluß der Korngröße
 d = Korngröße
 σ_C = Wirkung von Fremdatomen
 σ_H = Einfluß von festliegenden Versetzungen und nicht-schneidbaren Teilen.

Für ferritische Stähle werden proportionale Zusammenhänge für die Streckgrenzenerhöhung infolge der Legierungselemente angegeben /6/.

Dem Regressionsmodell werden folgende Annahmen zugrunde gelegt:

1. Kein Einfluß der Legierungselemente auf die Korngröße
2. Proportionaler Zusammenhang zwischen Erzeugnisdicke und Korngröße
3. Kein Einfluß von σ_H
4. Proportionale Zusammenhänge zwischen den Gehältern der einzelnen Legierungselemente und der Streckgrenzenerhöhung
5. Vollständige Korrelation zwischen unterer und oberer Streckgrenze

Der Regressionsansatz für R_{eH} ergibt sich somit zu:

$$R_{eH} = a_0 + a_1 t^{-1/2} + a_2 C + a_3 Si + a_4 Mn + a_5 P + a_6 S. \quad (2.21)$$

Der Ansatz nach Gl. 2.21 wird auch auf die Zugfestigkeit übertragen, auch wenn eine Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Erzeugnisdicke gering ist.

Für die Bruchdehnung gilt dieser Ansatz nicht und wurde deswegen

mit einem quadratischen Ansatz für die Erzeugnisdicke formuliert, obwohl ein Einfluß der Erzeugnisdicke nach Abschnitt 2.6.4 nur gering ist:

$$A_5 = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 C + a_4 Si + a_5 Mn + a_6 P + a_7 S. \quad (2.22)$$

In die Regressionsrechnung wurden alle in der Datenbank vorhandenen Bescheinigungen aufgenommen. Es wird hierbei davon ausgegangen, daß die Festigkeitskennwerte der Allgemeinen Baustähle nur von der chemischen Zusammensetzung und von der Erzeugnisdicke (gleich Annahme über die Korngröße) abhängen.

2.8.2 Berechnung der Regressionskoeffizienten

Um die einzelnen Einflüsse zu studieren, wurden folgende Ansätze untersucht:

- A = Abhängigkeit n t, C, Si, Mn, P, S
- B = Abhängigkeit von t, C, Si, Mn
- C = Abhängigkeit von t
- D = keine Abhängigkeit (a_1 bis $a_l = 0$)

mit $l = 6$ für Gl. 2.21
 $l = 7$ für Gl. 2.22 } für Ansatz A

In Tabelle 2.11 sind die Standardfehler s_F (= Streuung der Einzelwerte um die Regressionsgerade nach Abschnitt 2.5.6) aus der Regressionsrechnung zusammengestellt. Da die Regressionsgleichungen auch ohne Berücksichtigung der Stahlsorte gelten, wurde die Regression für die Ansätze A und B auch ohne Unterscheidung der Stahlsorten durchgeführt.

Tabelle 2.11. Standardfehler s_f für verschiedene Regressionsansätze

	Stahlsorte	Ansatz			
		A	B	C	D
R_{eH} /N/mm ² /	St37	22.3	22.3	23.6	27.7
	St52	23.6	24.6	26.4	27.8
	St37 + St52	25.6	25.6	-	-
R_m /N/mm ² /	St37	18.5	19.1	21.8	21.8
	St52	20.7	20.8	24.6	24.8
	St37 + St52	21.5	21.8	-	-
A_5 /‰/	St37	30.0	33.0	34.1	35.6
	St52	28.5	28.6	29.8	30.6
	St37 + St52	33.5	33.7	-	-

Im Vergleich Ansatz C mit D -jeweils ohne Berücksichtigung der Legierungselemente- ist durch die Hinzunahme der Erzeugnisdicke t in den Regressionsansatz D für R_{eH} der Standardfehler s_f deutlich geringer, für R_m kann nur ein geringer Einfluß festgestellt werden. Im Vergleich Ansatz A mit B kann man feststellen, daß die Legierungselemente P und S keinen wesentlichen Einfluß haben. Bemerkenswert ist der geringe Standardfehler s_f für die Auswertung beider Stahlsorten.

Eine Abschätzung der Festigkeitskennwerte ist deshalb nur für die Ansätze B und C sinnvoll. Die Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 2.12 angegeben. Ein Einfluß der Erzeugnisdicke t auf die Bruchdehnung A_5 konnte nicht festgestellt werden. Daher wurde in Tabelle 2.12 keine Abhängigkeit für die Erzeugnisdicke t angegeben.

Tabelle 2.12. Regressionskoeffizienten

Koeffizient		a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	n	s_F
Einflußfaktor		-	$t^{-1/2}$	C	Si	Mn		
/Dimension/		-	/mm/	/%/	/%/	/%/		
R_{eH}	St37	233.2	155.6	-81.2	86.6	16.6	2428	22.3
	St52	249.4	185.3	-239.4	42.5	93.8	676	24.6
	St52+St37	133.2	203.1	103.1	17.3	85.8	3104	25.6
R_{eH} /N/mm ² /	St37	232.4	167.5	-	-	-	2871	23.6
	St52	365.7	136.3	-	-	-	678	26.4
R_m	St37	329.0	64.3	26.3	15.2	27.3	2427	19.1
	St52	356.7	86.7	37.7	107.5	61.2	676	20.8
	St52+St37	248.2	109.5	442.6	230.5	86.0	3103	21.8
R_m /N/mm ²	St37	418.7	2.5	-	-	-	2870	21.8
	St52	562.3	46.5	-	-	-	678	24.6
A_5 /‰/	St37	405	-	-270	-118	19	2428	33.0
	St52	323	-	-283	151	31	676	28.6
	St52+St37	440	-	-347	-145	-22	3104	33.7

Speziell für Ansatz B ist festzustellen, daß durch die Hinzunahme der Elemente C, Si und Mn der Standardfehler s_F für den St37 bzw. St52 geringfügig abnimmt, d.h. ein Einfluß auf die Festigkeitskennwerte ist nicht ausgeprägt, was bereits durch die Korrelationskoeffizienten deutlich wurde. Die Regressionskoeffizienten wurden jedoch zur Vollständigkeit angegeben. Wider Erwarten sind die Koeffizienten bei R_{eH} für den Kohlenstoffgehalt für den St37 und St52 negativ. Da die Unterschiede in den Legierungsgehalten

sehr gering sind und Korrelationen nur schwach ausgebildet sind, sollten diese Gleichungen nur mit Vorsicht interpretiert werden, und nur die Regressionsgleichungen für die Zusammenfassung der Stahlsorten St37 und St52 benutzt werden.

Es ist anzumerken, daß die Festigkeitskennwerte, die aus den Regressionsfunktionen errechnet werden, Erwartungswerte sind. Da die Verteilung der Residuen nicht immer einer Normalverteilung folgt (z.B. durch Filter bei R_{eH}), können Fraktilwerte, die aus den Regressionsgleichungen und den Standardfehlern errechnet werden, nur als Anhaltswerte gedeutet werden.

Zusammenfassend kann aus den Regressionskoeffizienten geschlossen werden, daß R_{eH} infolge C um 100 N/mm^2 , infolge Si um 175 N/mm^2 und infolge Mn um 85 N/mm^2 pro Prozent der Legierungselemente linear erhöht wird. Dagegen fällt R_{eH} um ca. $200 \text{ N/mm}^2/t^{1/2}$, d.h. wird die Erzeugnisdicke verfünffacht, fällt R_{eH} um ca. 100 N/mm^2 . R_m wird ebenfalls durch C, Si und Mn mit ca. 440, 230 und 85 N/mm^2 pro Prozent der Legierungselemente erhöht. R_m fällt um $110 \text{ N/mm}^2/t^{1/2}$.

A_5 wird durch C, Si und Mn um 347, 145 und 22 % /% der Legierungselemente linear niedriger. Ein Einfluß von der Erzeugnisdicke t auf die Bruchdehnung A_5 konnte nicht festgestellt werden.

3 STICHPROBENENTNAHME FÜR EINE FREMDPRÜFUNG

3.1 ALLGEMEINES

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde eine Stichprobe aus deutschen Stahlbaubetrieben entnommen. Sie umfaßt den Besuch der Stahlbaubetriebe, die Entnahme von ca. 400 Proben, die Prüfung der Stähle und eine statistische Auswertung.

Zur Abgrenzung der Auswertung von Bescheinigungen über Materialprüfungen, die als Eigenkontrolle der Hersteller zu verstehen ist, wird diese Untersuchung als Fremdprüfung bezeichnet.

3.2 AUSWAHL DER STAHLBAUBETRIEBE

3.2.1 Zur statistischen Stichprobe

Nach Vincze /20/ muß die Stichprobe die folgenden Bedingungen erfüllen, um aus den gewonnenen Daten Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit ziehen und Gesetzmäßigkeiten angeben zu können:

1. Die Stichprobe muß repräsentativ sein, d.h. sie muß die Eigenschaft haben, daß alle Elemente als zufällig aus der Grundgesamtheit entnommen angesehen werden können.
2. Die einzelnen Elemente der Stichprobe müssen unabhängig voneinander sein.

Eine entsprechende Definition der Stichprobe findet sich in /1/, /42/ und /43/.

In dem hier vorliegenden Fall einer praktisch unendlichen Grundgesamtheit und für den Fall, daß technische bzw. wirtschaftliche Überlegungen andere Methoden der Stichprobenentnahme rechtfertigen, schlägt Vincze die "Stichprobenentnahme mit Schichtung" vor. Bei diesem Verfahren wird die Grundgesamtheit in Schichten eingeteilt, aus denen zufällig oder auf repräsentative Art einige ausgewählt werden.

3.2.2 Systematische Einflüsse bei der Stichprobenentnahme

Besonders bei kleinen Stichprobenumfängen muß darauf geachtet werden, daß die Verteilung möglichst vieler Einflüsse in der Stichprobe mit der Verteilung dieser Einflüsse in der Grundgesamtheit übereinstimmt.

In dieser Hinsicht wurde auf folgende Kriterien geachtet:

- Vertrauensverhältnis zu den Betrieben

Jedes Stichprobenelement muß mit gleicher Wahrscheinlichkeit in die Stichprobe gelangen können. Um dies zu gewährleisten, muß ein Vertrauensverhältnis zu den Betrieben aufgebaut werden. Dazu sollten sich die Beteiligten z.B. persönlich kennen, beispielsweise durch einen Besuch vor der Stichprobenentnahme. Des weiteren muß garantiert sein, daß die Namen der Betriebe vertraulich behandelt werden.

Auch ein Eigeninteresse an objektiven Untersuchungen muß geweckt werden, indem eine detaillierte Auswertung der Untersuchungen zugesagt und übergeben wird.

- Verwechslungsgefahr der Stahlsorte

Die Allgemeinen Baustähle sind äußerlich nicht voneinander zu unterscheiden. Sie müssen deshalb gekennzeichnet werden, um Verwechslungen auszuschließen.

- Betriebsgröße

Größere Betriebe, die konstruktiv anspruchsvollere Bauwerke errichten, haben in der Regel eine eigene Abteilung zur Qualitätssicherung. Sie sind als Kunden für die Lieferanten interessanter, es wird mehr auf die Wünsche eingegangen als bei kleineren Betrieben, d.h. in den Augen der Lieferanten wird "besserer" Stahl geliefert, z.B. auch mit Prüfbescheinigungen.

Bei der Stichprobenentnahme wird der Einfluß der Betriebsgröße damit berücksichtigt, daß die Stichprobe sowohl aus kleinen als auch aus mittleren und großen Betrieben entnommen wurde.

- Stahlhersteller

Stahlhersteller bedienen sich verschiedener Herstellungsverfahren, um ein gewünschte Erzeugnis zu erhalten. Als Herstellungsverfahren gelten hierbei das Erschmelzungsverfahren, die Art der Desoxidation, die Art der Vergießung, sowie Formgebungs- und Wärmebehandlungsverfahren. Es ist nicht möglich, anhand einfacher optischer Prüfungen die Einflußgrößen zu bestimmen, die die Werkstoffkennwerte beeinflussen. DIN 17 100 überläßt das Herstellungsverfahren und die entsprechenden Einzelheiten dem Hersteller und weist ausdrücklich darauf hin, daß Einzelheiten bei Bestellung zu vereinbaren sind. In den Prüfbescheinigungen brauchen die Herstellungsverfahren sonst nicht angegeben zu werden. Um den Einfluß auszuschalten, muß die Stichprobenentnahme in mehreren Betrieben erfolgen.

- Erzeugnisform und Erzeugnisdicke

Die Erzeugnisform (Blech, Walzprofil o.ä.) hat einen Einfluß auf die Kennwerte und wurde bei der Stichprobenanweisung dadurch berücksichtigt, daß alle anfallenden Halbzeuge innerhalb eines definierten Zeitabschnitts der Produktion entnommen wurden und somit alle in dieser Zeit verarbeiteten Halbzeuge in die Stichprobe aufgenommen worden sind.

- Einfluß des Zeitpunktes der Herstellung

Neue Herstellungsverfahren führen ständig zu Veränderungen der Stahlqualitäten. Die geschichtliche Entwicklung der Herstellungsverfahren ist z.B. in /21/ nachzulesen.

Der Einfluß der Zeit kann durch die Stichprobenentnahme nicht erfaßt werden, da nur ein kurzer Zeitraum für die Untersuchungen zur Verfügung stand.

3.2.3 Schichtung

Um die Betriebsgröße in der Stichprobenanweisung zu erfassen, wurden die Betriebe unter der Annahme in drei Schichten eingeteilt, daß keine signifikanten Unterschiede innerhalb der Gruppen vorhanden sind. Anhand der Belegschaftsgrößen wurde folgende Einteilung gewählt:

kleine	Betriebe	bis	49	Mitarbeiter
mittlere	Betriebe	50 -	399	Mitarbeiter
große	Betriebe	ab	400	Mitarbeiter

In Tabelle 3.1 ist die Größenklassenstruktur im Stahlbau, Stand September 1984, nach Informationen des Deutschen Stahlbauverbandes und die entsprechende Wahl der Betriebe dargestellt. Von den zur Stichprobenentnahme ausgewählten Betrieben haben 3 ihren Sitz im Rhein-Main-Gebiet und 5 in Norddeutschland. Der Stichprobenzeitraum wurde vom November 1985 bis Oktober 1986 zeitlich begrenzt.

3.3 STICHPROBENANWEISUNG

Jeder Betrieb wurde mindestens einmal besucht, um sich über Lagerhaltung, Verarbeitung und Qualitätssicherung zu informieren und die Stichprobenanweisung darzulegen.

Allen Betrieben wurde folgender Entnahmemodus vorgeschlagen:

Von einem bestimmten Stichtag an wird von allen in die Fertigung gehenden Halbzeugen eines Betriebes eine Probe entnommen, bis der Stichprobenumfang von 60 - 80 Proben erreicht ist.

Tabelle 3.1. Größenklassenstruktur im Stahlbau und Wahl der Betriebe

Mit .. bis .. Beschäftigte	1 - 49	50 - 399	400 u.m.	Insgesamt
Betriebe	572	393	19	984
Beschäftigte in Betrieben	17296	43053	18641	78990
Umsatz ohne MWST 1983 in Mio. DM	1792.5	5209.4	2797.6	9799.5
---- in % ----				
Betriebe	58.1 %	40.0 %	1.9 %	100 %
Beschäftigte in Betrieben	21.9 %	54.5 %	23.6 %	100 %
Umsatz ohne MWST 1983 in Mio. DM	18.3 %	53.2 %	28.5 %	100 %
Auswahl der Betriebe				
Anzahl	2	4	2	8

Die Stichprobenentnahme konnte aus Kostengründen nur teilweise überwacht werden und wurde deshalb von den Betrieben in Eigenregie durchgeführt.

Um möglichst viele Informationen von den Betrieben zu erhalten - grundsätzliche Fragestellung : "Was wissen die Stahlbauer über ihren Stahl" - wurden weiterhin noch folgende Informationen für jede Probe erfragt:

- Stahlsorte (mindestens Angabe, ob St37 oder St52) und falls bekannt, Angabe, ob RSt37-2, QSt37-2 o.ä.
- Bei Blechen Walzrichtung
- Bescheinigungen über Werkstoffprüfungen (falls vorhanden) beilegen
- Vergußart (Strangguß, Blockguß)
- Herstellungsjahr
- Hersteller
- Wärmebehandlung
- Liefermenge

3.4 ZUR QUALITÄTSSICHERUNG

3.4.1 Geforderte Qualitätssicherung

Die in der Bundesrepublik Deutschland zugelassenen Allgemeinen Baustähle werden von den Herstellern mit Gütezeichen oder Kennzeichnungen vertrieben, wodurch eine Zuordnung zu Bescheinigungen über Materialprüfungen nach DIN 50 049 - im weiteren kurz Bescheinigungen - möglich ist. Die Händler und auch die Stahlbaubetriebe (kurz: Betriebe) brauchen selbst keine Güteüberwachungen durchzuführen. Hierzu legt DIN 18 800 Teil 1 für die Stahlbauten fest :

"Die verwendeten Stähle sind durch Bescheinigungen nach DIN 50 049 zu belegen, ausgenommen ungeschweißte Bauteile aus St37 und untergeordnete Bauteile. ... "

Die Ausnahmeregelung "untergeordnete Bauteile" beschränkt sich nur auf Bauteile, die keine wesentliche Tragfunktion haben.

Grundsätzlich müssen alle geschweißten Stähle güteüberwacht sein. Der erforderliche Prüfumfang ist hierbei in der Gütenorm DIN 17 100 "Allgemeine Baustähle" festgelegt.

Der Händler trägt für eine Verwechslung der gelieferten Stahl-sorten nur im Rahmen seiner Lieferbedingungen eine Verantwortung. Wird die Lieferung von dem bestellenden Betrieb abgenommen, liegt die Haftung bei ihm. So schreibt die "Niedersächsische Bauordnung 1986" /22/ im §59,1 :

"Jeder Unternehmer ist dafür verantwortlich, daß seine Arbeiten dem öffentlichen Baurecht entsprechend ausgeführt und insoweit auf die Arbeiten anderer Unternehmer abgestimmt werden. Er hat die Nachweise über die Brauchbarkeit der Baustoffe, Bauteile oder Bauarten im Sinne des §1 zu erbringen und auf der Baustelle bereitzuhalten."

Gegenüber den Bauämtern ist der Bauherr verantwortlich, der entsprechende Fachingenieure beauftragen muß /22,§57/. Die Baugenehmigung enthält entsprechende Bedingungen und überläßt die Gütekontrolle fast ausschließlich der Eigenverantwortung und Eigenüberwachung der Betriebe.

Diese Bedingungen sind z.B. erfüllt, wenn bei der Bestellung die "Allgemeinen Technischen Lieferbedingungen für Stahl und Stahlerzeugnisse" nach DIN 17 010, 6.1985 oder EURONORM 21-78, die beide im wesentlichen inhaltlich übereinstimmen, vereinbart werden. Hier wird z.B. geregelt, in welchen Fällen Bescheinigungen vorzulegen sind. Desweiteren wird die Rechtslage bei Beanstandungen in den Erläuterungen der DIN 17 010 ausführlich behandelt.

3.4.2 Zur Qualitätssicherung in den Betrieben

In allen Betrieben war es ohne weiteres möglich, die Lagerhaltung und die Fertigungsanlagen zu besichtigen. Alle zeigten Interesse an den Untersuchungen und waren bereit, die gestellten Fragen zu beantworten.

In den kleineren Betrieben sind i. allg. ein oder zwei Ingenieure für die Bereich Konstruktion, Statik, Ausführung und Qualitätssicherung sowie als Schweißfachingenieure verantwortlich. Da die gesamte Projektabwicklung somit praktisch in "einer Hand" liegt, ist der Informationsfluß von und zur Werkstatt naturgemäß sehr gut. Diese Betriebe konnten zumeist keine Bescheinigungen vorlegen, konnten jedoch nach ihren Angaben über die Güte der verarbeiteten Stähle eine Aussage machen, da beim Bohren oder Sägen der Stähle sich höherfeste schlechter als durch die vorhandene Erfahrung erwartet verarbeiten lassen. Durch ein entsprechendes Qualitätsbewußtsein bei den Mitarbeitern in der Werkstatt würden die niedriger festen Stähle aus der Produktion herausgenommen falls z.B. ein Bauteil aus St52 errichtet werden soll und der Werkstoff wahrscheinlich "nur" ein St37 ist.

Andere Betriebe kontrollierten den Werkstoff mit Härteprüfungen, auch wenn die Stähle gekennzeichnet und mit Bescheinigungen bestellt waren. Diese Bescheinigungen konnten jedoch wegen der Lagerhaltung ohne besondere Kennzeichnung z.B. nach Schmelzennummern oder Kennziffern nicht zugeordnet werden, man verließ sich ausschließlich auf die Härteprüfungen.

Die großen und mittleren Betriebe hatten meistens für alle verarbeiteten Bleche Prüfbescheinigungen nach DIN 50 049 - 2.2 bestellt. Mit diesen sog. Werkszeugnissen bestätigt das herstellende Werk, daß das gelieferte Erzeugnis den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht. Es war auch hier nur in Ausnahmefällen möglich, die unter 2.3 aufgeführten Informationen wie z. B. Hersteller zu erhalten. Für Walzprofile wurden i. allg. Prüfbescheinigungen nach DIN 50049 - 3.1 (Abnahmeprüfzeugnisse) be-

stellt, bei denen zahlenmäßige Ergebnisse aus den Prüfungen selbst oder an den in den Normen angegebenen Prüfeinheiten durch Sachverständige bestätigt werden. Grundsätzlich konnte bei den Lagerbegehungen festgestellt werden, daß alle Stähle gekennzeichnet waren. Bescheinigungen konnten nur mit großem Aufwand zugeordnet werden. Ob und in welchem Umfang Bescheinigungen vorlagen, konnte nicht festgestellt werden.

Ergänzend wird an dieser Stelle ein Ausschnitt aus dem Erfahrungsbericht von Schneider /34/ über die Erfahrungen des Prüfers in der Gütegemeinschaft Stahlhochbau angeführt:

"Eine wichtige Kontrolle, die jedesmal durchgeführt werden muß, ist die Überprüfung des Nachweises, daß alle Materialien durch Werks- oder Händlerbescheinigungen hinsichtlich ihrer Güte belegbar sind. Dies geschieht in der Form, daß ich willkürlich aus Stücklisten Profile auswähle, für die dann die Bescheinigungen vorzulegen sind. Ich suchte damals im TB einige Profile aus. Dann gingen wir in die Einkaufsabteilung. Der Chef dieser Abteilung war ein alter Fachmann auf dem Gebiete der Materialbeschaffung. Er wies nach, daß die gewünschten Bescheinigungen bestellt waren. Aber den Beweis, daß sie wirklich geliefert worden sind, mußte er schuldig bleiben. ...

Es sollte anschließend das Materiallager besichtigt werden. Eine Überprüfung des Lagers ist erforderlich, da alle Materialien so zu kennzeichnen und zu lagern sind, daß ein Verwechseln der Materialgüten nach menschlichen Ermessen ausgeschlossen werden kann. Gewöhnlich geschieht die Kennzeichnung durch Farben, manchmal durch Beschriftung.

Im geschilderten Fall war nichts geschehen, weder Farbe noch Beschriftung. Man erklärte mir, das sei nicht notwendig, da man einen erfahrenen, zuverlässigen Lagerverwalter habe. Dieser wisse, wo und wie gelagert sei. Es waren einige Stäbe aus St52 am Lager. Ich wollte sie sehen. Unglücklicherweise

fehlte der Lagerverwalter an diesem Tag. Wir haben trotz heftigen Suchens den St52 nicht gefunden. ..."

Die Erfahrungen decken sich größtenteils mit denen aus der durchgeführten Stichprobenentnahme. Die Forderungen der Gesetze und Normen werden nicht überall erfüllt. Dadurch entstehen keine Konsequenzen für die einzelnen Betriebe, weil Kontrollen praktisch nur nach Schadensfällen durchgeführt werden.

An dieser Stelle wird nicht über die Auswirkungen auf die Güte der Stähle eingegangen. Bei der Auswertung der Stichprobe im Abschnitt 6 wird diese Problematik noch einmal aufgegriffen.

4 PRÜFKÖRPERENTNAHME UND PRUFMODUS FÜR ZUGVERSUCHE

4.1.1 PRÜFKÖRPER

4.1.1 Allgemeines

Die Entnahme der Prüfkörper wurde entsprechend den Regelungen von DIN 17 100, Bilder 2 - 13 festgelegt. Bei Walzprofilen wurden die Prüfkörper ausschließlich aus den Flanschen entnommen. Eine Wärmebehandlung z.B. durch Spannungsarmglühen wurde nicht durchgeführt. Um eine eventuelle Wärmeentwicklung bei der Herstellung zu vermeiden, wurden sämtliche Prüfkörper aus den Halbzeugen herausgesägt, und bei der Herstellung mehrmalige Pausen beim Drehen bzw. Fräsen zum Abkühlen eingelegt.

4.1.2 Geometrie

Von den Blechen und den Flachstählen wurde mittels Schieblehre mit einer Genauigkeit von 1/100 mm die Erzeugnisdicke ausgemessen. Die Geometrie der Walzprofile wurde erfaßt, indem ein Teil des Querschnitts ca. 20 mm vom Rand rechtwinklig zur Achse abgesägt, anschliessend auf ein Photopapier gestellt und im Maßstab 1:1 belichtet wurde. Somit war sichergestellt, daß alle Details wie Ausrundungsradien oder Parallelität der Flansche leicht auszumessen sind. Bild 4.1 stellt Profilphotographien dar.

4.1.3 Zugproben

Sämtliche Zugproben wurden in Walzrichtung entnommen und nach den Vorschriften von DIN 50 125 mit der Geometrie eines kurzen Proportionalstabs hergestellt. Die Proben wurden zuerst durch Sandstrahlen von Zunder, Rost und Farbresten befreit. Die Probenentnahme in den Betrieben (s. Abschnitt 3.1) ergab oft nicht ausreichende Meßlängen, um eine Flachprobe mit der geforderten Geometrie eines kurzen Proportionalstabs herzustellen. In diesen Fällen wurden Rundproben gefertigt. Aus nicht parallelgurtigen

Flanschen (z.B. bei Walzprofilen), wurden Rundzugproben gefertigt.

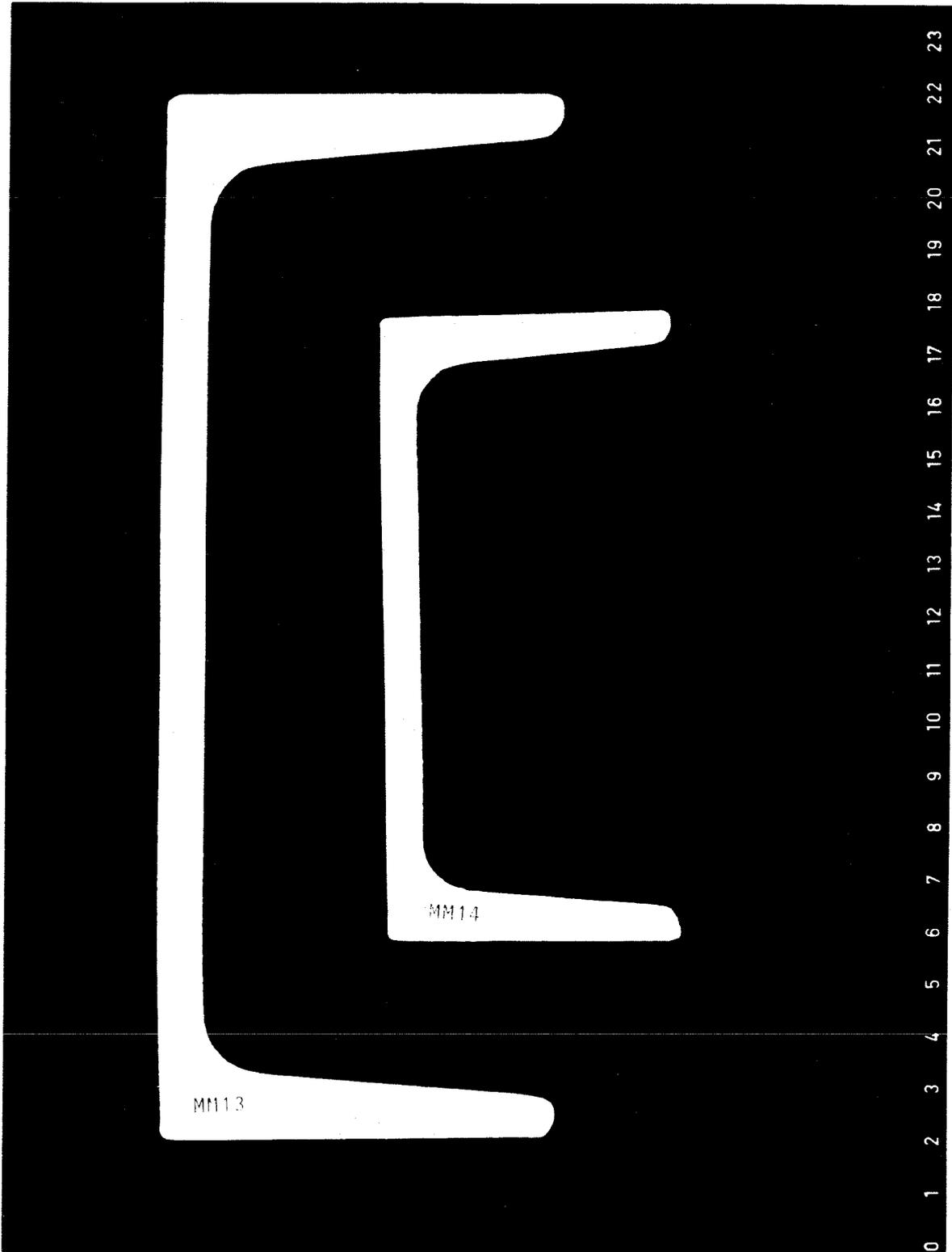


Bild 4.1. Auswertung der Probengeometrie

4.1.4 Kerbschlagproben

Es wurden ausschließlich ISO - V Spitzkerbproben hergestellt. Die Probenlängsachse wurde in Walzrichtung gelegt, wobei eine Seite möglichst nahe an der Walzoberfläche und der Kerb senkrecht zur Probenoberfläche lag. Es wurden je Halbzeug 3 Prüfkörper entnommen. Es wurden jedoch nur einige Proben zur Kontrolle entnommen, da aus finanziellen Gründen eine umfassende Untersuchung auch mit Bestimmung der Übergangstemperatur nicht durchgeführt werden konnte.

4.2 PRÜFMODEUS FÜR ZUGVERSUCHE

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde ein Prüfmodus für Zugversuche entwickelt, der den Bestimmungen der DIN 50 145 "Zugversuche" entspricht. Es werden mit dem Prüfmodus weitere Festigkeitskennwerte ermittelt, die nach DIN 17 100 nicht gefordert werden und teilweise nicht genormt sind. Die Zugproben werden dabei dehngeregelt in den Verfestigungsbereich des Stahls und weggeregelt bis zum Bruch belastet. Der Versuch läuft in vier Phasen ab und ist Tabelle 4.1 und Bild 4.2 zu entnehmen.

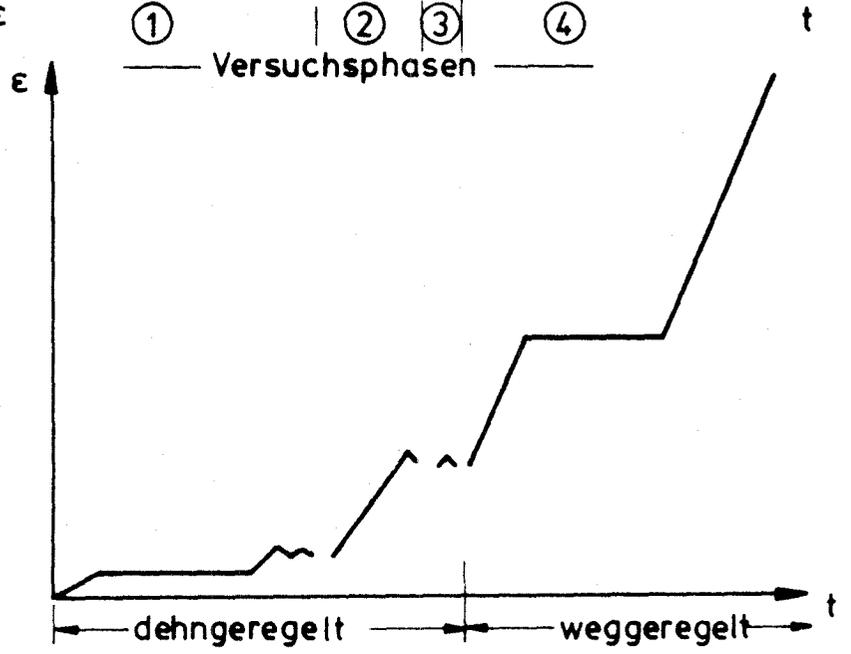
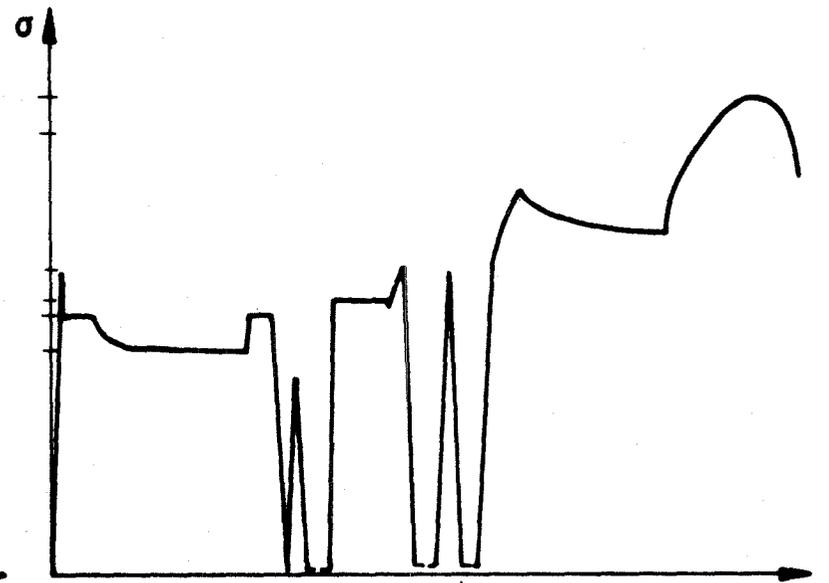
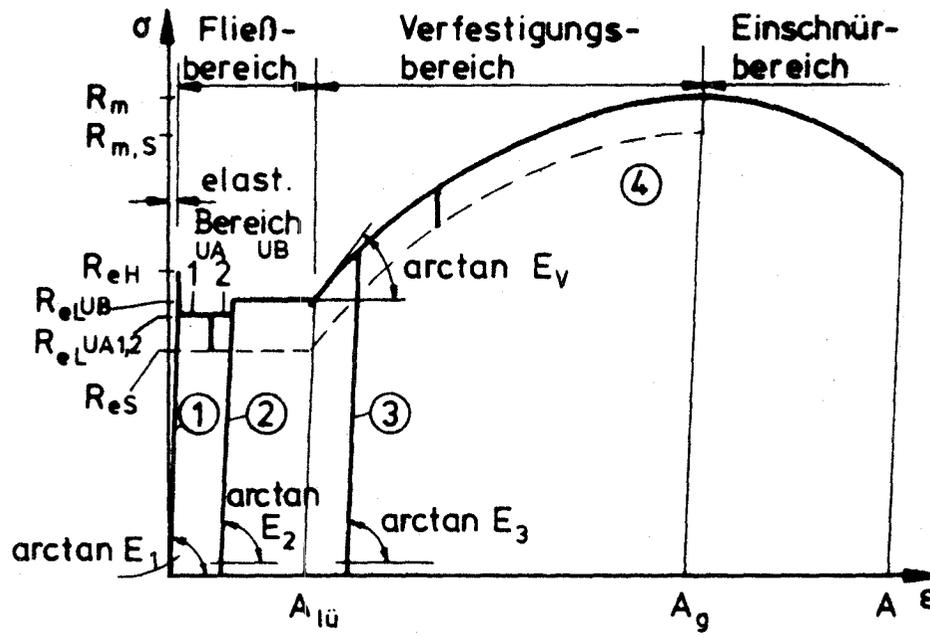
Jeder Versuch wird von einem Rechner ausgewertet. Das zugehörige Programm und die Vorgehensweise zum Bestimmen der Kenngrößen ist im Anhang A1 beschrieben.

Die Versuchsergebnisse werden vom Programm in eine Transferdatei übertragen und anschließend in eine Datenbank mit dem Arbeitstitel "Fremdprüfung" (Anhang A2, Seite 163) eingelesen. Dort werden neben den Versuchsergebnissen auch zusätzliche Informationen wie z.B. Stahlsorte eingegeben. Eine Übersicht über die aufgenommenen Daten ist Anhang A1 in den Bildern A1.11 - A1.14 (Seite 163-164) zusammengestellt.

Vers.-phase	Regelgröße	Geschw. /%./s/ /mm/s/	Meßber. Dehnaufn. Wegaufn.	Beschreibung	Ermittlung von
1	ϵ	1/60 0 1/60	+/- 5 %	Die Probe wird dehngeregelt in den Fließbereich gefahren. Bei $\epsilon = 4\%$ wird die Dehnung für 10 min konstant gehalten und anschließend bis $\epsilon = 5\%$ weitergefahren. Danach wird entlastet und nochmals bis zu einer Spannung unterhalb der statischen Streckgrenze be- und entlastet	Vor Haltepause: E - Modul E_1 0,2 % Dehngrenze $R_{p0,2}$ obere Streckgr. R_{eH} untere Streckgr. R_{eL} UA1 Während Haltepause: statische Streckgr. R_{eS} Nach Haltepause: untere Streckgr. R_{eL} UA2 E - Modul E_2
2	ϵ	5/60	+/- 50 %	Die Probe wird dehngeregelt mindestens 3 % in den Verfestigungsbereich gefahren und danach entlastet.	untere Streckgr. R_{eL} UB Lüdersdehnung $A_{l\ddot{u}}$ Verfestigungsmod. E_v
3	ϵ	1/60	+/- 5 %	Es wird einmalig im Verfestigungsbereich be- und entlastet	E - Modul E_3
4	w	2.5/60 - 10 /60	+/- 50 mm	Die Probe wird weggeregelt bis zum Bruch gefahren. Die Querhauptweggeschwindigkeit der Prüfmaschine wird so eingestellt, daß die Dehngeschwindigkeit ca. 1 %/s entspricht. Bei $\epsilon = 60-75\%$ wird der Querhauptweg für 10 min konstant gehalten.	Zugfestigkeit R_m Gleichmaßdehnung A_g Parameter der Ludwigsleichung: Verfestigungsexp. n Konstante k_1 Bruchdehnung A stat. Zugfestigk. $R_{m,S}$

Tabelle 4.1. Geschwindigkeiten, Meßbereiche und Materialkennwerte

Bild 4.2. Spannungs-Dehnungs-Zeit-Diagramm des Prüfmodus



5 BLINDPRUFUNG

5.1 ALLGEMEINES

Die Materialkennwerte der Bescheinigungen werden gelegentlich angezweifelt, weil Ergebnisse von Prüfungen an Stählen z.B. nach Schadensfällen oder nach begründeten Beanstandungen teilweise erheblich von den Materialkennwerten aus den Bescheinigungen abweichen.

Neben einer Verwechslungsmöglichkeit der Stähle kann die Genauigkeit der Prüfungen unzureichend sein. Die möglichen Einflüsse und die zugehörige Regelung in den Fachnormen sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1. Einflüsse auf die Materialkennwerte

Einfluß	Regelung in
Probenform	DIN 50 125
Probenlage (längs/quer zur Walzrichtung)	DIN 17 100
Entnahmeort	DIN 17 100
Herstellung der Probe	DIN 50 125
Belastungseinrichtung	DIN 51 221
Regelungsart (Kraft-, Weg- oder Dehnr.)	keine
Versuchsgeschwindigkeit	DIN 50 145
Ablesegenauigkeit	DIN 51 221

Mit nur einem Zugversuch und den festgelegten Entnahmeort werden Streuungen durch Inhomogenitäten des Stahls innerhalb eines Erzeugnisses, die sog. Binnenstreuung, nicht erfaßt /15,24/.

Ein großer Spielraum ist bei der Versuchsdurchführung zugelassen, z.B. kann die Dehngeschwindigkeit beim Bestimmen der Zugfestigkeit bis zu 7 %/s betragen. Auch können subjektive Einflüsse beim Ablesen bzw. unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen die Ergebnisse beeinflussen.

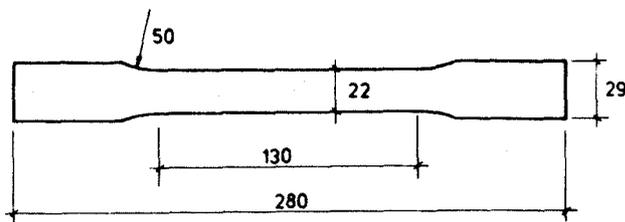
Zur Ermittlung dieser Einflüsse wurden zwei Untersuchungen durchgeführt:

1. Es wurden verschiedene Materialprüfanstalten durch Mittelsmänner beauftragt, Zugversuche an Proben, die aus einer Blechtafel entnommen wurden, durchzuführen.
2. Zugversuche an Proben aus jeweils einer Schmelze, die in der Datenbank "Bescheinigungen" gespeichert sind, wurden miteinander verglichen.

5.2 BLINDPRÜFUNG UND VERGLEICH ZUM PRÜFMODUS

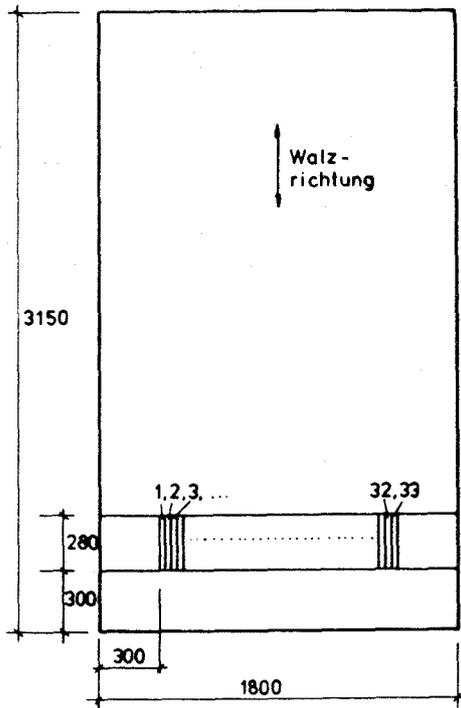
Aus einer Blechtafel 7*1800*3150 mm wurden 33 Flachproben hergestellt. Die Zugproben wurden in Walzrichtung entnommen und von 1 bis 33 nummeriert (Bild 5.1). Jede 2. Probe, also die 1., 3., 5. usw., wurde mit dem im Abschnitt 4 und in Anlage A1 beschriebenen Prüfmodus geprüft (Eigenprüfung). Die anderen wurden von Mittelsmännern an insgesamt 8 verschiedene Materialprüfanstalten verschickt.

Zuerst wurde eine erste Probe mit einer Standardfragestellung (Fragestellung "A") verschickt. Die hierbei geforderten Materialkennwerte werden in den Bescheinigungen über Materialprüfungen angegeben.



Wir bitten um Feststellung

- der Streckgrenze
 - der Zugfestigkeit und
 - der Bruchdehnung
- für die beiliegende Flachprobe.



Erst nach Vorliegen der Ergebnisse der ersten Probe wurde eine zweite Probe mit einer erweiterten Fragestellung (Fragestellung "B") versandt:

Wir bitten um Feststellung

- der Streckgrenze
 - der Zugfestigkeit
 - der Bruchdehnung
 - des Elastizitätsmoduls
 - der statischen Streckgrenze und
 - der Gleichmaßdehnung
- für die beiliegende Flachprobe.

Bild 5.1. Probengeometrie und Entnahmeplan für die Blindprüfung aus einer Blechtafel 7*1800*3150 mm

Durch dieses Vorgehen mit dem Arbeitstitel "Blindprüfung" wurde zum einen die Genauigkeit der Ergebnisse der Materialprüfanstalten und zum anderen durch Vergleich mit der Eigenprüfung der Prüfmodus getestet.

Die Anforderungen an den Versuchsaufbau und an die Genauigkeit waren bei der Fragestellung "B" erheblich größer. Um gleiche Anforderungen an die Prüfapparatur zu stellen, wie sie auch für

die Standardprüfungen angesetzt werden, erschien es deshalb notwendig, zuerst nur die Kennwerte bestimmen zu lassen, die auch in den Bescheinigungen aufgeführt werden (Fragestellung "A"). Der Versendungsplan der Proben wurde gemäß Bild 5.1 und Tabelle 5.2 festgelegt.

Die Meßlänge der Zugproben entsprach nicht der nach DIN 50 125 geforderten Meßlänge eines kurzen Proportionalstabes, weil bei E-Modulmessungen zur Erzielung ausreichender Genauigkeiten größere Meßlängen sinnvoll sind. Die Anfangsmeßlänge zur Ermittlung der Bruchdehnung A_5 (Geometrie eines kurzen Proportionalstabes) wurde nicht markiert.

Tabelle 5.2. Versendungsplan

Materialprüfanstalt	1	2	3	4	5	6	7	8	-
Fragestellung "A"	2	6	10	14	18	22	26	30	-
Fragestellung "B"	4	8	12	16	20	24	28	32	-

Sämtliche geforderten Materialkennwerte nach Fragestellung "B" wurden lediglich von einer Materialprüfanstalt ermittelt. Von 8 geforderten Werten wurde die statische Streckgrenze 2 mal, die Gleichmaßdehnung und der E-Modul jeweils 6 mal ermittelt. Es wird daraus deutlich, daß speziell die statische Streckgrenze als Materialkennwert nur von wenigen Materialprüfanstalten ermittelt werden kann, bzw. für sie ein Begriff ist.

Die Ergebnisse sind der Tabelle 5.3, sowie den Bildern 5.2 - 5.4 zu entnehmen.

Vergleicht man die Werte auf den Bildern, kann festgestellt

werden, daß sie über die Breite der Blechtafel nahezu konstant sind, also keine Tendenz nach oben oder unten aufweisen.

Die Vertrauensbereiche für die Erwartungswerte \bar{x} in Tabelle 5.3 bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % sind nach Sachs /4/

$$VB(\bar{x}) = \bar{x} \pm t_{0.05, n-1} \sigma_{n-1} / \sqrt{n-1} \quad (5.1)$$

mit \bar{x} = Mittelwert und σ_{n-1} = Standardabweichung.

Die Genauigkeit der Prüfungen ist im Vergleich der Streuungen der Ergebnisse Fragestellung "A" zu "B" nicht signifikant unterschiedlich. Auch lassen die Vertrauensbereiche (letzte und vorletzte Spalte der Tabelle 5.3) im Vergleich zu den Prüfungen im Institut (Eigenprüfung) den Schluß zu, daß die Ergebnisse keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Lediglich bei der Zugfestigkeit kann festgestellt werden, daß die Werte aus der Blindprüfung im Vergleich zur Eigenprüfung etwas höher liegen, was auf eine größere Belastungsgeschwindigkeit zurückgeführt wird, die bei der Eigenprüfung mit ca. 1 %/s (zulässig bis zu 7 %/s) relativ niedrig lag.

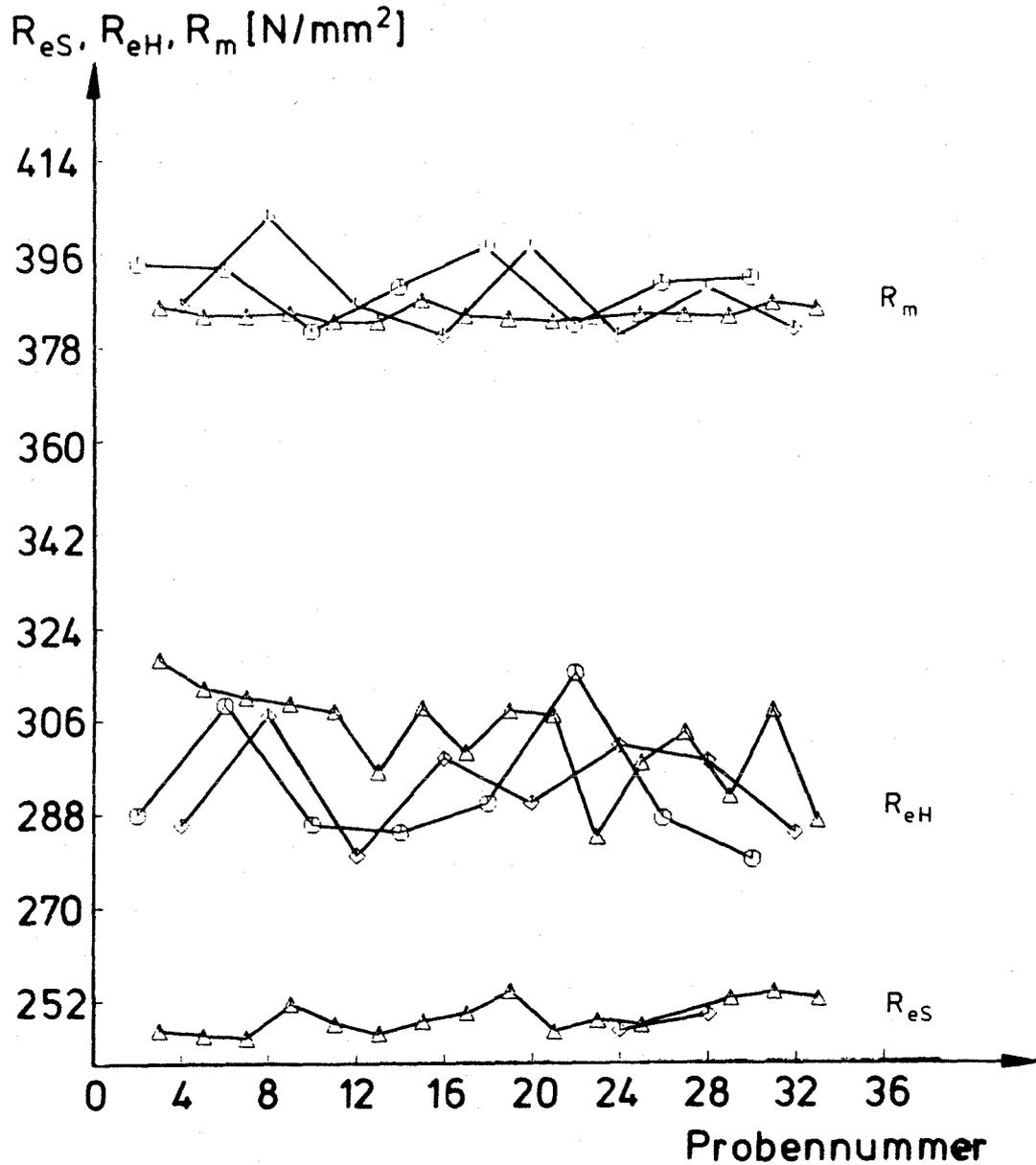
Die Streuung der Festigkeitskennwerte der statischen und oberen Streckgrenze sowie der Zugfestigkeit (Bild 5.2) liegen im üblichen Bereich, der für die Streuung innerhalb einer Blechtafel erwartet wird /15,18/. Die obere Streckgrenze streut im Vergleich zu den anderen Werten etwas mehr, was aber durch ihre Empfindlichkeit infolge von Prüfeinflüssen erwartet wurde. Entsprechendes gilt für Gleichmaß- und Bruchdehnung (Bild 5.3).

Die Bestimmung des E-Moduls (Bild 5.4) erfolgte in den Materialprüfanstalten größtenteils graphisch aus der Kraft-Dehnungs-Kurve durch Abgreifen der Werte "von Hand". Die Dehnmeßgeräte waren Dehnaufnehmer, in einem Fall ein Dehnungsmeßstreifen. Hier wurde der E-Modul zu 190000 N/mm^2 bestimmt, der im Vergleich zu den anderen Messungen zu klein ist.

Tabelle 5.3. Auswertung der Blind- und Eigenprüfung

	Mittelwert \bar{x}	Standardabweich. σ_{n-1}	Anzahl Vers. n	Variationskoeffizient v /%/	95%-Vertrauensbe. f. \bar{x}	
					unt.	Gr. ob.
Frage "A"	292.3	12.7	8	4.3	282.0	302.7
"B" R_{eH}	293.1	9.5	8	3.2	285.4	300.8
Eigenpr. /N/mm ² /	302.9	9.7	16	3.2	296.6	309.2
Zusammen	297.8	11.3	32	3.8	293.7	301.9
Frage "A"	389.7	5.6	8	1.4	385.1	394.3
"B" R_m	387.8	8.4	8	2.2	381.0	396.6
Eigenpr. /N/mm ² /	384.2	1.2	16	0.3	383.5	384.8
Zusammen	386.5	5.4	32	1.4	384.6	388.4
Frage "A"	424.6	16.9	8	4.0	410.8	438.4
"B" A_5	416.5	34.5	8	8.3	388.4	444.4
Eigenpr. /%/	428.1	8.3	14	1.9	423.3	432.9
Zusammen	424.1	20.2	30	4.4	416.6	431.6
Frage "B"	247.5	2.1	2	0.9	-	-
Eigenpr. R_{eS}	248.7	3.0	15	1.2	247.0	250.4
Zusammen /N/mm ² /	248.6	2.9	17	1.2	247.1	250.1
Frage "B"	221.7	14.4	6	6.5	207.3	236.1
Eigenpr. A_g	210.7	5.9	14	2.8	207.3	214.1
Zusammen /%/	214.0	10.3	20	4.8	209.2	218.8
Frage "B"	204600	7900	6	3.9	196700	212500
Eigenpr. E_1	205900	1200	16	0.6	205300	206500
Zusammen /N/mm ² /	205500	4000	22	1.9	203700	207300
-- Eigenprüfung --						
E_2 /N/mm ² /	204500	5000	16	2.4	201900	207200
E_3 /N/mm ² /	201300	6600	10	3.1	196600	206600
R_{eL} UA1 /N/mm ² /	266.0	3.7	16	1.4	264.0	268.0
R_{eL} UA2 /N/mm ² /	264.1	3.6	16	1.4	262.2	265.0
R_{eL} UB /N/mm ² /	268.4	3.3	16	1.2	266.7	270.1
$A_{1ü}$ /%/	24.7	2.4	15	9.7	23.4	26.0
E_v /N/mm ² /	4300	1500	15	34.9	3475	5125

Alle von den Materialprüfanstalten ermittelten Materialkennwerte streuen mit Variationskoeffizienten unter 5 % wenig. Auch im Vergleich zur Eigenprüfung konnten keine signifikanten Unterschiede



Darstellung der Kurve	Bezeichnung
—○—○—○—○—	Fragestellung "A"
—△—△—△—△—	Eigenprüfung
—◇—◇—◇—◇—	Fragestellung "B"

Bild 5.2. Streuung von R_{eS} , R_{eH} und R_m

festgestellt werden. Lediglich beim E-Modul und bei der Bruchdehnung sind fehlerhafte Messungen nicht auszuschließen. Eine Wertung wird später vorgenommen.

Bei der Eigenprüfung zeigte die untere Streckgrenze R_{eLUA1} vor und R_{eLUA2} nach der Haltepause bei einer Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%}/s$ keine signifikanten Unterschiede bei einem Variationskoeffizienten kleiner 2 %. Im Bereich UB nach der Entlastung mit $\epsilon > 5 \text{ \%}$ bis zum Verfestigungsbereich mit $\dot{\epsilon} = 5/60 \text{ \%}/s$ ergaben sich für R_{eLUB} etwas höhere Werte bei Variationskoeffizienten ebenfalls kleiner 2 % (Bild 5.5) (Die Definition der unteren Streckgrenzen ist im Abschnitt 4.2 nachzulesen).

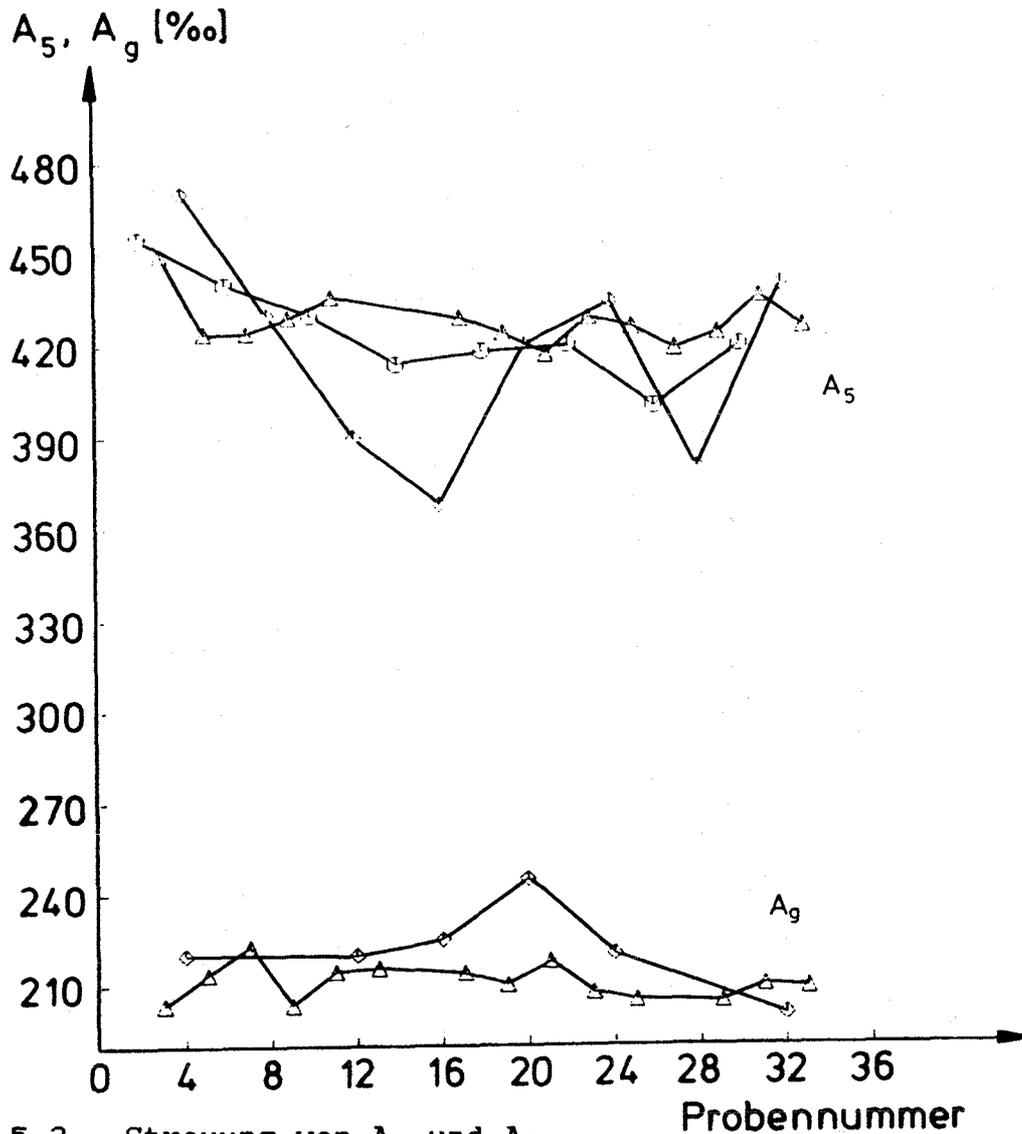


Bild 5.3. Streuung von A_g und A_5

Die Variationskoeffizienten der E-Moduli E_1 , E_2 und E_3 (Bild 5.4) sind mit Werten unter 4% klein. Kontrolluntersuchungen, bei denen der E-Modul an einer Probe bis zu 200 mal wiederholt gemessen wurde, ergaben Variationskoeffizienten unter 1% (Die Definition der einzelnen E-Moduli ist Bild 4.2 zu entnehmen).

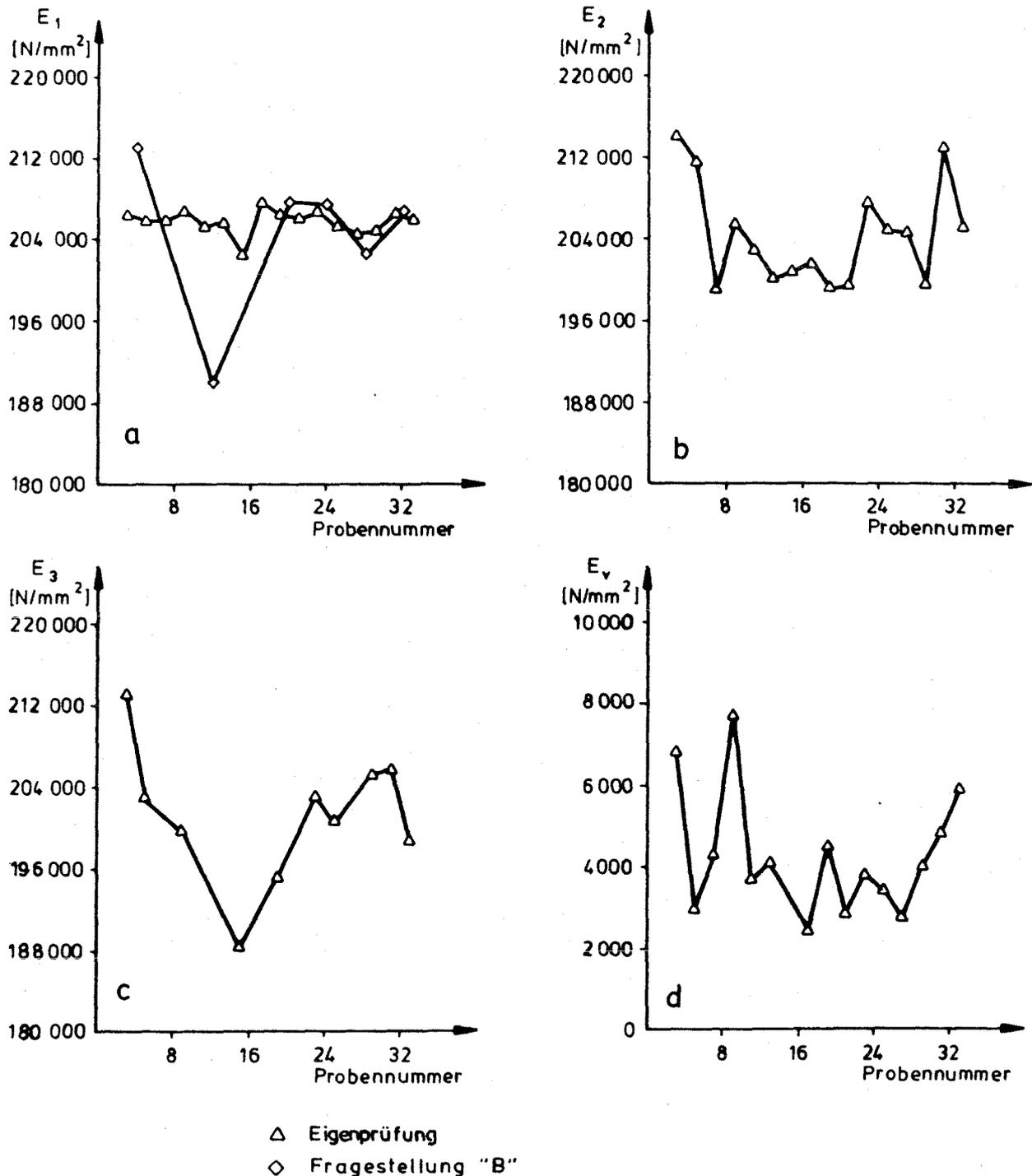


Bild 5.4. Streuung der E-Moduli; a E_1 ; b E_2 ; c E_3 ; d E_v

Der Verfestigungsmodul E_V ist mit einem Variationskoeffizienten von ca. 35% eine Materialkenngröße, die selbst bei Proben aus einer Blechtafel stark streut, da sich durch die Anzahl und Orientierung der Lüdersbänder die Übergangsbereiche verschieden ausbilden /9,11,12/.

Die Lüdersdehnung $A_{Lü}$ mit einem Variationskoeffizienten von ca. 10 % (Bild 5.5) streut entsprechend stark, ist aber für baupraktische Untersuchungen ausreichend genau. Untersuchungen über die Streuung der Lüdersdehnung in /29/ ergaben ähnliche Ergebnisse.

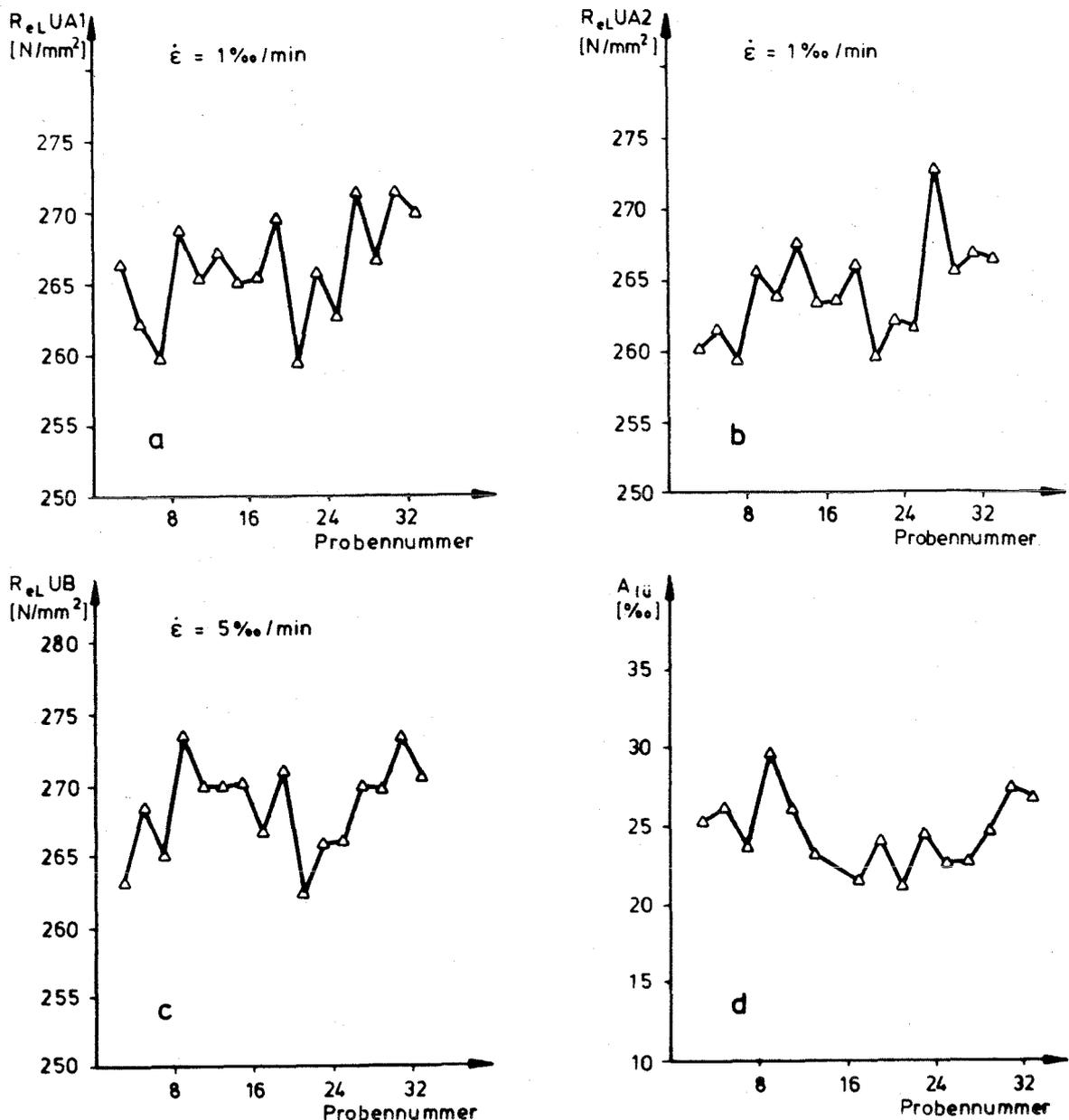


Bild 5.5. Streuung von a R_{eLUA1} ; b R_{eLUA2} ; c R_{eLUB} ; d $A_{Lü}$

5.3 MEHRFACHE PRÜFUNG VON PROBEN AUS EINER SCHMELZE

5.3.1 Allgemeines

Aus einer Schmelze werden mehrere Erzeugnisse, z.B. Blechtafeln oder Walzprofile hergestellt. So ist es möglich, daß verschiedene Bescheinigungen für Erzeugnisse aus einer Schmelze vorliegen können. Auch sind mehrere Versuche bei größeren Lieferumfängen vorgeschrieben.

Eine Vergleichbarkeit ist immer dann gegeben, wenn mindestens zwei Prüfungen an Proben aus einer Schmelze vorliegen. (Kurzbezeichnung: Mehrfachprüfung)

In der Datenbank "Bescheinigungen" (s. Abschnitt 2 und Anhang A2) sind insgesamt 931 Proben aus 422 verschiedenen Schmelzen für den St37 sowie 352 Proben aus 132 verschiedenen Schmelzen für den St52 gespeichert, bei denen die Schmelzennummer und der Hersteller mindestens zweimal gleich sind und die Prüfungen an verschiedenen Materialproben durchgeführt wurden.

Eine Auswertung der Ergebnisse der chemischen Analyse von Mehrfachprüfungen wurde nicht durchgeführt, da sämtliche Werte identisch waren. Es wurde deshalb auch für alle nachfolgenden Auswertungen unterstellt, daß in die Bescheinigungen die Schmelzanalysen aufgenommen wurden (s. Abschnitt 2.2, Seite 4 und 5).

Die Auswertung erfolgte jeweils für die Proben aus einer Schmelze mit gleichen Soll-Erzeugnisdicken und gleicher Erzeugnisform (Blech, Flachstahl oder Walzprofil). Auch wurden die Bescheinigungen jeweils einer Schmelze von einer Materialprüfanstalt ausgestellt.

Ein Einfluß der Erzeugnisdicke, der Erzeugnisform und durch unterschiedliche Prüfanordnungen infolge von Prüfungen in verschiedenen Materialprüfanstalten auf die Ergebnisse konnte somit ausgeschlossen werden.

5.3.2 Vergleich der Ergebnisse

Ein Maß für die Streuung ist der Standardfehler s_F der Werte um die Regressionsgerade.

Der Standardfehler s'_F der Ergebnisse y_{ij} kann angegeben werden zu

$$s'_F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - y_{Fj})^2}{\sum_{j=1}^m (n_j - 1)}}, \quad (5.2)$$

wenn der wahre Materialkennwert y_{Fj} jeder Schmelze j ($j = 1, m$) bekannt ist. n_j ist die Anzahl der Prüfungen der Schmelze j mit $n_j > 1$. Da y_{Fj} unbekannt ist, wird y_{Fj} durch den Mittelwert $\bar{y}_j = 1/n_j \cdot \sum y_{ij}$ angenähert. Der Standardfehler \bar{s}_F ist unter der Voraussetzung Korrelationskoeffizient $\rho = 1$

$$\bar{s}_F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y}_j)^2}{\sum_{j=1}^m (n_j - 1)}}. \quad (5.3)$$

Für $\rho \neq 1$ wird der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen y_{ij} und \bar{y}_j mit einem linearen Regressionsansatz

$$f(\bar{y}_j) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \bar{y}_j \quad (5.4)$$

beschrieben mit dem Standardfehler um die Regressionskurve

$$s_F = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{n_j} (y_{ij} - (a_0 + a_1 \bar{y}_j))^2}{\sum_{j=1}^m (n_j - 1)}}. \quad (5.5)$$

a_0 und a_1 werden mit der Fehlerquadratmethode ermittelt /2,3,4/.

Für $\rho = 1$, $a_0 = 0$ und $a_1 = 1$ ist $\bar{s}_F = s_F$. Da in allen Fällen $\rho \neq 1$ ist, wird s_F mit dem Regressionsansatz nach Gl. 5.4 und 5.5 berechnet. Es wird hierbei vorausgesetzt, daß die Residuen $y_{ij} - (a_0 + a_1 \bar{y}_j)$ normalverteilt mit den Parametern $(0, s_F)$ sind.

In den Bildern 5.6 und 5.7 sind die Ergebnisse y_{ij} in Abhängigkeit von den Mittelwerten \bar{y}_j für R_{eH} , R_m , A_5 und A_K getrennt für die Stähle St37 und St52 dargestellt. Die Auswertung für s_F in Tabelle 5.4 erfolgte mit dem Regressionsansatz nach Gl. 5.5. Der Standardfehler s_F^u für den Regressionsansatz $f(y_{ij}) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 y_{ij}$

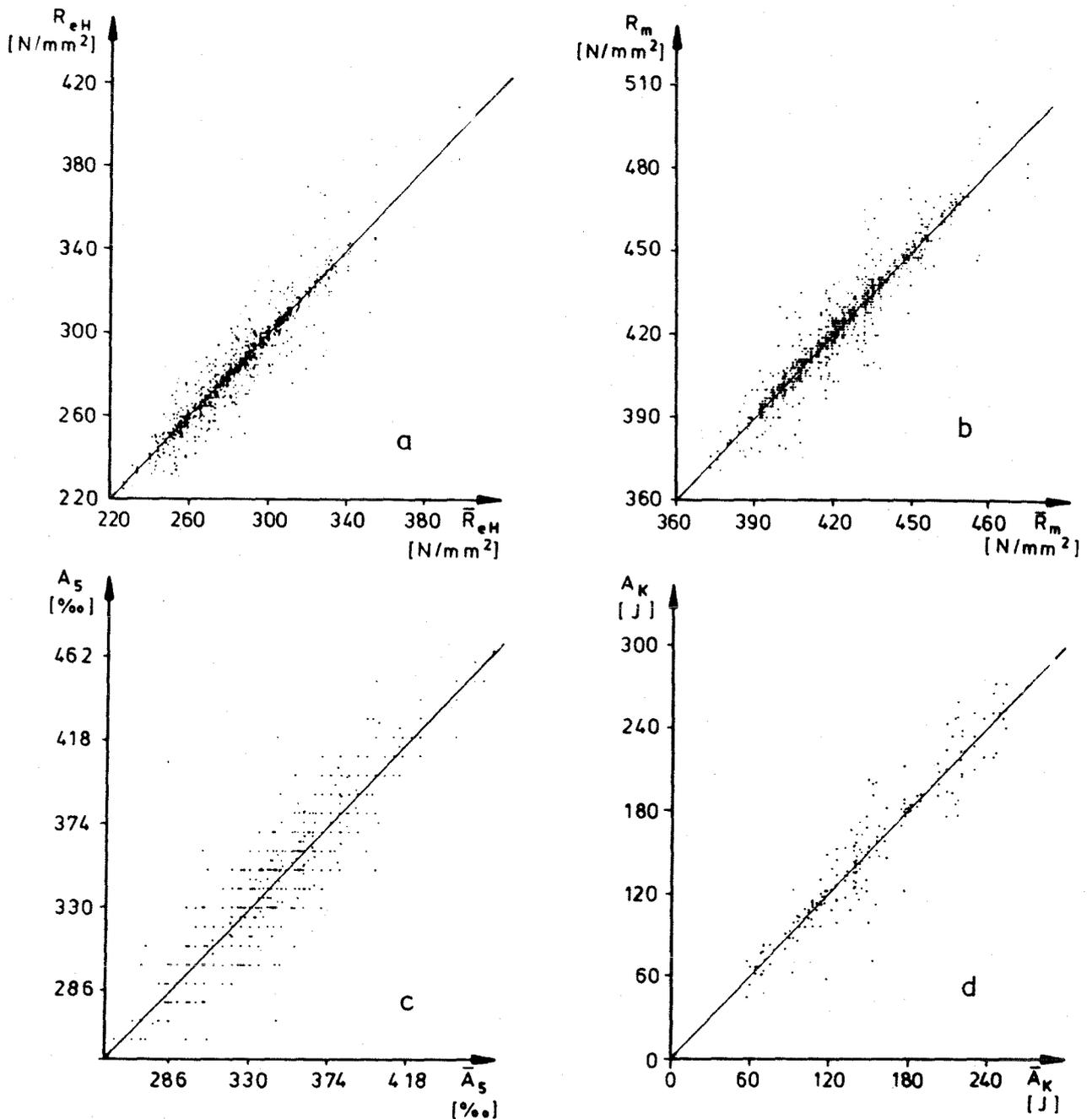


Bild 5.6. Abhängigkeit der Ergebnisse von den Mittelwerten der Schmelzen für den St37; a R_{eH} ; b R_m ; c A_5 ; d A_K

wurde nicht berechnet, weil die Korrelationskoeffizienten (s. Tabelle 5.4) groß sind und sich somit keine signifikanten Unterschiede für s_F'' und s_F ergeben.

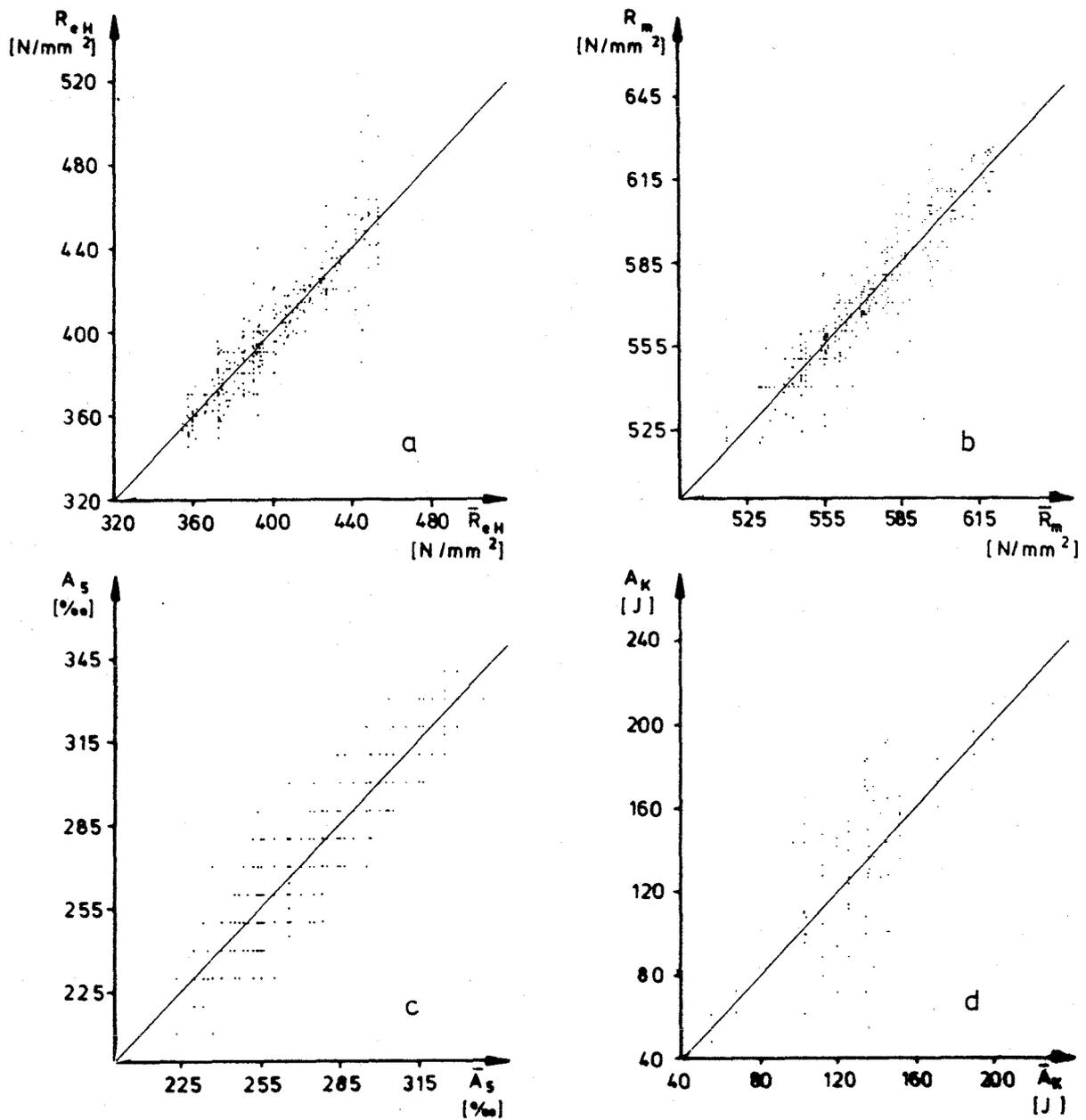


Bild 5.7. Abhängigkeit der Ergebnisse von den Mittelwerten der Schmelzen für den St52; a R_{eH} ; b R_m ; c A_5 ; d A_K

Tabelle 5.4. Auswertung der Ergebnisse

Material- kennwert	Stahl- sorte	Anzahl	Standard- fehler s_F	Korrelations- koeffizient
R_{eH}	St37	931	8.4 N/mm ²	0.95
R_m		931	6.4 N/mm ²	0.95
A_5		931	12.8 ‰	0.94
A_k		234	16.5 J	0.95
R_{eH}	St52	352	11.9 N/mm ²	0.91
R_m		352	8.6 N/mm ²	0.95
A_5		352	11.4 ‰	0.91
A_k		76	28.5 J	0.70

5.4 VERGLEICH BLINDPRÜFUNG - MEHRFACHPRÜFUNG

Die Standardabweichung σ_{n-1} aus Tabelle 5.3 und der Standardfehler s_F aus Tabelle 5.4 geben die Streuung der Ergebnisse an und sind vergleichbar. In Tabelle 5.5 sind σ_{n-1} und s_F zusammengestellt.

Die Ergebnisse können durch die Versuchsdurchführung und die Meßfehler sowie die Binnenstreuung innerhalb eines Erzeugnisses auftreten. Einflüsse durch die Probenentnahme oder die Erzeugnisform werden vernachlässigt.

Die Materialkennwerte können innerhalb einer Schmelze bei gleichen Entnahmekarten und Erzeugnisdicken unterschiedlich sein. Als Maß wird der Standardfehler s_F herangezogen.

Setzt man für alle Fehlermöglichkeiten jeweils Unabhängigkeit zu den anderen Fehlern voraus, so ist nach /2,3,4/ näherungsweise

$$\sigma_G^2 = \sigma_M^2 + \sigma_B^2 + \sigma_E^2 \quad (5.6)$$

mit

σ_M = Streuung der Ergebnisse zwischen den Materialprüfanstalten,

σ_B = Binnenstreuung innerhalb eines Erzeugnisses,

σ_E = Streuung zwischen verschiedenen Erzeugnissen aus einer Schmelze,

σ_G = Gesamtstreuung infolge σ_M , σ_B und σ_E .

Mit den Bezeichnungen in der 2. Spalte der Tabelle 5.5 kann die Gesamtstreuung näherungsweise abgeschätzt werden:

$$\begin{array}{rcl} \sigma_M^2 & + s_2^2 & = s_1^2 \\ \sigma_B^2 & & = s_2^2 \\ \sigma_E^2 & + s_2^2 & = s_3^2 \end{array}$$

$$\sigma_G^2 = s_1^2 - s_2^2 + s_3^2 \quad (5.7)$$

Der 95% Vertrauensbereich für einen Meßwert x ist

$$VB(x) = x \pm 1.96\sigma_G = x \pm s_4 \quad (5.8)$$

Tabelle 5.5. Zusammenstellung der Streuungen

	Bez.	R_{eH} /N/mm ² /	R_m /N/mm ² /	A ₅ /‰/
Frage- stellung	"A"	12.7	5.6	16.9
	"B"	9.5	8.4	34.5
	"A"und"B" s ₁	11.2	7.1	27.2
Eigenprüfung	s ₂	9.7	1.2	8.3
Mehrfach- prüfung	St37	8.4	6.4	12.8
	St52	11.9	8.6	11.4
	St37+St52 s ₃	9.5	7.1	18.4
Gesamtstreuung nach Gl.5.7		11.0	10.0	28.7
95%-Vertrauens- bereich nach Gl.5.8	s ₄	21.6	19.6	56.3

Der Vertrauensbereich der Gesamtstreuung σ_G ist ein Maß für die Güte der Materialprüfungen, d.h. der tatsächliche Materialkennwert streut in 95% aller Fälle mit s_4 um den in den Bescheinigungen ausgewiesenen Wert. So schwankt in 95% aller Fälle R_{eH} mit ± 21.6 N/mm² um die von einer Materialprüfung bekannte Streckgrenze eines anderen Halbzeuges aus der gleichen Schmelze. Anders ausgedrückt: Kennt man die Ergebnisse eines Zugversuches an einer Probe, so können für andere Erzeugnisse aus derselben Schmelze die Ergebnisse von Zugversuchen mit dem Vertrauensbereich in Tabelle 5.5 vorhergesagt werden. Durch die fehlerhafte Messung der Bruchdehnung bei der Blindprüfung ist jedoch der Vertrauensbereich verhältnismäßig groß. Werden die wahrscheinlich fehlerhaften Messungen eliminiert, verkleinert sich der Vertrauensbereich nach Tabelle 5.5 auf ca 50 % .

6 AUSWERTUNG DER ERGEBNISSE DER FREMDPRÜFUNG

6.1 ALLGEMEINES

Im Vordergrund der Auswertung der Ergebnisse steht die Streckgrenze, da sie in den heutigen Normen der maßgebende Bemessungswert ist.

Auch für zukünftig erlaubte Nachweise elastisch-plastisch und plastisch-plastisch wird der Fließbereich, jedoch nicht der Verfestigungsbereich, berücksichtigt. Er gilt als "stille Reserve", die in vielen Fällen bereits heute bewußt ausgenutzt wird. Man denke z.B. an Schraubenlöcher, wo Spannungsspitzen im Nettoquerschnitt durch Plastizieren des Stahls bis in den Verfestigungsbereich hinein abgebaut werden.

In diesem Abschnitt werden entsprechend dem Ablauf im Zugversuch nacheinander der elastische Bereich, der Fließbereich, der Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich und der Verfestigungsbereich ausgewertet. Im Anschluß wird die Frage nach der Abhängigkeit der Materialkennwerte von der Erzeugnisform und die Korrelation der Materialkennwerte untereinander behandelt.

6.2 BESTANDSAUFNAHME

Es wurden insgesamt 395 Halbzeuge entnommen, die eine Stichprobe aus der Grundgesamtheit nach Abschnitt 2.3 darstellen. Tabelle 6.1 gibt einen Überblick über die aufgenommenen Halbzeuge. Die Einteilung hinsichtlich der Stahlsorte erfolgte nach den Angaben der Betriebe.

Tabelle 6.1. Verteilung der Stichprobenelemente

Erzeugnisform	St37	St52
Flachstähle	55	8
Bleche	111	60
Walzprofile	141	20
Gesamt	307	88

Die erfragten Angaben zu den Stichproben konnten zwar - wie auf Rückfrage bestätigt - in vielen Fällen zum Zeitpunkt der Lieferung in die Betriebe angegeben werden, gingen jedoch auf dem Weg vom Lager in die Fertigung verloren.

Sie wären für die meisten Stähle erhältlich gewesen, wenn der Materialfluß von der Lieferung bis zum endgültigen Einbau in ein Bauwerk überwacht worden wäre (s.a. Abschnitt 3.3.2). Es wurde jedoch darauf verzichtet, weil die Gefahr bestand, daß die Stähle ohne die gewünschten Angaben von den Betrieben aussortiert worden wären.

Insgesamt wurden nur für 28 Halbzeuge Bescheinigungen vorgelegt.

6.3 VERWECHSELUNGEN UND AUSREISSER

Verwechslungen der Stahlsorte können nicht ausgeschlossen werden (s. Abschnitt 3.2). Auch kann nicht ausgeschlossen werden, daß in Fällen, in denen Stähle ohne Bescheinigungen, also ohne nachgewiesene Qualitätskontrolle eingebaut werden, die Bedingungen der DIN 17 100 nicht erfüllt sind.

Versteht man die durchgeführten Versuche als Qualitätskontrolle

"vor Ort", müssen die Grenzwerte von DIN 17 100 als Abnahmekriterium herangezogen werden (s. Tabelle 2.3). In Tabelle 6.2 ist die Anzahl der zurückzuweisenden und die Gesamtanzahl aller Erzeugnisse zusammengestellt. Die Bruchdehnung A_5 war in allen Fällen größer als der Mindestwert nach DIN 17 100. Deshalb ist sie als Abnahmekriterium nicht mit aufgeführt worden.

Tabelle 6.2. Vergleich der zurückzuweisenden Erzeugnisse zur Gesamtanzahl aller Erzeugnisse

Kriterium	t /mm/	St37		St52	
		zurück- zuweisen	Ge- samt	zurück- zuweisen	Ge- samt
R_{eH} bzw. $R_{p0,2}$	$<0 - \leq 16$	6	240	5	58
	$<16 - \leq 40$	1	56	2	30
	$<40 - \leq 63$	0	11	0	0
	gesamt	7	307	7	88
$< \min R_m$		2	307	3	88
$> \max R_m$	-	37	307	4	88

Von den Erzeugnissen, die bei einer Abnahmeprüfung zurückgewiesen werden müßten, werden diejenigen als verwechselt definiert, die die Grenzwerte jeweils der anderen Stahlsorte (St37 bzw. St52) erfüllen.

11 Stähle, die als St37 in die Stichprobe aufgenommen wurden, erfüllen die Bedingungen für den St52 und 2 Stähle des St52 die Bedingungen des St37.

Es wurden auch andere Stahlsorten verarbeitet, die weder als St37 noch als St52 eingestuft werden können. Jedoch nur die Fälle, bei

denen offensichtlich eine Verwechslung der Stahlsorte nach der Definition vorlag, wurden in der Auswertung gesondert berücksichtigt.

Zwei Stähle, die als St52 geliefert wurden, konnten von dem betroffenen Betrieb nicht eingebaut werden, weil sie praktisch nicht bearbeitbar waren. Diese Stähle wurden ebenfalls geprüft. Sie haben Zugfestigkeiten über 1000 N/mm^2 und sind nicht in die Gruppe St52 einzuordnen. Beide wurden in die Datenbank aufgenommen, jedoch für alle weiteren Auswertungen nicht berücksichtigt.

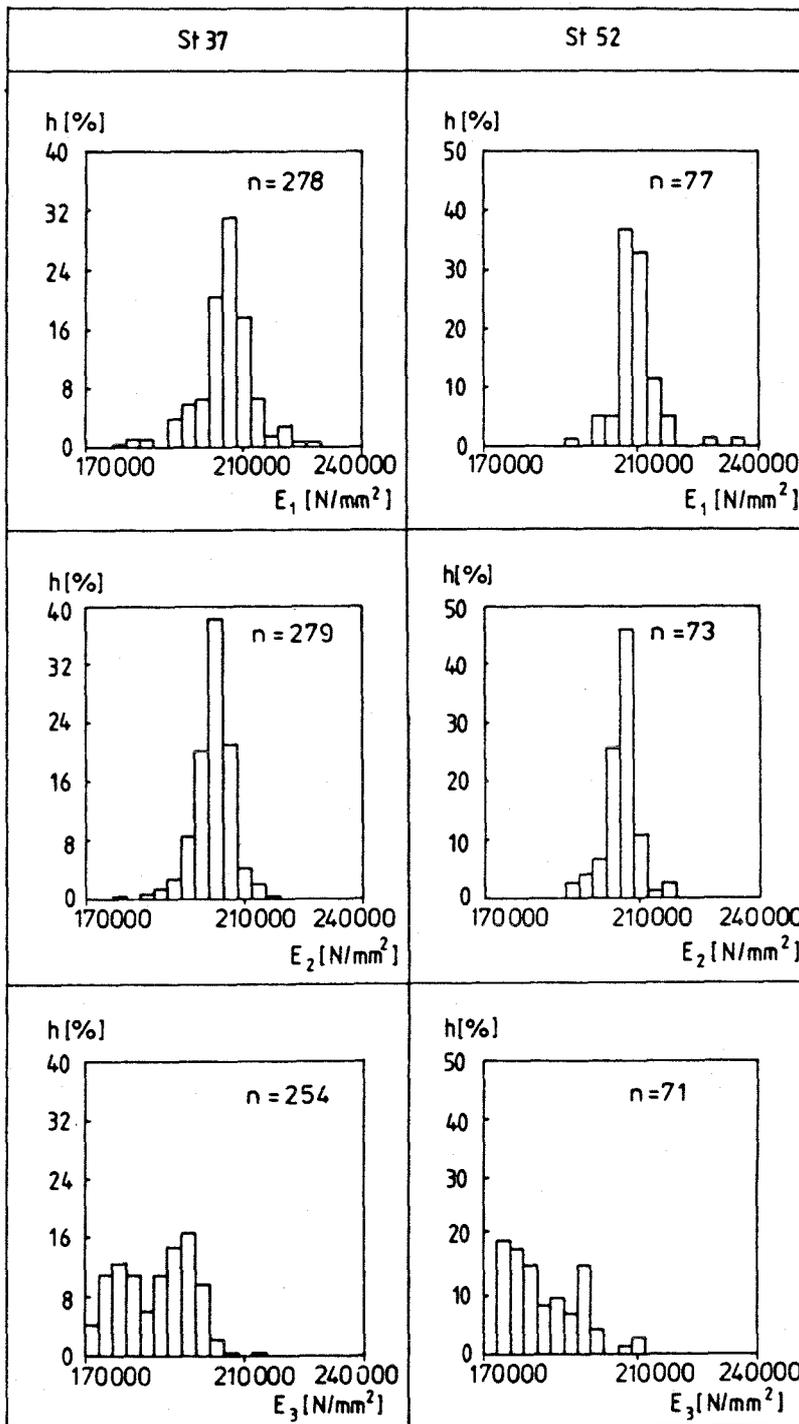
Die Auswertung wurde getrennt für die Stahlsorten St37 und St52 durchgeführt, wobei die Stähle getrennt mit und ohne Berücksichtigung der als verwechselt definierten Stähle untersucht wurden.

Die Tabellen sind entsprechend Abschnitt 2 aufgebaut. Die Parameterbeschreibung ist Abschnitt 2.6.4.2, Seite 30 zu entnehmen.

6.4 ELASTISCHER BEREICH

Wird eine Stahlprobe belastet, verhält sie sich zunächst elastisch und folgt beim allgemeinen Baustahl dem Hooke'schen Gesetz, d.h. einer Geraden. Nichtlinearitäten infolge der Prüfanordnung zu Beginn des Versuches und z.B. durch den Bauschinger Effekt /6,9,38/ vor Erreichen der Streckgrenze wurden bei der Auswertung eliminiert (s. Anhang A1.3.2).

Der E-Modul wurde im elastischen Bereich, im Fließ- und im Verfestigungsbereich bestimmt, wobei jeweils eine Entlastung und eine anschließende Belastung durchgeführt wurde. Der E-Modul wurde in allen drei Bereichen nur bei Belastung mit einer Dehngeschwindigkeit von $1/60 \text{ \%}/\text{s}$ ermittelt, wobei die Meßbasislänge l_0 jeweils nach der Entlastung neu bestimmt wurde und die Dehnung



mit der neu bestimmten Meßbasislänge ermittelt wurde (s. Anhang A1.3.2).

In Bild 6.1 und Tabelle 6.3 sind die Histogramme und Parameter der E-Moduli E_1 , E_2 und E_3 ohne Berücksichtigung der veränderten Flächen zusammengestellt.

Bemerkenswert ist, daß die Streuung der E-Moduli E_1 und E_2 mit Variationskoeffizienten unter 3 % sehr klein ist.

Der E-Modul E_3 zeigt in den Histogrammen eine Mischverteilung und ist im Vergleich zu E_1 und E_2 deutlich kleiner. Dieser Effekt kann an dieser Stelle nicht abschließend geklärt werden. Vermutlich sind Einflüsse der Rekalterung durch die Vorverformung in

Bild 6.1. Histogramme für E_1 , E_2 und E_3

den Verfestigungsbereich hinein die Ursache. Untersuchungen von Lenz /40/ ergaben Einflüsse von Kohlenstoff, Mangan, Aluminium und Stickstoff auf die mechanischen Festigkeitskennwerte infolge der Reckalterung. Durch Diffusion dieser Elemente bildet sich nach einer Vorverformung in den Verfestigungsbereich nach gewisser Zeit wieder ein Fließbereich mit oberer Streckgrenze auf einem höheren Spannungsniveau aus. Da die Versetzungen kurz nach der Vorverformung weniger stark behindert sind, ist der E-Modul des vorgereckten Stahls kleiner. Eine Untersuchung des Einflusses der Reckalterung auf den E-Modul ist nicht bekannt. Es kann aber nach /6,40/ davon ausgegangen werden, daß durch Versetzungsbehinderung infolge Diffusion der Legierungselemente der E-Modul im Verfestigungsbereich nach einer gewissen Zeit wieder steigt. Der E-Modul E_3 wird deshalb als Kennwert nur kurz nach der Vorverformung gedeutet.

Es kann festgestellt werden, daß E_3 deutlich niedriger als E_1 und E_2 ist und mit 5%-Fraktilen unter $175\ 000\ \text{N/mm}^2$ ca. 20 % unter dem in DIN 18 800 Teil 1 festgelegten charakteristischen Wert von $210\ 000\ \text{N/mm}^2$ liegt.

Die Auswertung in Tabelle 6.3 wurde getrennt für die Stähle St37 und St52 durchgeführt, weil angenommen wurde, daß durch die unterschiedlichen Gehalte an Legierungselementen der E-Modul unterschiedlich sein kann.

Der E-Modul ist beim St52 etwas größer als beim St37, was auf die höhere Versetzungsdichte infolge des höheren Gehaltes an Legierungselementen zurückgeführt wird. Die 50%-Fraktile liegt mit $206\ 000\ \text{N/mm}^2$ bzw. $209\ 000\ \text{N/mm}^2$ für die Stähle St37 bzw. St52 etwas unterhalb des charakteristischen Wertes nach DIN 18 800 Teil 1 von $210\ 000\ \text{N/mm}^2$. Es ist jedoch anzumerken, daß sowohl die Lasten als auch die Widerstände bei der Umstellung der Normen auf die SI-Einheiten mit dem Faktor 10 - anstatt 9.81 - umgerechnet wurden. Rechnerisch würden somit die 50%-Fraktilen beider E-Moduli den charakteristischen Wert einhalten.

Tabelle 6.3. Parameter der Verteilungsfunktionen und Fraktilewerte der E-Moduli E_1 , E_2 und E_3

	Anzahl	Fkt. Typ	Parameter			K/S-Testgr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- St37 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_1 /N/mm ² /	278	SFK	179800	227600		0.102	193700	205900	214800
		NV	205500	6900			194200	205500	216900
		LNV	11.49	0.072	107500		0.108	194500	205400
E_2 /N/mm ² /	279	SFK	177500	216200		0.053	194100	202900	209200
		NV	202400	4800			194500	202400	210300
		LNV	11.47	0.052	106100		0.063	194300	202200
E_3 /N/mm ² /	254	SFK	170200	206900		0.053	172600	188800	200200
		NV	187800	8800			174900	187800	204600
		LNV	11.24	0.117	111600		0.106	173800	187100
--- St37 mit Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_1 /N/mm ² /	289	SFK	179800	227600		0.100	193800	206100	215700
		NV	205700	6900			194300	205700	217100
		LNV	11.47	0.074	109300		0.105	194700	205700
E_2 /N/mm ² /	290	SFK	177500	216200		0.052	194200	203100	209200
		NV	202500	4800			194600	202500	210300
		LNV	11.47	0.051	106300		0.065	194500	202200
E_3 /N/mm ² /	264	SFK	170200	206900		0.122	172400	188800	200400
		NV	187800	9000			174900	187800	205200
		LNV	11.27	0.116	108900		0.091	173900	187500
--- St52 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_1 /N/mm ² /	77	SFK	192300	233000		0.107	199800	208900	217100
		NV	209200	5400			200400	209200	218100
		LNV	11.13	0.077	141200		0.108	201200	209200
E_2 /N/mm ² /	73	SFK	193800	216800		0.084	195100	205600	210400
		NV	205400	4200			198400	205400	212300
		LNV	11.17	0.061	133900		0.107	198300	205100
E_3 /N/mm ² /	71	SFK	173800	211300		0.177	174500	182600	198500
		NV	185700	9000			173700	185700	206800
		LNV	11.20	0.302	157300		0.072	173800	184400
--- St52 mit Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_1 /N/mm ² /	78	SFK	192300	233000		0.111	199800	208900	217100
		NV	209200	5300			200500	209200	218000
		LNV	10.64	0.125	167300		0.102	201100	208900
E_2 /N/mm ² /	74	SFK	193800	216800		0.083	195100	205700	210400
		NV	205400	4200			198400	205400	212300
		LNV	11.17	0.060	134300		0.091	198800	205500
E_3 /N/mm ² /	73	SFK	173800	211300		0.177	174500	183200	199000
		NV	186000	9100			173800	186000	206900
		LNV	10.21	0.306	157400		0.073	173900	184700

6.5 FLIEßBEREICH

6.5.1 Definition der Streckgrenze

Die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Allgemeinen Baustähle kann nach Bild 4.1 in den elastischen Bereich, den Fließ-, Verfestigungs- und Einschnürbereich unterteilt werden. Durch verschiedene Einflüsse kann sich die Form der Spannungs-Dehnungs-Kurve ändern. So ist die obere Streckgrenze nicht in allen Fällen vorhanden /6,8,9,15/. Bei einigen Stählen ist auch der Fließbereich nicht vorhanden, weil der Stahl bereits bis in den

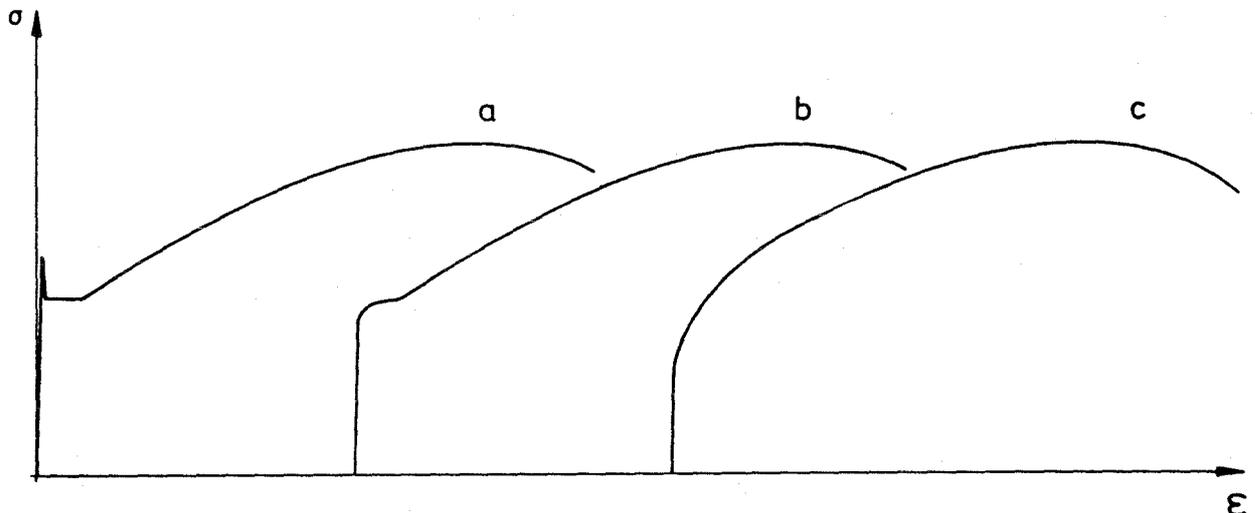


Bild 6.2. Ausbildungsformen der Spannungs-Dehnungs-Kurve

- a ausgeprägte obere Streckgrenze mit Fließbereich
- b keine ausgeprägte obere Streckgrenze mit Fließbereich
- c keine ausgeprägte obere Streckgrenze ohne Fließbereich

Verfestigungsbereich vorverformt wurde oder eine Stahlsorte ohne Fließbereich vorliegt.

In der Auswertung wurden drei Ausbildungsformen nach Bild 6.2 definiert. Da bei Ausbildungsform c kein Fließbereich vorhanden ist, wird in diesen Fällen die untere und statische Streckgrenze, sowie die Lüdersdehnung und der Verfestigungsmodul nicht ausgewertet.

Insgesamt haben 43 Proben aus St37 und 10 Proben aus St52 keine ausgeprägte obere Streckgrenze, jedoch einen Fließbereich und wurden der Ausbildungsform b zugeordnet; der Ausbildungsform c wurden 4 Proben (St37) bzw. 5 Proben (St52) zugeordnet. Alle anderen Proben wurden der Ausbildungsform a zugeordnet.

6.5.2 Auswertung der Ergebnisse für die Streckgrenze

DIN 50 145 definiert die obere und untere Streckgrenze R_{eH} und R_{eL} , sowie die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$.

In der Diskussion ist in neuerer Zeit die statische Streckgrenze R_{eS} , die als sicher zu ermittelnder Festigkeitskennwert gilt, da sie weitgehend von Prüfeinflüssen wie Dehngeschwindigkeit und Probenform unabhängig ist /10,14,15,32,33/. Ihre Ermittlung stellt jedoch an die Regelung der Prüfmaschine erhöhte Anforderungen.

Die Angabe der oberen Streckgrenze R_{eH} wird in den Werkstoffnormen noch heute als maßgebende Festigkeitskenngröße gefordert, da sie einfach zu bestimmen ist. In der Prüfpraxis wird die 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ angegeben, wenn sich keine ausgeprägte obere Streckgrenze R_{eH} ausbildet.

Als Vergleichswert zur oberen Streckgrenze R_{eH} aus den Bescheinigungen wird deshalb für alle Ausbildungsformen nach Bild 6.2 ein Bescheinigungswert R_p definiert:

$R_p = R_{eH}$, falls obere Streckgrenze R_{eH} vorhanden; sonst

$R_p = R_{p0,2}$.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Streckgrenzen ausgewertet:

- | | | |
|---------------------------|-------------|--|
| 1. Bescheinigungswert | R_p | |
| 2. obere Streckgrenze | R_{eH} | |
| 3. 0,2%-Dehngrenze | $R_{p0,2}$ | ($\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%}/s$) |
| 4. statische Streckgrenze | R_{eS} | |
| 5. untere Streckgrenze | R_{eLUA1} | ($\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%}/s$) |
| 6. untere Streckgrenze | R_{eLUB} | ($\dot{\epsilon} = 5/60 \text{ \%}/s$) |

Die Ermittlung der Streckgrenzen ist Abschnitt 4.2 und Anhang A1 zu entnehmen.

In Bild 6.3 sind die Histogramme für die Streckgrenzen ohne Unterteilung in verschiedene Erzeugnisdicken dargestellt, wobei die verwechselten Stähle nicht berücksichtigt wurden. Auf eine Darstellung in Form von Histogrammen für die verschiedenen Erzeugnisdicken wurde an dieser Stelle verzichtet. Für alle untersuchten Streckgrenzen wurden die Dichtefunktionen der Normal- und Lognormalverteilung nach Gl. 2.2 und 2.3 berechnet. Hierbei wurden die Dichtefunktionen getrennt für die verschiedenen Erzeugnisdicken $0 < t \leq 16$, $16 < t \leq 40$ und $40 < t \leq 63$ mm sowie ohne Berücksichtigung der Erzeugnisdicken $0 < t \leq 63$ mm berechnet. In den Tabellen 6.4 und 6.5 sind die Auswertungen zusammengestellt.

Bild 6.3. Histogramme für die Streckgrenzen ohne Berücksichtigung von verwechselten Stählen

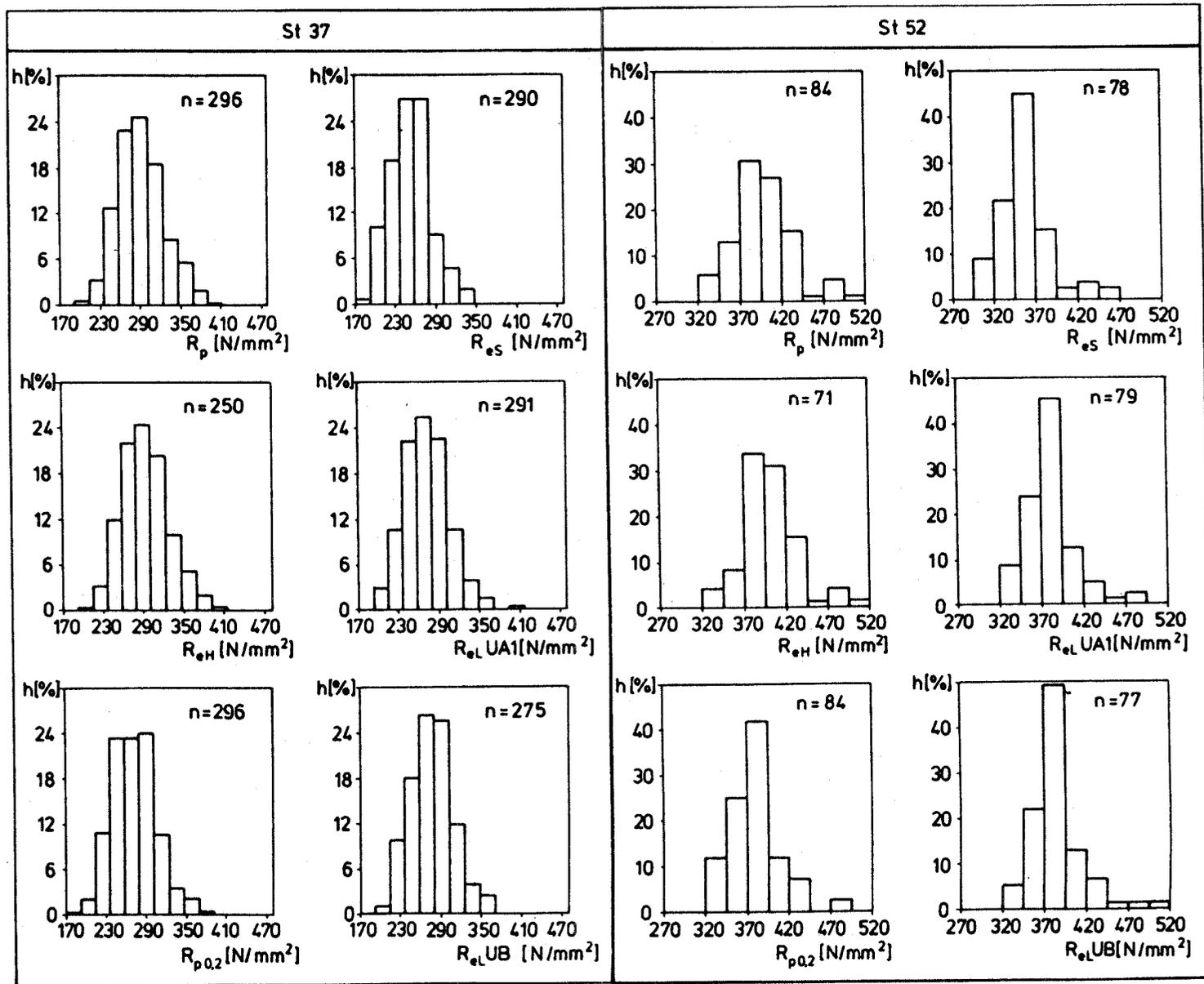


Tabelle 6.4. Verteilungsfunktionen und Fraktilwerte für die Streckgrenze für den St37 mit Berücksichtigung der verwechsellsten Stähle

	Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile				Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
				Θ_1	Θ_2	Θ_3		5%	50%	95%					Θ_1	Θ_2	Θ_3		5%	50%	95%
R_D /N/mm ² /	307	0-63	SFK	204	495		0.055 0.020	238	292	361	236	0-16	SFK	189	436		0.054 0.029	208	253	321	
			NV	295.9	40.0			230	294	362			NV	257.3	36.5			197	257	317	
			LNV	5.27	0.20	98.3		238	292	368			LNV	5.01	0.23	102.9		206	253	322	
	240	0-16	SFK	204	495		0.042 0.033	244	298	369	236	0-16	SFK	189	436		0.066 0.044	212	262	324	
NV	301.0	40.1		235	301	367		NV	263.4	35.3				205	263	321					
LNV	5.33	0.19	91.5	243	298	374		LNV	5.12	0.20			93.4	214	261	326					
56	16-40	SFK	224	402		0.014 0.078	230	274	350	55	16-40	SFK	195.0	343		0.113 0.047	197	226	317		
		NV	279.6	35.7			221	280	338			NV	235.2	34.0			179	235	291		
		LNV	4.75	0.28	158.9		232	274	342			LNV	3.62	0.69	137.9		200	225	304		
	11	40-63	SFK	238	301		0.074 0.094	-	263	-	10	40-63	SFK	213	266		0.072 0.079	-	229	-	
NV	269.1	18.0		239	269	299		NV	234.1	14.6				210	234	258					
LNV	5.01	0.12	118.1	241	268	301		LNV	4.23	0.20			163.9	213	233	259					
R_{eH} /N/mm ² /	258	0-63	SFK	211	495		0.043 0.024	239	293	359	302	0-63	SFK	192	457		0.056 0.023	223	270	339	
			NV	296.8	38.6			233	297	360			NV	275.5	37.9			213	276	338	
			LNV	5.24	0.20	104.6		240	293	367			LNV	5.14	0.21	100.8		222	272	342	
	198	0-16	SFK	211	495		0.043 0.031	245	300	369	237	0-16	SFK	204	457		0.073 0.044	235	280	343	
NV	302.5	38.3		239	303	366		NV	282.0	36.7				222	282	342					
LNV	5.32	0.18	95.5	248	300	370		LNV	5.17	0.20			103.1	230	279	348					
53	16-40	SFK	224	402		0.136 0.084	230	274	333	56	16-40	SFK	192	365		0.107 0.042	212	145	322		
		NV	279.3	34.5			223	279	336			NV	252.5	34.9			295	253	310		
		LNV	4.75	0.28	159.3		232	275	343			LNV	4.31	0.40	171.1		210	246	315		
	7	40-63	SFK	242	301		0.064 0.070	-	263	-	9	40-63	SFK	229	266		0.112 0.101	-	240	-	
NV	270.8	18.1		241	271	301		NV	248.8	123				229	249	269					
LNV	4.71	0.16	158.7	244	270	303		LNV	4.53	0.14			155.6	229	248	272					
$R_{D0.2}$ /N/mm ² /	307	0-63	SFK	190.0	457		0.053 0.024	224	272	343	284	0-63	SFK	198	462		0.051 0.021	229	276	345	
			NV	275.8	38.0			213	276	338			NV	279.4	36.0			220	279	339	
			LNV	5.15	0.21	99.7		222	272	343			LNV	5.13	0.20	106.3		228	275	341	
	240	0-16	SFK	204	457		0.067 0.029	233	281	348	221	0-16	SFK	207	462		0.066 0.038	240	285	346	
NV	282.3	36.7		222	282	343		NV	286.3	34.3				230	286	343					
LNV	5.15	0.20	106.3	230	279	346		LNV	5.18	0.18			105.7	238	283	345					
56	16-40	SFK	190	363		0.125 0.066	208	243	335	54	16-40	SFK	198	368		0.113 0.073	215	248	315		
		NV	252.4	35.3			194	252	310			NV	255.5	33.2			201	256	310		
		LNV	4.46	0.35	160.1		209	247	314			LNV	4.36	0.37	171.3		214	250	315		
	11	40-63	SFK	228.7	284		0.073 0.067	-	249	-	9	40-63	SFK	235	265		0.123 0.168	-	252	-	
NV	253.3	16.6		226	253	281		NV	251.7	9.49				236	252	267					
LNV	4.50	0.18	161.6	229	252	283		LNV	4.39	0.12			170.0	236	251	268					

SFK = Stichprobenfunktion
 NV = Normalverteilung
 LNV = Lognormalverteilung

Tabelle 6.4. Verteilungsfunktionen und Fraktile für die Streckgrenze für den St37 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle (Fortsetzung)

	Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile				Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
				θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%					θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
R_p /N/mm ² /	296	0-63	SFK	204	399		237	291	350	0.035	235	292	350	0.027	189	334	0.027	207	251	306	
			NV	292.3	34.8		241	290	355												0.051
	LNV	5.31	0.17	87.6										0.051	208	249	317				
R_{eS} /N/mm ² /	233	0-16	SFK	204	399		243	296	351	0.022	240	298	355	0.021	189	334	0.021	212	259	313	
			NV	297.7	35.1		242	294	363												0.055
	LNV	5.36	0.17	81.4										0.055	216	257	312				
R_{eH} /N/mm ² /	52	16-40	SFK	224	333		230	271	322	0.079	229	273	317	0.125	195	288	0.125	197	223	266	
			NV	272.9	26.7		233	270	319												0.075
	LNV	5.03	0.17	117.2										0.075	200	223	271				
R_{elUA1} /N/mm ² /	11	40-63	SFK	238	301		-	263	-	0.074	239	269	299	0.072	213	266	0.072	210	234	258	
			NV	269.1	18.0		241	268	301												0.079
	LNV	5.01	0.12	118.1										0.079	213	233	259				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	250	0-63	SFK	211	399		239	293	350	0.025	238	294	350	0.034	192	397	0.034	221	269	325	
			NV	293.8	34.1		243	292	356												0.043
	LNV	5.29	0.17	93.2										0.043	222	268	331				
R_{elUB} /N/mm ² /	193	0-16	SFK	211	399		245	300	351	0.020	244	300	356	0.028	204	397	0.028	235	278	330	
			NV	299.8	33.9		248	297	360												0.047
	LNV	5.35	0.16	86.3										0.047	232	276	334				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	50	16-40	SFK	224	333		230	273	322	0.082	230	274	318	0.079	192	306	0.079	212	241	289	
			NV	273.8	267		233	272	323												0.053
	LNV	5.07	0.17	112.7										0.053	211	244	289				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	7	40-63	SFK	242	301		-	263	-	0.064	241	271	301	0.112	229	266	0.112	229	249	269	
			NV	270.8	18.1		244	270	303												0.101
	LNV	4.71	0.16	158.7										0.101	229	248	272				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	296	0-63	SFK	190	390		224	270	327	0.038	219	272	325	0.034	198.0	369	0.034	229	273	331	
			NV	272.1	32.4		223	270	333												0.032
	LNV	5.21	0.18	87.0										0.032	228	273	334				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	233	0-16	SFK	204	390		233	280	336	0.027	228	279	330	0.034	207	369	0.034	237	284	340	
			NV	279.1	31.1		231	276	337												0.030
	LNV	5.23	0.17	89.7										0.030	239	282	336				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	52	16-40	SFK	190	306		208	240	286	0.057	207	245	283	0.121	198	315	0.121	215	241	285	
			NV	245.0	23.4		210	244	287												0.098
	LNV	4.98	0.16	98.2										0.098	215	248	293				
$R_{p0,2}$ /N/mm ² /	11	40-63	SFK	229	284		-	249	-	0.073	226	253	281	0.123	235	265	0.123	236	252	267	
			NV	253.3	16.6		229	252	283												0.168
	LNV	4.50	0.18	161.6										0.168	236	251	268				

SFK = Stichprobenfunktion
 NV = Normalverteilung
 LNV = Lognormalverteilung

Tabelle 6.5. Verteilungsfunktionen und Fraktile für die Streckgrenze für den St52 mit Berücksichtigung der verwechselten Stähle

Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile			
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%	
R _p /N/mm ²	86	0-40	SFK	290	510	120.6	0.061 0.066	329	393	457
			NV	396.0	38.0			333	396	459
			LNV	5.61	0.14			338	394	465
	56	0-16	SFK	290	510	113.7	0.071 0.081	292	397	472
			NV	398.0	41.1			330	398	466
			LNV	5.64	0.15			333	395	474
	30	16-40	SFK	327	480	167.3	0.094 0.104	327	388	429
			NV	392.1	31.0			341	392	443
			LNV	5.40	0.14			343	389	446
R _{eH} /N/mm ²	72	0-40	SFK	392	510	128.6	0.069 0.079	329	397	457
			NV	399.5	35.2			342	400	457
			LNV	5.59	0.13			345	396	460
	41	0-16	SFK	292	510	118.9	0.085 0.091	343	402	441
			NV	404.7	37.0			344	405	466
			LNV	5.65	0.13			348	403	471
	30	16-40	SFK	327	480	167.3	0.094 0.104	327	388	429
			NV	392.1	31.0			341	392	443
			LNV	5.40	0.14			343	389	446
R _{p0.2} /N/mm ²	86	0-40	SFK	290.0	489	132.49	0.110 0.097	325	374	431
			NV	376.0	32.2			323	376	429
			LNV	5.49	0.13			328	375	432
	56	0-16	SFK	290.4	488.7	123.8	0.115 0.130	391	376	442
			NV	380.9	33.4			326	381	436
			LNV	5.54	0.13			329	378	439
	30	16-40	SFK	321.6	433	197.2	0.097 0.117	321	372	397
			NV	366.7	27.4			322	367	412
			LNV	5.12	0.16			326	365	415
R _{eS} /N/mm ²	80	0-40	SFK	275	468	127.8	0.099 0.086	303	353	420
			NV	335	330			301	355	409
			LNV	5.42	0.14			307	354	412
	50	0-16	SFK	275	468	118.3	0.113 0.126	277	355	422
			NV	360.6	33.9			305	361	416
			LNV	5.48	0.14			309	358	420
	30	16-40	SFK	301	420	194.4	0.085 0.121	301	349	380
			NV	346.3	29.4			298	346	395
			LNV	5.00	0.19			303	343	397
R _{eLUA1} /N/mm ²	81	0-40	SFK	289	492	129.4	0.111 0.089	325	374	434
			NV	377.1	32.6			323	377	431
			LNV	5.50	0.13			327	374	432
	51	0-16	SFK	289	492	119.2	0.133 0.153	291	375	439
			NV	382.6	33.7			327	383	438
			LNV	5.56	0.13			329	379	441
	30	16-40	SFK	323	446	259.8	0.114 0.115	323	370	392
			NV	367.6	28.3			321	368	414
			LNV	4.65	0.26			328	364	420
R _{eLUB} /N/mm ²	79	0-40	SFK	302	508	150.6	0.124 0.101	323	376	437
			NV	381.1	31.9			329	381	434
			LNV	5.43	0.14			332	379	438
	51	0-16	SFK	302	508	143.2	0.142 0.159	304	378	442
			NV	385.9	33.9			330	386	442
			LNV	5.48	0.14			334	383	445
	28	16-40	SFK	323	437	199.6	0.137 0.126	323	376	404
			NV	372.3	25.5			330	372	414
			LNV	5.14	0.15			333	370	418

SFK = Stichprobenfunktion
 NV = Normalverteilung
 LNV = Lognormalverteilung

Tabelle 6.5. Verteilungsfunktionen und Fraktilewerte für die Streckgrenze für den St52 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle (Fortsetzung)

	Anzahl n	t /mm/	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
				σ_1	σ_2	σ_3		5%	50%	95%
R_p /N/mm ² /	84	0-40	SFK	327	510			338	393	457
			NV	398.5	34.8		0.057	341	399	456
			LNV	5.34	0.16	186.3	0.039	347	395	458
	54	0-16	SFK	334	510			338	399	472
			NV	402.0	36.2		0.060	342	402	462
			LNV	4.59	0.25	256.6	0.064	350	398	470
	30	16-40	SFK	327	480			327	388	429
			NV	392.1	31.0		0.094	341	392	443
			LNV	5.40	0.14	167.3	0.104	343	389	446
R_{eH} /N/mm ² /	71	0-40	SFK	327	510			343	397	457
			NV	401.0	33.0		0.071	347	401	455
			LNV	5.38	0.15	180.8	0.060	351	398	459
	41	0-16	SFK	343	510			361	402	441
			NV	407.5	32.9		0.074	353	408	462
			LNV	4.99	0.21	256.6	0.061	361	404	464
	30	16-40	SFK	327	480			327	388	429
			NV	392.1	31.0		0.094	341	392	443
			LNV	5.40	0.14	167.3	0.104	343	389	446
$R_{p0.2}$ /N/mm ² /	84	0-40	SFK	321	489			329	375	431
			NV	378.0	29.7		0.116	329	378	427
			LNV	5.09	0.17	212.9	0.079	336	375	428
	54	0-16	SFK	334	489			338	376	442
			NV	384.2	29.1		0.132	336	384	432
			LNV	4.84	0.21	254.7	0.090	344	381	433
	30	16-40	SFK	321	433			321	372	397
			NV	366.7	27.4		0.097	322	367	412
			LNV	5.12	0.16	197.2	0.117	326	365	415
R_{eS} /N/mm ² /	78	0-40	SFK	301	468			308	355	420
			NV	357.3	30.9		0.104	306	357	408
			LNV	5.10	0.18	190.1	0.091	312	354	411
	48	0-16	SFK	318	468			323	355	422
			NV	364.2	29.8		0.138	315	364	413
			LNV	4.46	0.30	273.8	0.099	327	360	416
	30	16-40	SFK	301	420			301	349	380
			NV	346.3	29.1		0.085	298	346	395
			LNV	5.00	0.19	194.4	0.121	303	343	397
R_{eLUA1} /N/mm ² /	79	0-40	SFK	323	492			327	375	439
			NV	379.3	29.9		0.114	330	379	428
			LNV	4.78	0.24	256.8	0.080	337	376	434
	49	0-16	SFK	340	492			345	377	439
			NV	386.0	28.6		0.142	339	386	433
			LNV	4.35	0.31	304.5	0.082	351	382	434
	30	16-40	SFK	323	446			323	370	392
			NV	367.6	28.3		0.114	321	368	414
			LNV	4.65	0.26	259.8	0.115	328	364	420
R_{eLUB} /N/mm ² /	77	0-40	SFK	323	508			342	376	437
			NV	383.1	29.6		0.135	334	383	432
			LNV	4.81	0.22	257.0	0.085	342	380	433
	49	0-16	SFK	342	508			350	378	442
			NV	389.3	30.0		0.135	340	389	439
			LNV	4.39	0.31	305.0	0.101	353	386	439
	28	16-40	SFK	323	437			323	376	404
			NV	372.3	25.5		0.137	330	372	414
			LNV	5.14	0.15	199.6	0.126	333	370	418

SFK = Stichprobenfunktion
 NV = Normalverteilung
 LNV = Lognormalverteilung

Die Untersuchung, ob eine Qualitätskontrolle stattgefunden hat, wird später anhand der Dichtefunktion einer normalverteilten Grundgesamtheit mit Filterfunktion nach Gl. 2.6 (Abschnitt 2.5.2) für die Streckgrenze R_p durchgeführt.

Besonders auffällig ist beim St37 und St52 die niedrige 5%-Fraktile aller Streckgrenzen.

Die 5%-Fraktile des Bescheinigungswertes R_p ist beim St37 für $0 < t \leq 16$ mm mit 243 N/mm^2 für die Auswertung ohne Verwechselungen nur wenig größer als der charakteristische Wert von 240 N/mm^2 nach DIN 18 800 Teil 1. Für $16 < t \leq 40$ mm ist sie mit 230 N/mm^2 deutlich unterhalb von 240 N/mm^2 .

Beim St52 liegt sie in beiden Fällen unterhalb des charakteristischen Wertes von 360 N/mm^2 .

Für einige Konstruktionselemente ist die statische Streckgrenze R_{eS} für die Tragfähigkeit maßgebend /14/. Wird als charakteristischer Wert für die Streckgrenze die statische Streckgrenze R_{eS} angesetzt, liegt die 5%-Fraktile mit 212 N/mm^2 für $0 < t \leq 16$ mm bzw. 197 N/mm^2 für $16 < t \leq 40$ mm deutlich unterhalb von 240 N/mm^2 . Entsprechendes gilt für den St52.

In Bild 6.4 sind die 5, 50 und 95%-Fraktile für die ermittelten Streckgrenzen und zum Vergleich R_{eH} aus den Bescheinigungen für die Auswertung ohne Unterscheidung von Herkunft und Prüfdatum aufgetragen. Die Werte wurden auf die charakteristischen Bemessungswerte β_S nach DIN 18800 Teil 1 mit 240 N/mm^2 für den St37 und 360 N/mm^2 für den St52 bezogen.

Es wurden nur die Fraktilwerte ohne Unterscheidung in die verschiedenen Erzeugnisdicken aufgetragen.

Die verwechselten Stähle wurden nicht berücksichtigt. Die Werte unterscheiden sich nur bei der 95%-Fraktile beim St37 und der 5%-Fraktile beim St52 deutlich, so daß in den anderen Fällen die Punkte in der Darstellung praktisch zusammenfallen.

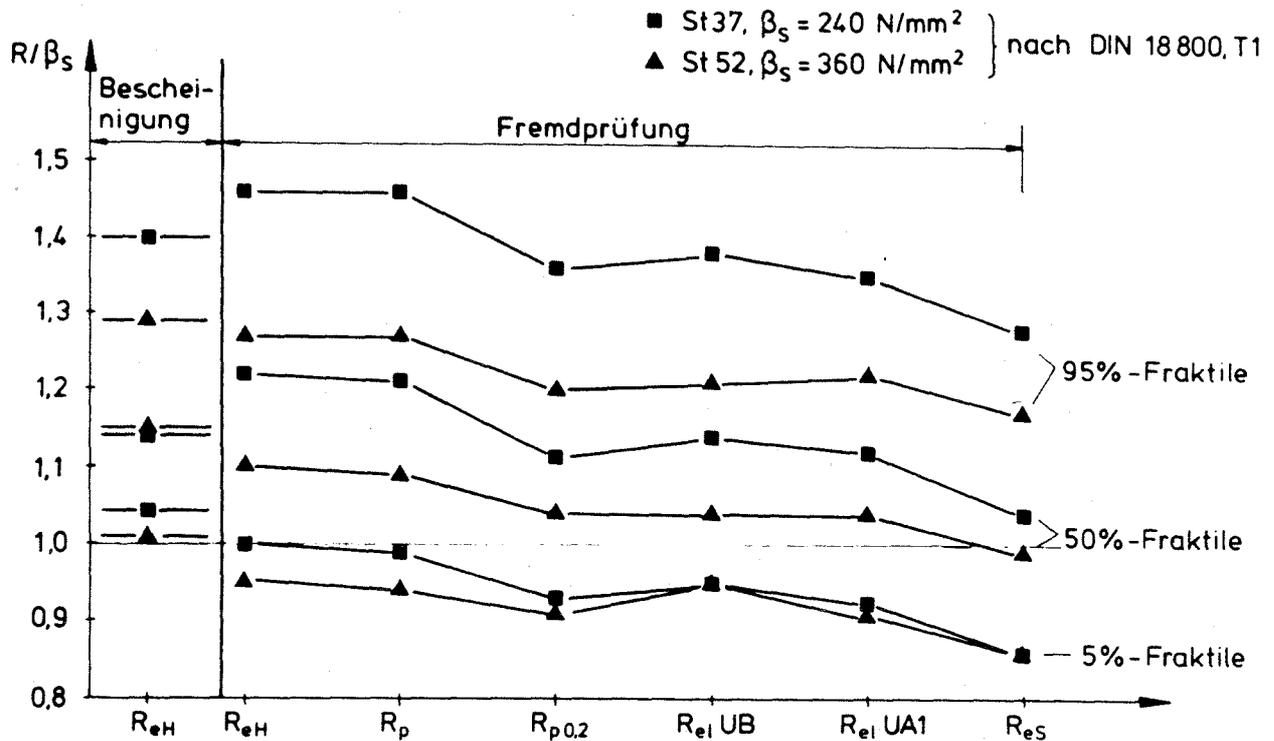


Bild 6.4. Fraktilwerte der Streckgrenze für alle Erzeugnisdicken

Es kann festgestellt werden, daß die Fraktilwerte für R_p im Vergleich zu R_{eH} aus den Bescheinigungen bei der 5 und 50%-Fraktile kleiner sind. Die 95%-Fraktile ist dagegen größer. Die Streckgrenze des eingebauten Stahls, der durch die Stichprobenentnahme erfaßt wurde, streut mehr als die aus den Bescheinigungen.

Weiterhin liegen alle 5%-Fraktile der Streckgrenze unterhalb des charakteristischen Bemessungswertes.

Eine wichtige Frage ist weiterhin, ob aus den Ergebnissen der Fremdprüfung eine Qualitätskontrolle nachgewiesen werden kann. Falls sie durchgeführt wurde, muß sie aus den Auswertungen für R_p ersichtlich sein, weil aus den Bescheinigungen deutlich wurde, daß durch eine Qualitätskontrolle die Erzeugnisse fast ausschließlich infolge zu niedriger Streckgrenzen zurückgewiesen

werden müssen. Sind die Prüfungen gemäß den Vorschriften durchgeführt worden, wird trotzdem erwartet, daß der Filter durch Binnenstreuung, Probenentnahme und Prüfverfahren eine größere Streuung hat (s. Abschnitt 5.2, Seite 66). Im Bild 6.5 sind die Histogramme der Streckgrenze R_p für die Stähle St37 und St52 getrennt für die Erzeugnisdicken $0 < t \leq 16$ mm und $16 < t \leq 40$ mm aufgetragen. Ein ausgeprägter Filter, wie er aus den Histogrammen der Bescheinigungen für R_{eH} zu erkennen war, wird nicht deutlich.

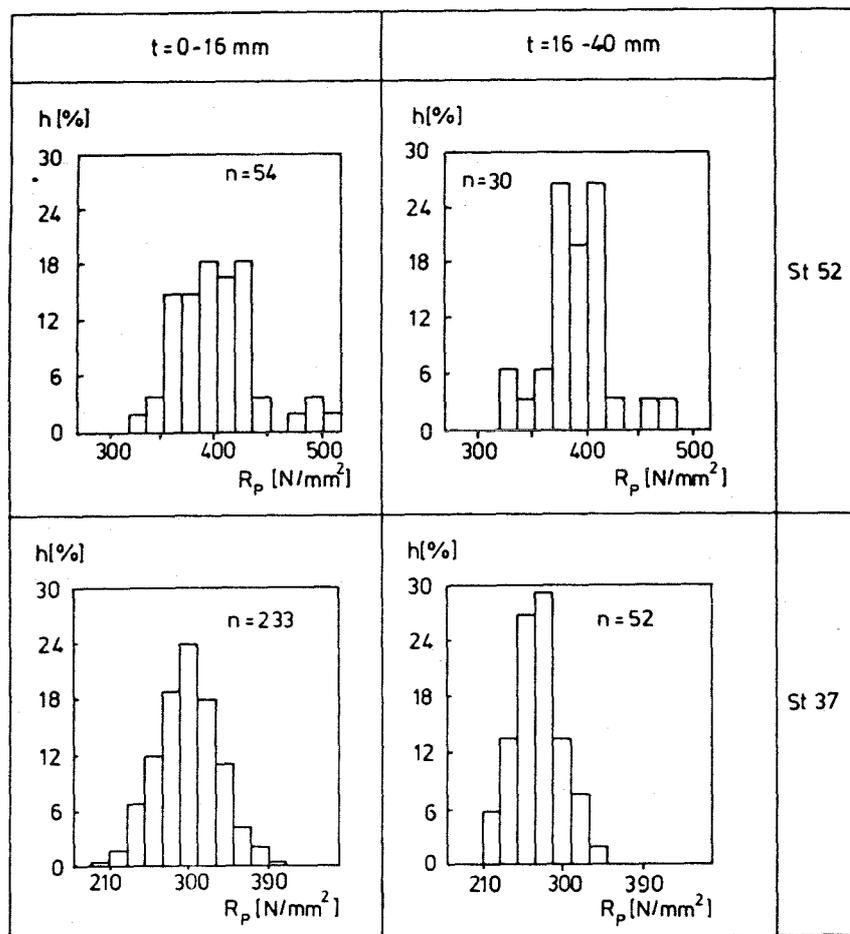


Bild 6.5. Histogramme für R_p in Abhängigkeit von der Erzeugnisdicke

Die Dichtefunktion der normalverteilten Grundgesamtheit mit Filter wurde für R_p nach Gl. 2.6 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 zusammengefaßt. Die verwendeten Parameter sind im Abschnitt 2.5 und 2.6.4.2 beschrieben.

Tabelle 6.6. Dichtefunktion für normalverteilte Grundgesamtheit mit Filterfunktion nach Gl. 2.6 für die Streckgrenze R_p

Stahl- sorte	An- zahl	t /mm/	θ_1 /N/mm ² /	θ_2 /N/mm ² /	θ_3 /N/mm ² /	θ_4 /N/mm ² /	k -
St37	233	< 0-≤16	296.9	34.8	201.0	1.8	0.99
	52	<16-≤40	268.8	30.2	222.8	2.1	0.94
St52	54	< 0-≤16	398.6	40.8	336.1	0.8	0.94
	30	<16-≤40	390.3	33.0	324.5	1.5	0.98

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, daß eine Qualitätskontrolle vermutlich nicht immer durchgeführt wurde.

Wahrscheinlich liegt eine Mischverteilung vor, d.h. teilweise wurde eine Qualitätskontrolle durchgeführt; in den anderen Fällen gelangten Erzeugnisse ohne Qualitätskontrolle in die Stichprobe. Der Nachweis kann allerdings mit dem geringen Stichprobenumfang nicht geführt werden.

Die Ergebnisse in Tabelle 6.6 zeigen, daß die angesetzten Filter rechnerisch sehr niedrig sind. Die Werte liegen unterhalb der zulässigen Werte, so daß die Dichtefunktion praktisch nur die Deutung erlaubt, daß ein Filter mit dem Ansatz nach Gl. 2.6 nicht nachweisbar ist.

Aus den Erläuterungen kann für die Streckgrenze folgendes gefolgert werden:

1. Eine Qualitätskontrolle wird nicht für alle Stähle durchgeführt.

2. Die 5%-Fraktile der Streckgrenze liegt beim St52 deutlich unterhalb des charakteristischen Wertes nach DIN 18800, Teil 1.
3. Die Wahrscheinlichkeit, daß Bauteile aus St52 fließen, ist größer als bei Bauteilen aus St37.

6.5.3 Abhängigkeit der Streckgrenze von der Dehngeschwindigkeit

6.5.3.1 Allgemeines

Da sich in jeder Faser eines Bauteils bei Belastung verschiedene Dehngeschwindigkeiten einstellen, kann es für die Berechnung sinnvoll sein, die untere Streckgrenze in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit anzugeben. Sie ist von der Dehngeschwindigkeit abhängig, wobei die statische Streckgrenze ein Grenzfall für $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ ist, die bestimmt wird, indem im Fließbereich die Dehnung über eine bestimmte Zeit konstant gehalten wird. Der Spannungswert für R_{eS} wird für $t \rightarrow \infty$ mit einem Regressionsansatz extrapoliert /7,10,15,17,26/.

Die Ermittlung der statischen Streckgrenze R_{eS} stellt an die Prüfanordnung erhöhte Anforderungen. Sie ist durch lange Versuchszeiten teuer, und es stellt sich die Frage, ob mit einfach zu ermittelnden Größen die statische Streckgrenze mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden kann.

In /32,33/ werden Abhängigkeiten der unteren Streckgrenze von der Dehngeschwindigkeit angegeben. Sie beruhen vornehmlich auf Versuchsergebnissen an amerikanischen Stählen A36, A441 und A514, deren Festigkeitskennwerte in etwa denen der Stähle St37, St52 und StE500 entsprechen. Die Parameter a_0 und a_1 der vorgeschlagenen Funktionstypen zur Berechnung der statischen Streckgrenze bei bekannter Dehngeschwindigkeit und unterer Streckgrenze

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} (1 + a_0 \dot{\epsilon}^{a_1}) \quad \text{und} \quad (6.1)$$

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} + a_0 \dot{\epsilon}^{a_1} \quad (6.2)$$

sind nach /32,33/ von der Stahlsorte abhängig. Der Ansatz nach Gl. 6.1 beinhaltet auch eine Abhängigkeit des Spannungsabfalls von dem Spannungsniveau der statischen Streckgrenze, d.h. je größer die statische Streckgrenze ist, desto größer ist der Spannungsabfall von einer unteren Streckgrenze auf die statische Streckgrenze, der im weiteren mit $\Delta\sigma$ bezeichnet wird.

Bei den o.a. Versuchen zur Bestimmung der Parameter wurden Dehngeschwindigkeiten bis maximal 1.6 %/s untersucht. Die Parameter nach Gl. 6.1 sind z.B. in Erläuterungen zur SIA-Norm 161 "Stahlbauten" /37/ aufgenommen worden. Sie werden an dieser Stelle nicht angegeben, da sie für größere Dehngeschwindigkeiten $\dot{\epsilon} > 0.2$ %/s gelten und die Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$ bei den im Institut für Stahlbau der TU Braunschweig durchgeführten Versuchen 1/60 %/s und 5/60 %/s betrug.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Fragestellungen untersucht:

1. Ist die Größe des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ von der Stahlsorte abhängig?
2. Kann die statische Streckgrenze mit einfach zu ermittelnden Kenngrößen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden?
3. Kann eine Beziehung zwischen unterer Streckgrenze und der Dehngeschwindigkeit angegeben werden, die es erlaubt, die statische Streckgrenze mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen?

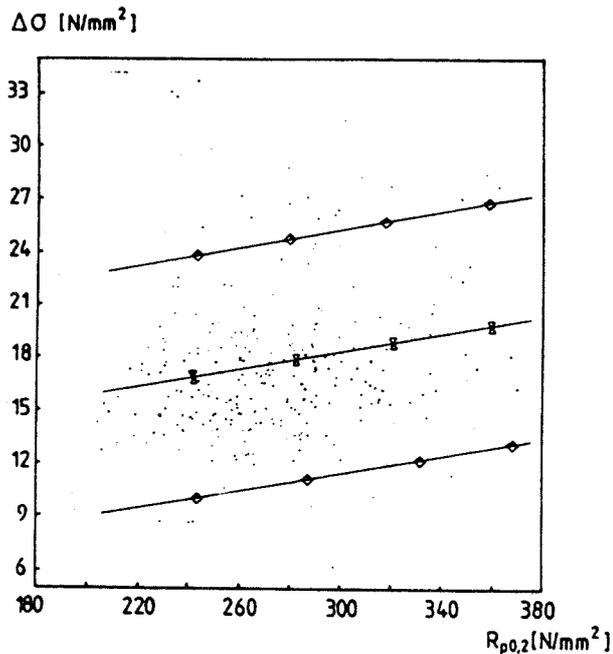
6.5.3.2 Ist die Größe des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ von der Stahlsorte abhängig ?

Zur Untersuchung wurde der Spannungsabfall $\Delta\sigma$ von der unteren auf die statische Streckgrenze getrennt für die Stahlsorten St37 und St52 berechnet. In Tabelle 6.7 sind die Ergebnisse zusammengefaßt.

Tabelle 6.7. Auswertung des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ von der 0,2%-Dehngrenze auf die statische Streckgrenze

Stahl- sorte	An- zahl	Mittel- wert /N/mm ² /	Standard- abweichung /N/mm ² /	95%-Vertrauensber.	
				untere Grenze /N/mm ² /	obere Grenze /N/mm ² /
St37	286	17.9	4.1	9.8	26.0
St52	74	18.9	2.7	13.5	24.2

Der Spannungsabfall $\Delta\sigma$ beträgt bei einer Dehngeschwindigkeit von 1/60 %/s im Mittel 17.9 bzw. 18.9 N/mm². Da jedoch die Standardabweichung mit 4.1 N/mm² bzw. 2.7 N/mm² relativ hoch ist, ist die Spanne zwischen unterer und oberer Grenze des 95%-Vertrauensbereiches groß. Da der Mittelwert des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ beim St52 nur etwas größer als beim St37 ist, kann aus den Untersuchungen festgestellt werden, daß die Größe des Spannungsabfalls nahezu unabhängig von der Stahlsorte ist.



Die Abhängigkeit des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ von der Größe der 0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2}$ ist beispielhaft für den St37 im Bild 6.6 dargestellt. Die Regressionsgerade zeigt einen leichten Anstieg. Die 95%-Vertrauensbereiche für einen Meßwert der statischen Streckgrenze sind relativ groß.

—■— Regressionsgerade
—○— 95%-Vertrauensbereich für einen Meßwert x

Bild 6.6. Abhängigkeit des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ $R_{p0,2} - R_{eS}$

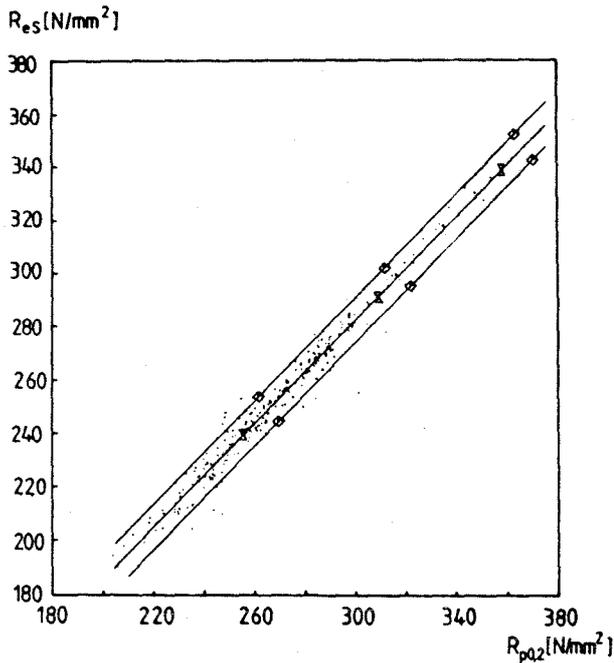
6.5.3.3 Kann die statische Streckgrenze mit einfach zu ermittelnden Kenngrößen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden ?

Im dehnregulierten Zugversuch kann im Fließbereich i. allg. die untere Streckgrenze und die Dehngeschwindigkeit angegeben werden. Es stellt sich die Frage, ob die statische Streckgrenze bei bekannter Dehngeschwindigkeit mit ausreichender Genauigkeit mit der unteren Streckgrenze ermittelt werden kann.

Im Bild 6.7 ist die statische Streckgrenze beispielhaft in Abhängigkeit zur 0,2%-Dehngrenze dargestellt. Zur Ermittlung einer Beziehung zwischen unterer und statischer Streckgrenze wurde ein Regressionsansatz

$$R_{eS} = R_{eL} \cdot \dot{\epsilon} + a_0 \quad (6.3)$$

gewählt. Der Parameter a_0 ist hierbei der Spannungsabfall $\Delta\sigma$, um den die statische Streckgrenze kleiner als R_{eL} ist. Im Bild 6.7



- Regressiongerade
- 95%-Vertrauensbereich für einen Meßwert x

ist die Regressionsgerade nach Gl. 6.3 und die 95%-Vertrauensbereiche für einen Meßwert x eingetragen. Zur Untersuchung wurden die Beziehungen von $R_{p0,2}$, R_{eLUA1} und R_{eLUB} zu R_{eS} ausgewertet. In Tabelle 6.8 sind die Ergebnisse getrennt für die Stähle St37 und St52, sowie für alle Stähle ohne Berücksichtigung der Stahlorte zusammengefaßt.

Bild 6.7. R_{eS} in Abhängigkeit von $R_{p0,2}$ bei $\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%./s}$

Zur Beurteilung der Güte der Regression wird der Standardfehler des Spannungsabfalls $\Delta\sigma$ herangezogen. Er ist für die Auswertung für $R_{p0,2} - R_{eS}$ am geringsten und beträgt im Mittel beim St37 ca. 18 N/mm^2 und beim St52 ca. 20 N/mm^2 . Da der Standardfehler groß ist, sind die 95%-Vertrauensbereiche entsprechend groß.

Eine Bestimmung der statischen Streckgrenze ist deshalb nur bedingt möglich. Es kann jedoch mit dem Standardfehler die 95%-Fraktile bestimmt werden, die die Aussage erlaubt, wie groß der Spannungsabfall in 95% aller Fälle maximal ist. Bei einer Dehngeschwindigkeit von $1/60 \text{ \%./s}$ liegt die statische Streckgrenze in 95% aller Fälle beim St37 bis zu 26.2 N/mm^2 , beim St52 bis zu 29.4 N/mm^2 und ohne Berücksichtigung der Stahlorte bis zu 27.0 N/mm^2 unter der 0,2%-Dehngrenze.

Tabelle 6.8. Spannungsabfall von der unteren Streckgrenze auf die statische Streckgrenze

Stahl- sorte	Streck- grenze	An- zahl	a_1 /N/mm ² /	Standard- fehler /N/mm ² /	95%-Vertrauens- bereich		95% Fraktile /N/mm ² /
					/N/mm ² /	/N/mm ² /	
St37	R _{p0,2}	290	-18.1	4.9	-8.5	-27.8	-26.2
	R _{eLUA1}	289	-18.4	7.3	-4.0	-33.0	-30.5
	R _{eLUB}	273	-22.6	5.5	-11.8	-33.4	-31.7
St52	R _{p0,2}	78	-20.4	5.4	-9.7	-31.1	-29.4
	R _{eLUA1}	78	-21.7	5.5	-10.8	-32.6	-30.9
	R _{eLUB}	76	-24.1	5.9	-12.4	-35.8	-33.9
St37 und St52	R _{p0,2}	368	-18.6	5.1	-8.6	-28.6	-27.0
	R _{eLUA1}	367	-19.1	7.1	-5.2	-33.0	-30.8
	R _{eLUB}	349	-22.9	5.6	-11.9	-33.9	-32.1

6.5.3.4. Kann eine Beziehung zwischen unterer Streckgrenze und der Dehngeschwindigkeit angegeben werden, die es erlaubt, die statische Streckgrenze mit ausreichender Genauigkeit zu bestimmen?

Die im Abschnitt 6.5.3.1 angegebenen Funktionen zur Beschreibung der Streckgrenze wurden ausgewertet. Es ist jedoch aus den Vertrauensbereichen nach Tabelle 6.8 ersichtlich, daß die Streuung groß ist. Für eine Berechnung der Streckgrenze sind die Parameter der Gleichungen deshalb nur als Anhaltswert zu interpretieren. Zur Regression wurden die unteren Streckgrenzen R_{eLUA1} ($\dot{\epsilon} = 1/60 \text{ \%./s}$) und R_{eLUB} ($\dot{\epsilon} = 5/60 \text{ \%./s}$) berücksichtigt. Die Auswertung nach Gl. 6.1 und 6.2 ergab die folgenden Regressionsgleichungen. Die Dimension für $R_{eL,\dot{\epsilon}}$ und R_{eS} ist N/mm²; $\dot{\epsilon}$ ist in %./s einzusetzen.

Nach Gl. 6.1 ergaben sich für den St37

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} (1+0.130 \dot{\epsilon}^{0.135}) \quad (n = 535 \text{ Messungen})$$

sowie für den St52

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} (1+0.075 \dot{\epsilon}^{0.058}) \quad (n = 150 \text{ Messungen}).$$

Nach Gl. 6.2 ergaben sich für den St37

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} + 32.5 \dot{\epsilon}^{0.154} \quad (n = 535 \text{ Messungen})$$

sowie für den St52

$$R_{eL,\dot{\epsilon}} = R_{eS} + 26.8 \dot{\epsilon}^{0.056} \quad (n = 150 \text{ Messungen}).$$

6.6 ÜBERGANG VOM FLIEßBEREICH IN DEN VERFESTIGUNGSBEREICH

Zur Beschreibung des Übergangs vom Fließ- in den Verfestigungsbereich werden die Lüdersdehnung und der Verfestigungsmodul angegeben. Da beide Materialkennwerte von der Dehngeschwindigkeit abhängen, wurde die Dehngeschwindigkeit auf 5/60 %/s festgelegt. Die Bestimmung der Materialkennwerte ist im Anhang A1.3.6 beschrieben. Im Bild 6.8 sind die Histogramme getrennt für die Stähle St37 und St52 dargestellt.

Da die Verwechslungen auf die Ergebnisse praktisch keine Auswirkung haben, sind in dem Bild 6.8 die als verwechselt definierten Stähle mit aufgenommen worden.

Bereits im Abschnitt 5.2 wurde darauf hingewiesen, daß $A_{l\dot{u}}$ und E_v Materialkennwerte sind, die selbst bei Zugproben aus einer Blechtafel stark streuen.

Da bei 4 bzw. 5 Proben des St37 bzw. St52 kein Fließbereich vorhanden war, konnte keine Lüdersdehnung ermittelt werden. In die-

sen Fällen ist $A_{1\ddot{u}} = 0$. Die Auswertung nach Bild 6.8 und Tabelle 6.9 wurde jedoch ohne Berücksichtigung dieser Stähle durchgeführt. Sie gilt somit nur für Stähle mit Fließbereich.

$A_{1\ddot{u}}$ hat mit 16.5 %, bzw. 16.8 %, bei beiden Stählen ungefähr den gleichen Erwartungswert bei annähernd gleicher Streuung. Die 5%-Fraktilen betragen mit $A_{1\ddot{u}} \approx 6-7\%$ nur das 3-5fache der elastischen Dehnung.

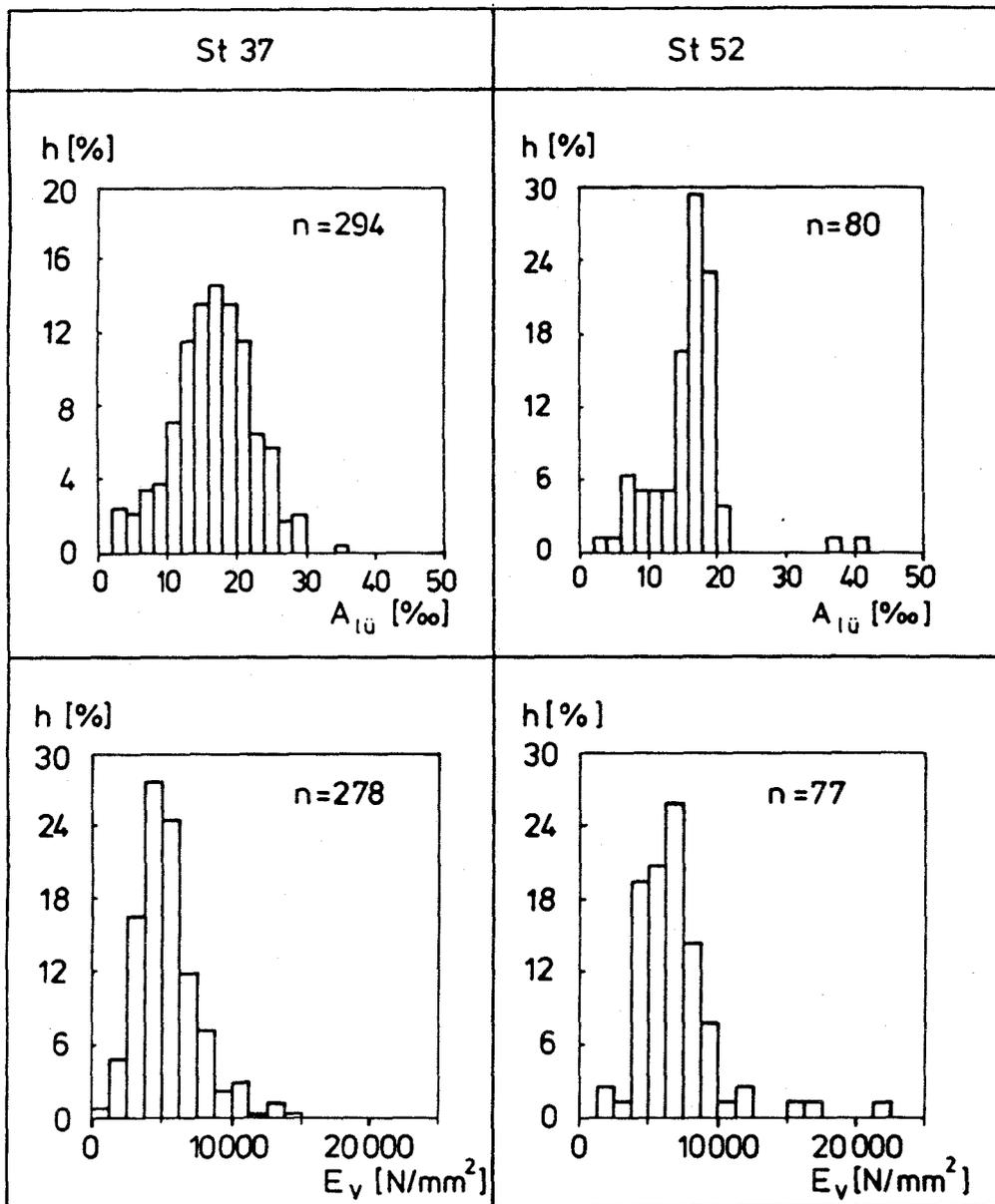


Bild 6.8. Relative Häufigkeiten für $A_{1\ddot{u}}$ und E_v für die Stähle St37 und St52

Tabelle 6.9. Auswertung von $A_{l\ddot{u}}$ und E_v für die Stähle St37 und St52

	Anzahl	Fkt. Typ	Parameter			K/S-Testgr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- St37 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_v /N/mm ² /	269	SFK	560	13960		0.084	2330	5020	9260
		NV	5330	2110			1850	5330	8800
		LNV	8.50	0.420	0		0.063	2460	4910
$A_{l\ddot{u}}$ /‰/	283	SFK	2.5	35		0.023	6.6	16.8	25.7
		NV	16.7	5.6			7.5	16.7	25.9
		LNV	2.75	0.413	0		0.092	7.9	15.6
--- St37 mit Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_v /N/mm ² /	278	SFK	560	13960		0.088	2330	5020	9590
		NV	5360	2150			1930	5336	9010
		LNV	8.50	0.421	0		0.042	2470	4930
$A_{l\ddot{u}}$ /‰/	294	SFK	2.5	35		0.021	6.2	16.8	25.7
		NV	16.7	5.6			7.4	16.7	25.9
		LNV	2.74	0.423	0		0.103	7.7	15.5
--- St52 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_v /N/mm ² /	75	SFK	2000	22000		0.156	2730	6410	11630
		NV	6920	3010			2260	6920	12210
		LNV	8.77	0.384	0		0.096	3410	6410
$A_{l\ddot{u}}$ /‰/	78	SFK	3.9	42		0.171	6.2	16.5	20.0
		NV	16.0	5.6			6.8	16.0	25.2
		LNV	2.71	0.377	0		0.160	8.1	15.0
--- St52 mit Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
E_v /N/mm ² /	77	SFK	2000	22000		0.131	2730	6410	11600
		NV	6880	2980			2260	6880	12130
		LNV	8.76	0.381	0		0.095	3410	6380
$A_{l\ddot{u}}$ /‰/	80	SFK	3.9	42		0.160	6.3	16.5	20.2
		NV	16.0	5.5			6.9	16.0	25.1
		LNV	2.71	0.374	0		0.150	8.1	15.0

Die 50%-Fraktilen des Verfestigungsmoduls E_v betragen mit 5000, bzw. 6400 N/mm² nur ca. 1/30-1/40 des E-Moduls und streuen mit Variationskoeffizienten $v > 40$ % stark. Da der Verfestigungsmodul als Tangentenmodul im Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich im Rahmen dieser Arbeit definiert worden ist, kennzeichnet er nur die Anfangssteigung, d.h. alle anderen Tangenten an die Spannungs-Dehnungs-Kurve im Verfestigungsbereich haben eine kleinere Steigung.

6.7 VERFESTIGUNGSBEREICH

6.7.1 Allgemeines

Sowohl Zugfestigkeit als auch Gleichmaß- und Bruchdehnung werden mit steigender Belastungsgeschwindigkeit größer /6,9/.

Durch Vorversuche wurde festgestellt, daß der Spannungsabfall $\Delta\sigma$ von der dynamischen Spannungs-Dehnungs-Kurve auf den statischen Wert über den gesamten Verfestigungsbereich nicht konstant ist, sondern mit zunehmender Dehnung größer wird. Ab einer bestimmten Dehnung fällt die Spannung auch noch nach mehreren Stunden, wie eigene Vorversuche und Versuche von Jäniche/Thiel /41/ bestätigen.

Um eine Aussage über die statische Zugfestigkeit machen zu können, wurde der Spannungsabfall bei $\epsilon \approx 60$ % gemessen. Die Definition und rechnerische Bestimmung der statischen Zugfestigkeit $R_{m,s}$ ist im Anhang A1.3.7 beschrieben.

Da die Versuche im Verfestigungsbereich weggeregelt durchgeführt worden sind und die Belastungsgeschwindigkeit für alle Versuche konstant sein muß, wurde die Querhauptgeschwindigkeit so eingestellt, daß die Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} \approx 1$ %/s betrug (s. Abschnitt 4.2, Seite 64).

6.7.2 Zugfestigkeit

Im Bild 6.9 sind die Histogramme der statischen Zugfestigkeit $R_{m,s}$ und der Zugfestigkeit R_m dargestellt. Die als verwechself definierten Stähle sind in den Histogrammen mit aufgenommen worden.

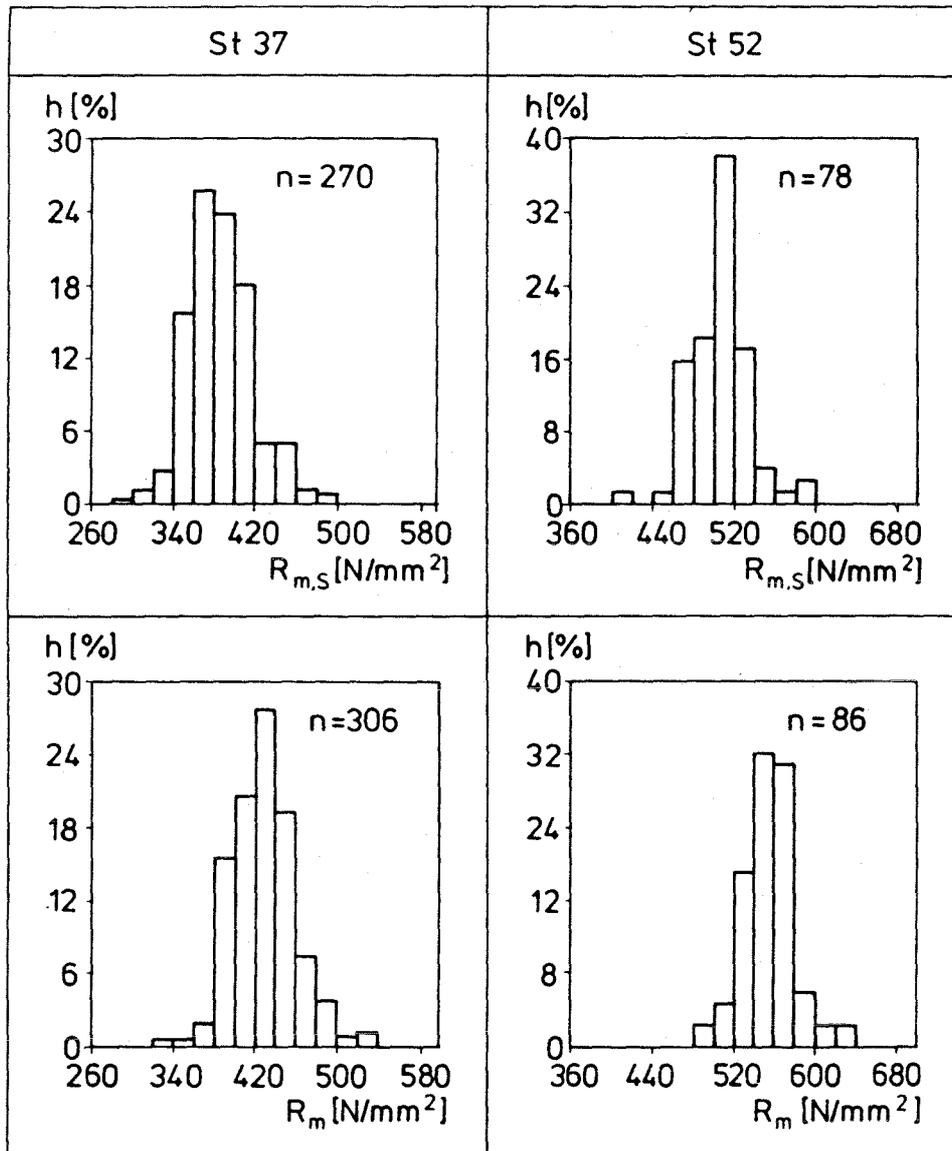


Bild 6.9. Histogramme der Zugfestigkeiten R_m und $R_{m,s}$ für die Stähle St37 und St52

In Tabelle 6.10 sind die Auswertungen für den Verfestigungsbereich zusammengestellt.

Tabelle 6.10. Auswertung der Materialkennwerte für den Verfestigungsbereich

St37

	Anzahl n	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- ohne Berücksichtigung von verwechselten Stählen ---									
R_m /N/mm ² /	296	SFK	329	534		0.039 0.032	385	425	485
		NV	428.5	31.7			376	429	481
		LNV	5.14	0.190	254.5		381	426	486
$R_{m.s}$ /N/mm ² /	260	SFK	270	499		0.043 0.038	340	382	442
		NV	386.0	32.5			333	386	439
		LNV	5.58	0.123	120.0		335	384	443
A_5 / % /	295	SFK	247	471		0.054 0.068	278	373	425
		NV	366.2	42.9			296	366	437
		LNV	5.90	0.124	0		297	363	445
A_g / % /	267	SFK	125	293		0.042 0.073	155	203	234
		NV	201.4	23.1			163	201	239
		LNV	5.06	0.154	41.9		164	200	245
--- mit Berücksichtigung von verwechselten Stählen ---									
R_m /N/mm ² /	306	SFK	329	594		0.066 0.038	385	427	501
		NV	431.9	36.8			371	432	492
		LNV	5.15	0.206	256.6		379	428	497
$R_{m.s}$ /N/mm ² /	270	SFK	270	577		0.072 0.055	340	383	455
		NV	390.1	38.9			326	390	454
		LNV	5.52	0.143	126.8		335	388	457
A_5 / % /	306	SFK	247	471		0.053 0.066	278	371	424
		NV	364.3	43.4			296	366	437
		LNV	5.89	0.125	0		294	362	444
A_g / % /	278	SFK	125	293		0.038 0.071	154	202	234
		NV	200.2	23.6			162	200	239
		LNV	5.05	0.159	42.0		162	199	245

St52

	Anzahl n	Fkt. Typ	Parameter			K/S- Test- gr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- ohne Berücksichtigung von verwechselten Stählen ---									
R_m /N/mm ² /	84	SFK	484	630		0.109 0.135	515	557	582
		NV	554.9	26.1			512	555	598
		LNV	5.29	0.134	355.8		514	553	602
$R_{m.s}$ /N/mm ² /	76	SFK	412	583		0.058 0.072	461	509	543
		NV	505.1	27.9			459	505	551
		LNV	5.67	0.097	212.9		461	504	555
A_5 / % /	84	SFK	231	383		0.049 0.061	275	325	360
		NV	323.6	28.1			277	324	370
		LNV	5.78	0.090	0		278	322	374
A_g / % /	78	SFK	118	186		0.033 0.055	125	161	179
		NV	159.8	14.0			137	160	183
		LNV	4.73	0.132	46.0		137	159	186
--- mit Berücksichtigung von verwechselten Stählen ---									
R_m /N/mm ² /	86	SFK	443	630		0.130 0.144	491	556	582
		NV	552.5	30.6			503	553	602
		LNV	5.85	0.092	205.2		503	551	608
$R_{m.s}$ /N/mm ² /	78	SFK	392	583		0.076 0.102	412	508	543
		NV	502.4	32.4			449	502	556
		LNV	5.80	0.103	168.8		449	500	562
A_5 / % /	86	SFK	231	383		0.051 0.063	275	325	360
		NV	324.0	27.9			278	324	370
		LNV	5.78	0.089	0		279	323	374
A_g / % /	80	SFK	118	197		0.036 0.051	125	162	182
		NV	160.7	14.9			136	161	185
		LNV	4.73	0.138	46.5		137	160	189

Aus der Auswertung kann für beide Stähle festgestellt werden, daß die Mindestzugfestigkeit nach DIN 17 100 nicht in allen Fällen eingehalten wird. Beim St37 liegen einige Stähle unter- bzw. oberhalb der Grenzwerte. Entsprechend liegen beim St52 insgesamt drei Werte unterhalb des Mindestwertes.

Die statische Zugfestigkeit liegt im Mittel um ca. 50-60 N/mm² niedriger als die Zugfestigkeit.

6.7.3 Gleichmaß- und Bruchdehnung

Üblicherweise wird im Standardzugversuch die Bruchdehnung A_5 angegeben und mit den Mindestwerten verglichen, um stark vorverformte Erzeugnisse aussortieren zu können.

Die maßgebende Kenngröße des Verformungsvermögens eines Stahls ist jedoch die Gleichmaßdehnung A_g . Die Differenzdehnung $A_5 - A_g$ ist die Einschnürdehnung. Sie spielt im Stahlbau jedoch keine wesentliche Rolle. Der Bereich der Einschnürdehnung wird gezielt in der Umformtechnik zur Erzielung sehr hoher Festigkeiten eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Einschnürdehnung nicht ausgewertet.

Im Bild 6.10 sind die Histogramme der Bruchdehnung und Gleichmaßdehnung mit Berücksichtigung der als verwechselt definierten Stähle dargestellt. Die Auswertung ist Tabelle 6.10 zu entnehmen.

Festzustellen ist, daß sowohl die Bruch- als auch die Gleichmaßdehnung beim St37 um ca. 40-50 % größer als beim St52 sind. Wird die 5%-Fraktile der Lüdersdehnung und der Gleichmaßdehnung verglichen, kann festgestellt werden, daß die Gleichmaßdehnung ca. 25 mal größer ist, d.h. ein nicht stabilitätsgefährdetes Bauteil, das nach der Fließgelenk-, bzw. Fließzonentheorie bemessen wurde, wird sich bis zum Bruch ca. 25 mal mehr verformen können. Die Last kann dagegen nur um ca. 50 % gesteigert werden.

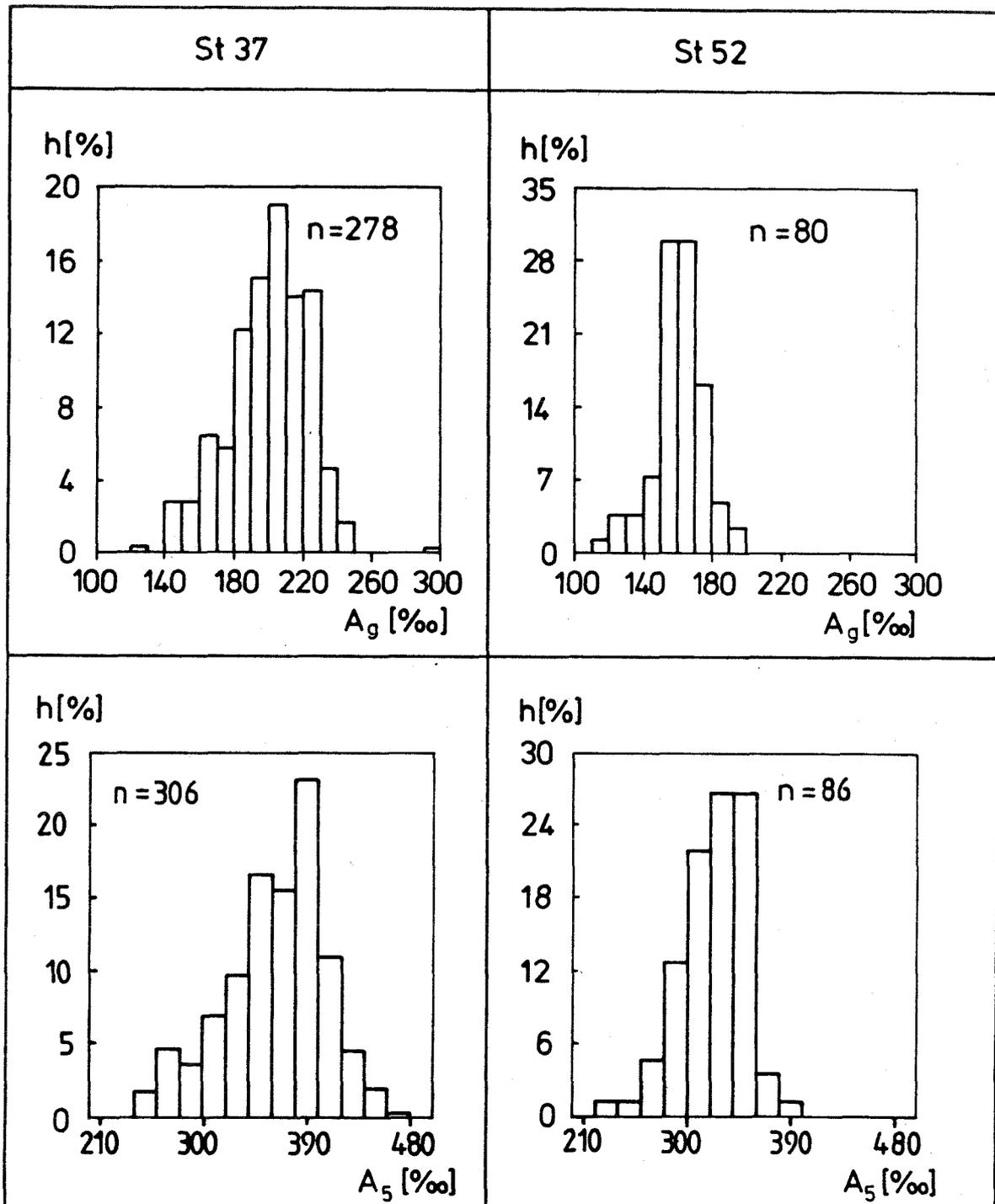


Bild 6.10. Histogramme für A_5 und A_g für die Stähle St37 und St52

6.7.4 Beschreibung des Verfestigungsbereiches mit der Ludwik-gleichung

Zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungskurve im Verfestigungsbereich sind in der neueren Literatur verschiedene Ansätze gemacht worden. Hier sind speziell ganzrationale Polynome, Exponential-

funktionen oder Klothoiden zu nennen /6,9,42/. Sie liefern jedoch jeweils nur für eine spezielle Arbeitslinie eine gute Anpassungsfunktion.

Im Anhang A1.3.7 wurde deshalb der Verfestigungsbereich mit einem ganzrationalen Polynomansatz zur Bestimmung der Gleichmaßdehnung und der Zugfestigkeit gewählt.

Ein einfacher Ansatz mit nur zwei Parametern, der auch für eine statistische Auswertung herangezogen werden kann, ist die Ludwik-Gleichung:

$$\sigma_w = k_1 \varphi^n \quad (6.4)$$

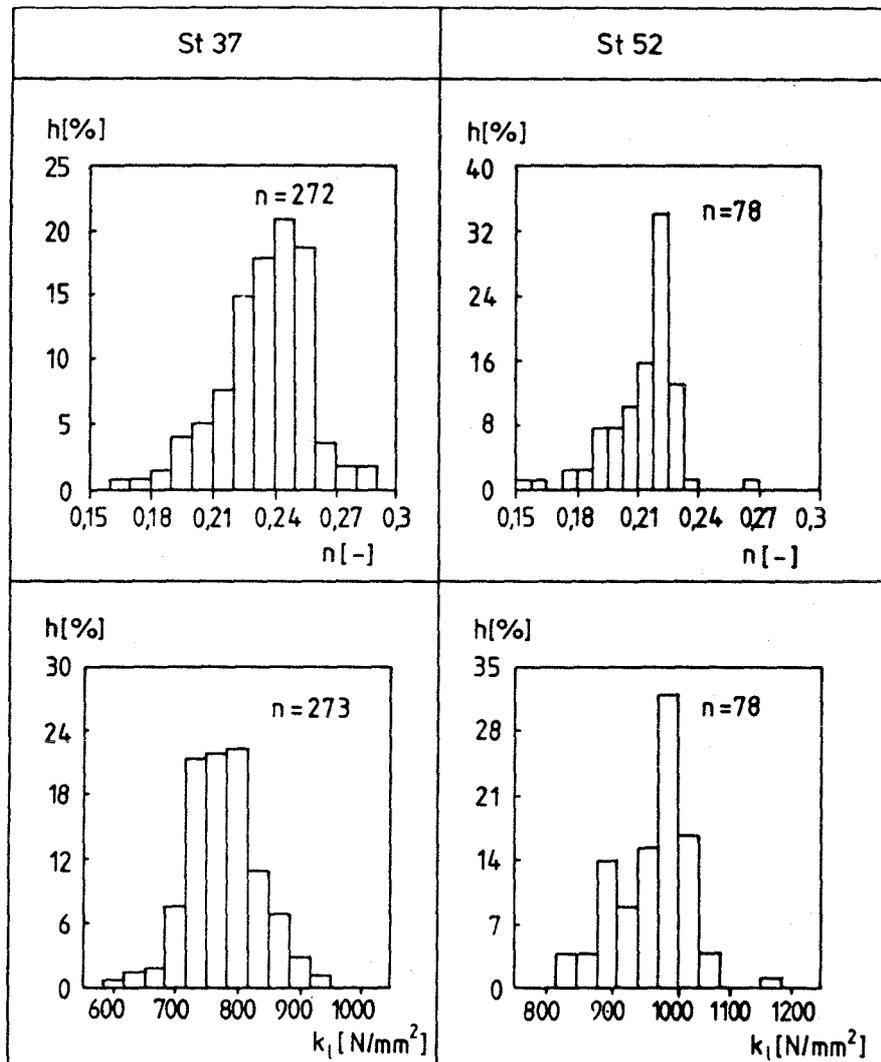


Bild 6.11. Histogramme für k_1 und n

Sie ist z.B. in /6,9,19/ ausführlich beschrieben. Die Parameter sind temperatur- und geschwindigkeitsabhängig. Der Einschnürbereich wird nicht erfaßt. Durch Erweiterung der Gleichung nach Hollomon können Temperatur- und Dehngeschwindigkeit, sowie der Einschnürbereich mit erfaßt werden /19/. Die erweiterte Gleichung ist jedoch für eine statistische Auswertung ungeeignet und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Da die

Tabelle 6.11. Auswertung von k_1 und n für die Stähle St37 und St52

Kenngröße	Anzahl n	Fkt. Typ	Parameter			K/S-Testgr.	Fraktile		
			θ_1	θ_2	θ_3		5%	50%	95%
--- St37 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
n /--/	273	SFK	0.166	0.289			0.194	0.239	0.264
		NV	0.236	0.021		0.052	0.201	0.236	0.271
		LNV	0.136	-1.789	0.067	0.075	0.201	0.234	0.276
k_1 /N/mm ² /	273	SFK	603	999			689	777	876
		NV	778.2	58.6		0.032	682	778	875
		LNV	0.251	5.500	526.2	0.042	688	771	896
--- St52 ohne Berücksichtigung der verwechselten Stähle ---									
n /--/	78	SFK	0.152	0.265			0.152	0.217	0.229
		NV	0.212	0.017		0.136	0.184	0.212	0.240
		LNV	0.140	-1.768	0.038	0.175	0.175	0.204	0.253
k_1 /N/mm ² /	78	SFK	823	1154			837	989	1045
		NV	973.3	61.7		0.103	872	973	1075
		LNV	0.129	6.205	473.2	0.130	874	968	1086

Versuche bei Raumtemperatur mit einer Dehngeschwindigkeit von $\dot{\epsilon} = 1 \text{ \%}/\text{s}$ durchgeführt wurden, kann die Auswertung nach Gl. 6.4 durchgeführt werden. In Bild 6.11 sind die Histogramme für k_1 und n dargestellt. Da die Parameter von der Stahlsorte abhängen, wurde die Auswertung ohne die verwechselten Stähle durchgeführt.

Eine Korrelationsrechnung ergab keine Abhängigkeit von k_1 zu n , so daß eine Unabhängigkeit vorausgesetzt wird. In Tabelle 6.11 sind die Auswertungen für k_1 und n zusammengestellt. Um eine Grenzkurve für den Verfestigungsbereich zu erhalten, müssen jeweils die größeren bzw. kleineren Werte für k_1 und n eingesetzt werden. Es ist jedoch durch die Beschreibung des Verfestigungsbereiches mit nur zwei Parametern festzuhalten, daß die Regressionskurven sich nur näherungsweise an die im Versuch ermittelten Kurven anpassen. Ein Beispiel ist im Anhang A1.3.7 angegeben.

6.8 KERBSCHLAGARBEIT

Insgesamt wurde 3*27 Kerbschlagversuche durchgeführt. Die Versuche wurden aus den Proben entnommen, von denen Bescheinigungen vorlagen und aus denen Prüfkörper gefertigt werden konnten.

Es wurden die Mittelwerte aus jeweils 3 Versuchen ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.12 zusammengestellt. Da die Anzahl der Versuche klein ist, werden keine Fraktilen angegeben.

Es kann festgestellt werden, daß sämtliche Werte die Mindestwerte nach DIN 17 100 überschreiten.

Tabelle 6.12. Auswertung der Kerbschlagarbeiten /J/ für die Stähle St37 und St52

An- zahl n	Fkt. Typ	Parameter			An- zahl n	Fkt. Typ	Parameter		
		θ_1	θ_2	θ_3			θ_1	θ_2	θ_3
	---	St37			---	St52			
22	SFK	114	243		5	SFK	78	209	
	NV	164.3	34.7			NV	154.2	54.6	
	LNV	5.080	0.212	0		LNV	4.963	0.403	0

6.9 ABHÄNGIGKEIT DER WERKSTOFFKENNWERTE VON DER ERZEUGNISFORM

Die Abhängigkeit der Festigkeitskennwerte von den verschiedenen Erzeugnisformen wurde mit dem K/S-Test für unabhängige Stichproben entsprechend Abschnitt 2.5.2 getestet.

Die Auswertung wurde ausschließlich für den St37 durchgeführt, weil für den St52 zu wenig Daten vorlagen. In Tabelle 6.13 sind die Auswertungen zusammengefaßt.

Es kann festgestellt werden, daß die Verteilungsfunktionen der Festigkeitskennwerte der Flachstähle sich signifikant von denen der anderen Erzeugnisse unterscheiden. Eine Untersuchung der Ursachen wird an dieser Stelle nicht durchgeführt. Vermutlich ist durch die Walzungen das Gefüge des Stahls verändert worden. Eine Untersuchung des Gefüges und des Gehaltes an Legierungselementen zur Ermittlung der Unterschiede ist in Vorbereitung.

Tabelle 6.13. K/S-Test für die verschiedenen Erzeugnisse

Material- kenngröße	Bleche - Profile			Bleche - Flachst.			Flachst. - Profile		
	n ₁	n ₂	Ann.	n ₁	n ₂	Ann.	n ₁	n ₂	Ann.
R _{eH}	87	115	a.	87	48	n.a.	48	115	a.
R _{p0,2}	102	140	a.	102	54	n.a.	54	140	n.a.
R _m	102	140	a.	102	54	a.	54	140	a.
R _{eS}	101	136	a.	101	53	n.a.	53	136	n.a.
E ₁	91	134	a.	91	31	a.	53	134	a.
A _{1ü}	92	137	a.	92	54	a.	54	137	n.a.
A _g	86	127	a.	86	51	a.	51	127	n.a.
A ₅	102	140	n.a.	102	54	a.	54	140	n.a.

a. = kein signifikanter Unterschied festgestellt
n.a. = signifikanter Unterschied festgestellt

6.10 . KORRELATION

Die Abhängigkeit zwischen den einzelnen Festigkeitskennwerten wird mit einer Korrelationsrechnung überprüft. Entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 2.5.2 bezieht sich die Korrelationsrechnung jeweils nur auf zwei Festigkeitskennwerte und ist somit nur ein Anhaltswert. In Tabelle 6.14 sind die Korrelationskoeffizienten getrennt für die Stähle St37 und St52 angegeben.

Die Korrelation der Streckgrenzen untereinander ist naturgemäß groß.

Ausgeprägt sind die Korrelationen der unteren Streckgrenze zur Zugfestigkeit sowie die der Gleichmaßdehnung zur Zugfestigkeit und Streckgrenze.

Tabelle 6.14. Korrelationskoeffizienten für die Stähle St37 und St52

	R_p	$R_{p0,2}$	$R_{eL UA1}$	R_{eS}	R_m	$R_{m,S}$	A_g	A_5	E_1	E_2	E_3	E_v	$A_{1ü}$
R_p	-	0.84	0.82	0.82	0.56	0.54	-0.22	-0.15	-	0.21	0.15	-	0.33
$R_{p0,2}$	0.90	-	0.98	0.99	0.70	0.66	-0.39	-0.32	-	-	-	-0.16	0.13
$R_{eL UA1}$	0.92	0.99	-	0.97	0.73	0.69	-0.39	-0.30	-	-	-	-0.16	0.13
R_{eS}	0.91	0.98	0.98	-	0.73	0.69	-0.38	-0.27	-	-	-	-0.17	0.12
R_m	0.31	0.45	0.51	0.50	-	0.93	-0.48	-0.41	-	-	0.14	-	-0.22
$R_{m,S}$	0.35	0.43	0.50	0.51	0.95	-	-0.48	-0.41	-	-	0.14	-	-0.22
A_g	-0.38	-0.46	-0.53	-0.52	-0.54	-0.50	-	0.65	-	0.20	-	0.18	0.51
A_5	-	-	-0.20	-0.22	-0.26	-0.54	0.59	-	-	-	-	-	0.48
E_1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.32	0.15	-	-
E_2	-	-0.20	-0.19	-0.21	-	-	-	-	0.37	-	0.43	-	0.30
E_3	-0.22	-0.29	-0.28	-0.30	-	-	-	-0.22	-	0.36	-	-	-
E_v	-0.23	-0.16	-0.18	-0.21	-	0.19	0.18	-	-0.31	-	-	-	0.19
$A_{1ü}$	0.46	0.29	0.28	0.30	-	-	0.30	0.26	-	0.25	-0.23	-	-

— St52 —

— St37 —

rechte obere Hälfte : St37

linke untere Hälfte : St52

Auf eine Regressionsrechnung wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet, weil die Festigkeitskennwerte vom Gefügebautbau und von der chemischen Zusammensetzung abhängen. Die Untersuchungen werden im Rahmen der Auswertung der chemischen Analyse und der Gefüge durchgeführt.

7 VERGLEICH DER ERGEBNISSE AUS BESCHEINIGUNGEN UND FREMDPRÜFUNG

In den bisherigen Ausführungen wurden zwei Stichproben vorgestellt und ausgewertet, die eine mit relativ großem Umfang (Bescheinigungen), der jederzeit beliebig erweiterbar ist und die andere mit kleinem Umfang (Fremdprüfung), die alle zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens der Allgemeinen Baustähle erforderlichen Materialkennwerte erfaßt. Bei der zweiten Stichprobe, der Fremdprüfung, ist der Aufwand jedoch relativ hoch, so daß der Umfang nicht beliebig erweiterbar ist.

So stellt sich die Frage, ob beide Stichproben zusammengefaßt werden können, also ob sie aus derselben Grundgesamtheit stammen, um mit einem relativ kleinem Stichprobenumfang auch größere Datenmengen erfassen zu können.

Eine ähnliche Fragestellung wurde bereits bei der Auswertung der Bescheinigungen untersucht, als die Ergebnisse aus den Bescheinigungen der Deutschen Bundesbahn und der Betriebe verglichen wurden. Dort wurde festgestellt, daß die Materialkennwerte der Stähle dieser beiden Gruppen sich signifikant unterscheiden und sie deshalb nur bedingt zu einer Stichprobe zusammengefaßt werden können.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle vorerst geklärt, inwieweit diese beiden Stichproben aus einer Grundgesamtheit stammen und wo sie unterschiedlich sind.

Die Stichprobe für die Fremdprüfung wurde ausschließlich deutschen Stahlbaubetrieben entnommen; die Auswahl der Betriebe (Abschnitt 3) erfolgte hinsichtlich der Betriebsgröße, d.h. die Stichprobe wurde aus kleinen, mittleren und großen Betrieben entnommen, und der Stichprobenzeitraum war auf ein Jahr (November 1985 - Oktober 1986) beschränkt.

Vergleichbar ist deshalb nur die Auswertung der Bescheinigungen für die nach 1979 geprüften Stähle der Betriebe. Hier stammen die Bescheinigungen jedoch nur von größeren Betrieben, und diese

Stähle sind grundsätzlich mit von den Stahlherstellern ausgestellten Bescheinigungen geliefert worden.

Viele Betriebe bestellen und kaufen die Stähle über den Zwischenhandel, also nicht direkt bei den Herstellern (Fachjargon: Strecke). Sicherlich ändern sich die Materialkennwerte eines Stahles auf dem Weg vom Hersteller über den Handel bis in die Betriebe nicht. Auf diesem Weg können aber auch Stähle ohne Bescheinigungen in die Betriebe gelangen, die nicht die Anforderungen der DIN 17 100 erfüllen. Eventuell kommen auch diejenigen Stähle in die Betriebe, die durch die Gütekontrolle der Hersteller zurückgewiesen wurden.

Festgehalten werden kann, daß die Stähle mit Bescheinigungen grundsätzlich einer Gütekontrolle unterworfen worden sind und sie diese bestanden haben.

Das gleiche kann für die Stähle, die durch die Fremdprüfung erfaßt wurden, nicht festgestellt werden, weil nur 28 Bescheinigungen (von 395 theoretisch möglichen) vorgelegt wurden.

Bestätigt wird diese Vermutung durch die Auswertung:

Eine ausgeprägte Gütekontrolle wurde bei den Bescheinigungen nachgewiesen, man konnte einen Filter bei der oberen Streckgrenze feststellen. Dieser Filter war bei der Fremdprüfung nicht nachweisbar, d.h. viele Stähle erfüllten nicht die Mindestwerte der oberen Streckgrenze bzw. die Grenzwerte der Zugfestigkeit nach DIN 17 100.

Weil für die Bemessung der Stahlbauwerke i. allg. ausschließlich die obere Streckgrenze maßgebend ist, jedoch nicht die Zugfestigkeit und die Bruchdehnung, wird in den nachfolgenden Untersuchungen die Verteilung der oberen Streckgrenzen beider Stichproben verglichen.

Die Verteilung der oberen Streckgrenze aus den Auswertungen der Bescheinigungen und der Fremdprüfung unterscheiden sich signifikant, was allein aus dem Nachweis der Filter hervorgeht. Nimmt man an, daß die Gesamtheit aller Stähle vor der Gütekontrolle in beiden Fällen die gleiche ist, so könnte folgende Untersuchung einen Aufschluß geben:

Angenommen, daß Stähle, die zurückgewiesen werden müßten, gelangen in den Handel und die Stichprobe der Fremdprüfung stellt die gleiche Gesamtheit wie vor der Gütekontrolle dar. Dann müssen die Dichtefunktionen für eine Normalverteilung mit den Parametern (μ_1 und σ_1) aus der Berechnung der normalverteilten Grundgesamtheit mit Filterfunktion nach Gl. 2.6 für die Bescheinigungen und die der Normalverteilung nach Gl. 2.2 (μ und σ) für die Fremdprüfung in etwa übereinstimmen.

In Tabelle 7.1 sind diese Parameter aus den Tabellen 2.5 sowie 6.4 und 6.5 zusammengestellt. Für diese Auswertung sind die als verwechselt definierten Stähle nicht berücksichtigt worden.

Tabelle 7.1. Parameter der Normalverteilung für die Gesamtheit aller Stähle aus Bescheinigungen und Fremdprüfung für die obere Streckgrenze

Stahl- sorte	t /mm/	Bescheinigungen			Fremdprüfung		
		n	μ_1	σ_1	n	μ	σ
St37	< 0-≤16	973	285.8	32.7	233	297.7	35.1
	< 16-≤40	220	251.6	21.2	52	272.9	26.7
St52	< 0-≤16	30	412.5	34.7	54	402.0	36.2
	< 16-≤40	23	407.6	30.8	30	392.1	31.0

Es kann festgestellt werden, daß die Streuungen der Ergebnisse der Fremdprüfung deutlich größer als diejenigen der Bescheinigungen sind. Die Mittelwerte sind bei der Fremdprüfung beim St37 größer, beim St52 kleiner als diejenigen aus den Bescheinigungen. Die Verteilungen sind also unterschiedlich.

Auf die Gründe wird hier nur kurz eingegangen:

Als nicht verwechselt definiert und bei der Auswertung berücksichtigt wurden auch die Stähle, die zwar die Bedingungen der Gütenormen nicht erfüllen, jedoch nicht der jeweils anderen

Stahlsorte zugeordnet werden können.

So liegen beim St37 speziell bei der Zugfestigkeit viele Werte knapp ober- und unterhalb des Höchstwertes und beim St52 entsprechend um den Mindestwert. Die obere Streckgrenze ist entsprechend hoch bzw. niedrig.

Diese Feststellung kann für die Auswertung der Bescheinigungen nicht gemacht werden. Es wird vermutet, daß viele Stähle -wahrscheinlich über den Handel- vertrieben werden, die z.B. im Ausland nicht speziell als St37 oder St52 hergestellt werden und somit die Verteilung der Materialkennwerte dieser Stähle nicht mit derjenigen der Stahlsorten St37 und St52 übereinstimmt. Das bedeutet, die Streuungen werden größer und die Mittelwerte verschoben sich im Vergleich zu denjenigen, die gezielt als St37 oder St52 hergestellt werden.

Abschließend kann nur festgestellt werden, daß die beiden Stichproben nicht aus einer Grundgesamtheit stammen und somit nicht zusammengefaßt werden können.

8 MODELL DER SPANNUNGS-DEHNUNGS-KURVE VON BAUSTAHL

8.1 ALLGEMEINES

Eine Berechnung von Last-Verformungskurven und Traglasten muß i. allg. auf Bauteile bzw. Bauwerke mit bekannten Einwirkungen und Widerständen beschränkt bleiben. Die Berechnung von charakteristischen Bauteilwiderständen in Form von %-Fraktilen oder von Versagenswahrscheinlichkeiten ist i. allg. nicht möglich, weil Verteilungen nur für spezielle Einwirkungen und Widerstände bekannt sind.

In diesem Abschnitt wird für den Allgemeinen Baustahl mit den Ergebnissen der Fremdprüfung ein Modell zur Berechnung der Verteilungsfunktion der Spannung für beliebige Dehnungen vorgestellt. Hiermit können z.B. für eine Monte-Carlo-Simulation, wie sie in /28/ und /35/ zur Berechnung von Bauteilwiderständen vorgeschlagen wurden, Modelle wirklichkeitsnäher beschrieben werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Verteilungsfunktion in Form von Fraktilen angegeben, die bei vorgegebener Wahrscheinlichkeit über- bzw. unterschritten werden. Als Beispiel werden die 5, 50 und 95%-Fraktilen berechnet und in Form von Spannungs-Dehnungs-Kurven dargestellt.

8.2 VERTEILUNGSFUNKTION DER SPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER DEHNUNG

8.2.1 Allgemeines

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve wird in den elastischen Bereich, den Fließ- und in den Verfestigungsbereich eingeteilt. Zur Beschreibung werden E-Modul, Streckgrenze R_p , untere Streckgrenze

$R_{eL, \dot{\epsilon}}$, Lüders- und Gleichmaßdehnung $A_{1\dot{u}}$ und A_g sowie die Zugfestigkeit R_m berücksichtigt, deren Dichtefunktionen in Abschnitt 6 berechnet wurden. Eine Korrelation der Festigkeitskennwerte untereinander wurde vernachlässigt.

Die Verteilungsfunktion wird hierbei teilweise analytisch nach /44/ berechnet und teilweise mit einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt.

8.2.2 Zuordnung

8.2.2.1 Allgemeines

Die Spannungs-Dehnungs-Kurve wird in den elastischen Bereich, den Fließ- und in den Verfestigungsbereich unterteilt.

Um die Übergänge von einem Bereich in einen anderen beschreiben zu können, müssen die Wahrscheinlichkeiten bekannt sein, mit denen sich die Spannungs-Dehnungs-Kurve bei einer vorgegebenen Dehnung ϵ in einem bestimmten Bereich befindet. Für diese Dehnung ϵ kann die gemeinsame Dichtefunktion $f(x_1, x_2)$ zweier möglicher Ereignisse, z.B. elastischer Bereich und Fließbereich, x_1 und x_2 nach Bild 8.1 angegeben werden.

Die Verteilungsfunktion von x unter der Bedingung, daß x_1 maßgebend ist, d.h. $x_1 > x_2$, ist

$$F_1^*(x/x_1 > x_2) = 1/k_1 \int_{-\infty}^x \int_{x_2}^{\infty} f(x_1, x_2) dx_2 dx_1 \quad (8.1)$$

und entsprechend

$$F_2^*(x/x_2 > x_1) = 1/k_2 \int_{-\infty}^x \int_{x_1}^{\infty} f(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (8.2)$$

k_1 und k_2 sind Normierungskonstanten, die aus der Bedingung

$$F_1^*(\omega/x_1 > x_2) = 1 \text{ und } F_2^*(\omega/x_2 > x_1) = 1$$

bestimmt werden.

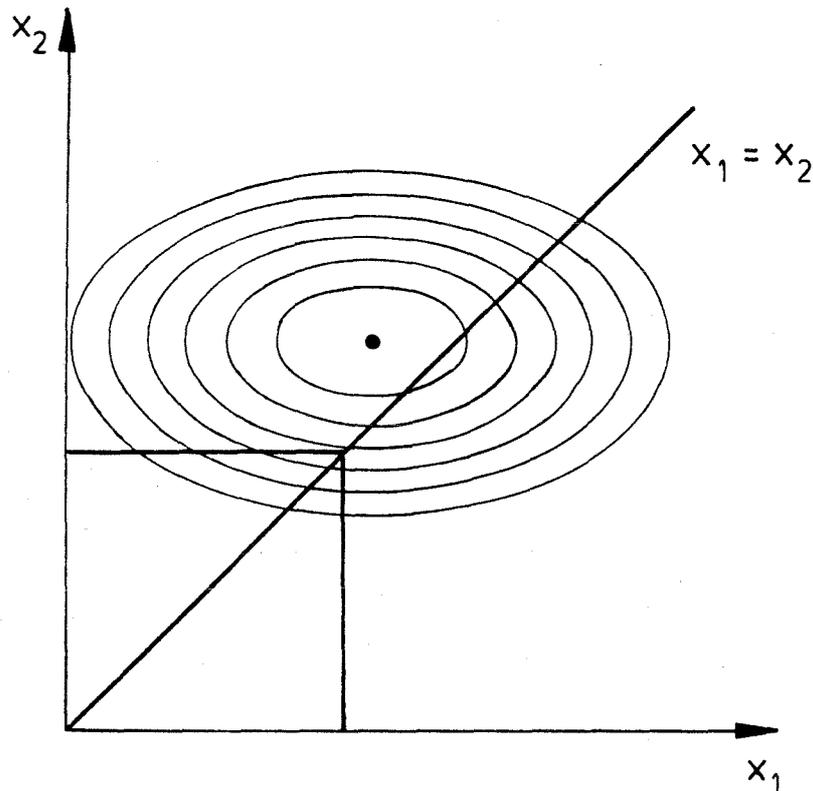


Bild 8.1. Gemeinsame Dichtefunktion zweier Ereignisse x_1 und x_2

p_1 wird im weiteren als die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, daß die Probe noch im elastischen Bereich, p_2 als die Wahrscheinlichkeit, daß die Probe noch nicht im Verfestigungsbereich und p_3 als die Wahrscheinlichkeit, daß die Gleichmaßdehnung größer als die tatsächliche Dehnung ist, bezeichnet.

Im folgenden wird angenommen, daß die Verteilungsfunktionen für p_1 , p_2 und p_3 unabhängig voneinander sind, d.h. $A_{1\bar{u}} > 0$ und $A_g \gg A_{1\bar{u}}$.

8.2.2.2 Übergang vom elastischen Bereich in den Fließbereich

Die Probe ist im Fließbereich, wenn $\sigma = E\epsilon > R_p$ ist. Unter der Annahme, daß E und R_p stochastisch unabhängig voneinander sind, vereinfacht sich Gl. 8.1 zu

$$F_1^*(x/R_p > E\epsilon) = 1/k_2 f(R_p) F(E\epsilon) \quad (8.3)$$

p_1 ist identisch mit der Normierungskonstante k_2 .

8.2.2.3 Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich

Die Wahrscheinlichkeit p_2 , daß der Verfestigungsbereich noch nicht erreicht ist, ist

$$p_2 = 1 - \frac{\int_{-\infty}^{\epsilon} (f(R_{eL}, \dot{\epsilon}/E) + f(A_{1\ddot{u}})) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} (f(R_{eL}, \dot{\epsilon}/E) + f(A_{1\ddot{u}})) dx} \quad (8.4)$$

Hierbei sind $R_{eL}, \dot{\epsilon}$, E und $A_{1\ddot{u}}$ streuende Größen. Unter der Annahme, daß die elastische Rückfederung $\epsilon_{e1} = R_{eL}, \dot{\epsilon}/E$ im Vergleich zu $A_{1\ddot{u}}$ klein ist und wenig streut, wird ϵ_{e1} als deterministische Größe aufgefaßt und mit den 50%-Fraktilen bzw. Erwartungswerten für R_{eL}, ϵ und E berechnet. Gl. 8.4 vereinfacht sich somit zu

$$p_2 = 1 - \int_{-\infty}^{\epsilon - \epsilon_{e1}} f(A_{1\ddot{u}}) dx. \quad (8.5)$$

8.2.2.4 Überschreitung der Gleichmaßdehnung

Entsprechend der Annahmen unter 8.2.2.3 mit $\epsilon_{el} = R_m/E$ ist

$$p_3 = 1 - \int_{-\infty}^{\epsilon - \epsilon_{el}} f(A_G) dx. \quad (8.6)$$

8.3 BESCHREIBUNG DER BEREICHE

8.3.1 Elastischer Bereich

Mit der Verteilungsfunktion für den E-Modul

$$F(E) = \int_{-\infty}^E f(E) dx, \quad (8.7)$$

der mit einer Wahrscheinlichkeit p unterschritten wird, ist die Verteilungsfunktion der Spannung bei bekannter Dehnung ϵ

$$F(\sigma_1) = F(E) \epsilon. \quad (8.8)$$

8.3.2 Fließbereich

Die Verteilungsfunktion wird mit der unteren Streckgrenze des Fließbereiches R_{eLUA1} angegeben

$$F(\sigma_2) = \int_{-\infty}^x f(R_{eL}, \dot{\epsilon}) dx. \quad (8.9)$$

8.3.3 Verfestigungsbereich

Die Verteilungsfunktion der Spannung im Verfestigungsbereich kann mit einfachen Ansätzen nicht beschrieben werden, weil zur Beschreibung des Bereiches mehrere Parameter notwendig sind, die nichtlinear miteinander verknüpft werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Spannungs-Dehnungs-Kurve mit einem quadratischen Ansatz approximiert. Andere Ansätze wie z.B. die Ludwik-Gleichung (s. Anhang A1.3.7) sind nicht geeignet, da sie den Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich nicht exakt beschreiben. Für die Berechnung werden die Festigkeitskennwerte E , $R_{eL,\epsilon}$, $A_{Lü}$, A_g und R_m benötigt. In Bild 8.2 ist die Realisation einer Arbeitslinie dargestellt.

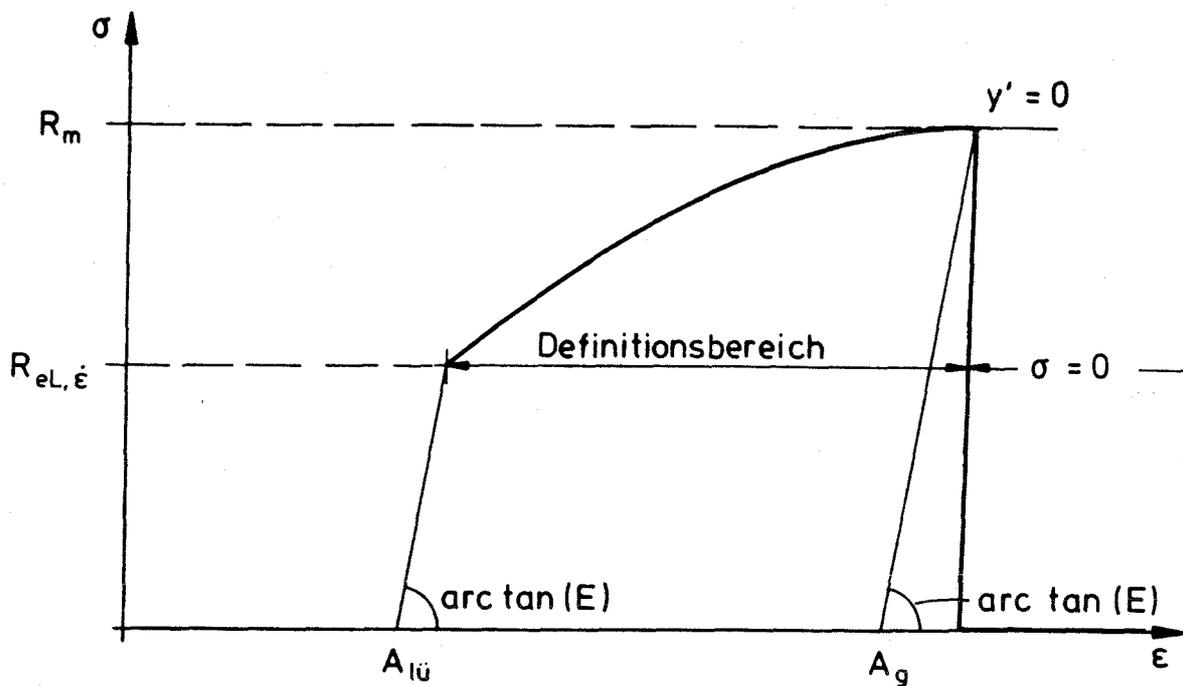


Bild 8.2 Berechnung der Arbeitslinie im Verfestigungsbereich

Ist die Dehnung größer als die Gleichmaßdehnung, wird die Spannung zu Null gesetzt, weil eine Dauerlast z.B. nach /6,30/

hier nicht mehr aufgenommen werden kann (s.a. Abschnitt 6.7).

Ist die Dichtefunktion der Spannung $f(E, R_{eL}, \dot{\epsilon}, A_{1\dot{u}}, A_g, R_m)$ für eine vorgegebene Dehnung bekannt, ist

$$F(\sigma_3) = \int_{-\infty}^x f(E, R_{eL}, \dot{\epsilon}, A_{1\dot{u}}, A_g, R_m) dx \quad (8.10)$$

die Verteilungsfunktion der Spannung im Verfestigungsbereich.

8.4 VERTEILUNGSFUNKTION DER SPANNUNG BEI BEKANNTER DEHNUNG

Die Verteilungsfunktion für eine beliebige Dehnung kann nur für den elastischen Bereich und den Fließbereich analytisch angegeben werden.

In diesem Fall sind zwei Verteilungsfunktionen F_a und F_b zu berücksichtigen, die mit den Wahrscheinlichkeiten p_a und $p_b = 1 - p_a$ auftreten können. Die gemeinsame Verteilungsfunktion kann nach dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit angegeben werden zu

$$F = F_a p_a + F_b (1 - p_a) \quad (8.11)$$

Für den elastischen Bereich und den Fließbereich mit $p_2 > 0.99$ ist $p_a = p_1$; F_a wird aus Gl. 8.8, F_b aus Gl. 8.9 berechnet.

Ab einer bestimmten Dehnung wird die Verteilungsfunktion durch Simulation mit der Monte-Carlo-Methode durchgeführt. Die Grundlagen dieses Verfahrens sind in /2,3,35/ beschrieben. Die Bereitstellung der notwendigen Zufallszahlen erfolgte entsprechend Paustian /28/.

Die Simulation wird durchgeführt, wenn $p_2 \leq 0.99$ ist.

Die Zuordnung zu den verschiedenen Bereichen erfolgt mit den Ansätzen nach Abschnitt 8.2.2, indem die vorgegebene Dehnung mit der aus den Zufallszahlen berechneten Lüders- und Gleichmaßdehnung mit elastischem Anteil verglichen wird:

$$\epsilon < A_{1\dot{u}} - \epsilon_{el} : \text{Fließbereich, } F(\sigma) \text{ nach GL. 8.9}$$

$$A_{1\dot{u}} - \epsilon_{el} \leq \epsilon \leq A_g - \epsilon_{el} : \text{Verfestigungsbereich, } F(\sigma) \text{ nach Gl. 8.10}$$

$$A_g - \epsilon_{el} < \epsilon : \text{Spannung } \sigma = 0.$$

7.5 PARAMETER DER SPANNUNGS-DEHNUNGS-KURVE

Für alle Parameter wurde eine Normalverteilung nach Gl. 2.2 angenommen. Sie sind im Abschnitt 6 angegeben. Für alle Berechnungen wurde der E-Modul E_1 als maßgebender E-Modul angesetzt. Als untere Streckgrenze wurde R_{eLUA1} gewählt.

Die Parameter der Dichtefunktionen aus Abschnitt 6 sind in Tabelle 8.1 zusammengestellt. Hierbei wurden die als verwechselt definierten Stähle nicht berücksichtigt.

Tabelle 8.1. Parameter der Spannungs-Dehnungs-Kurve

Material- kennwert	St37		St52	
	μ	σ	μ	σ
E /N/mm ² /	205500	6900	209200	5370
R _p /Nmm ² /	292.3	34.8	398.5	34.8
R _{eLUA1} /N/mm ² /	271.7	32.1	386.0	28.6
R _{eS} /N/mm ² /	253.5	30.5	357.3	30.9
A _{1\dot{u}} /%/	16.7	5.6	16.0	5.6
A _g /%/	201.4	23.1	159.8	14.0
R _m /N/mm ² /	428.5	31.7	554.9	26.1
R _{m,S} /N/mm ² /	386.0	32.5	505.1	27.9

Zur Beschreibung der Spannungs-Dehnungs-Kurve für niedrige Dehngeschwindigkeiten $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ wurde R_{eS} und $R_{m,S}$ gewählt. Es ist hierbei jedoch anzumerken, daß die Verteilungsfunktionen der Spannungen nur als "statische" Funktionen gelten, d.h. die Belastung muß mit einer Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} \rightarrow 0$ aufgebracht werden; wenn die Dehnung an einer Stelle angehalten wird und der Spannungsabfall abgewartet wird, ergibt sich für die Versuche die Verteilungsfunktion. Diese Einschränkung muß deshalb gemacht werden, weil $A_{1\dot{\epsilon}}$ und A_g von der Dehngeschwindigkeit abhängen. Die Abhängigkeit der Materialkennwerte von der Dehngeschwindigkeit bleibt unberücksichtigt.

8.6 DARSTELLUNG DER SPANNUNGS-DEHNUNGS-KURVE

Um die Verteilungsfunktion der Spannung in Abhängigkeit von der Dehnung zu beschreiben, wurden die 5,50 und 95%-Fraktilen berechnet.

In den Bildern 8.3 und 8.4 sind die Fraktilwerte in Form von Spannungs-Dehnungs-Kurven für die Stähle St37 und St52 für die dynamischen Festigkeitskennwerte R_{eLUA1} und R_m dargestellt. Im unteren Teil der Bilder ist die Verteilung der Spannung für den Dehnungsbereich $0 \leq \epsilon < 250\%$ dargestellt. Die Übergangsbereiche sind als Details A-C im oberen Teil der Bilder mit den Verteilungen für p_1 , p_2 und p_3 dargestellt.

Die 5%-Fraktilen geben die Spannung an, die mit 5% Wahrscheinlichkeit im Zugversuch unterschritten wird. Entsprechend kann mit der 95%-Fraktile die Spannung angegeben werden, die in 95% aller Fälle unter- bzw. in 5% aller Fälle überschritten wird.

Für die Simulation wurde die Anzahl der Realisationen für jede Dehnung auf 5000 beschränkt.

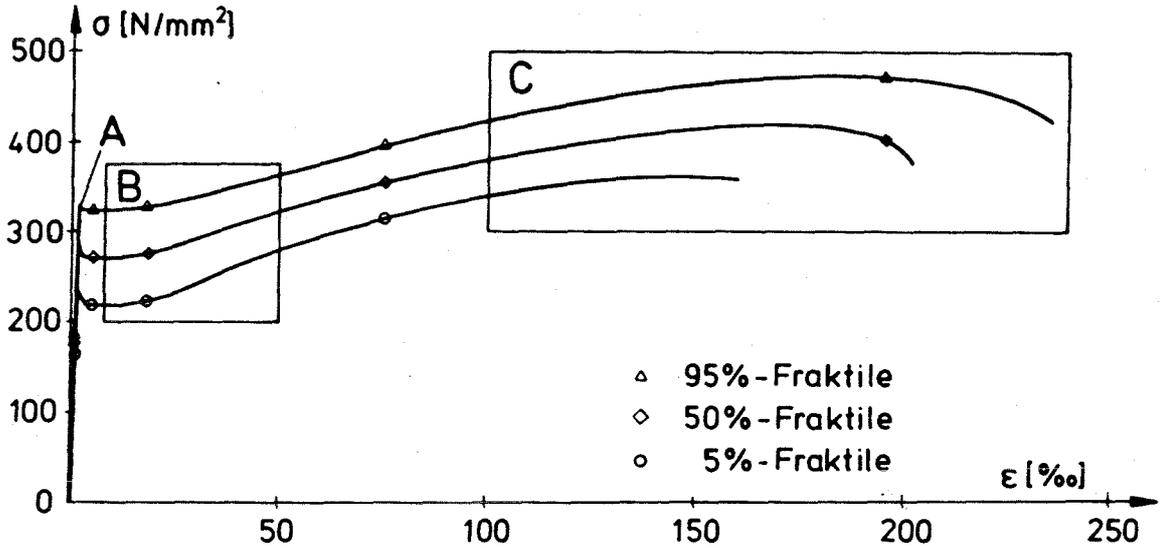
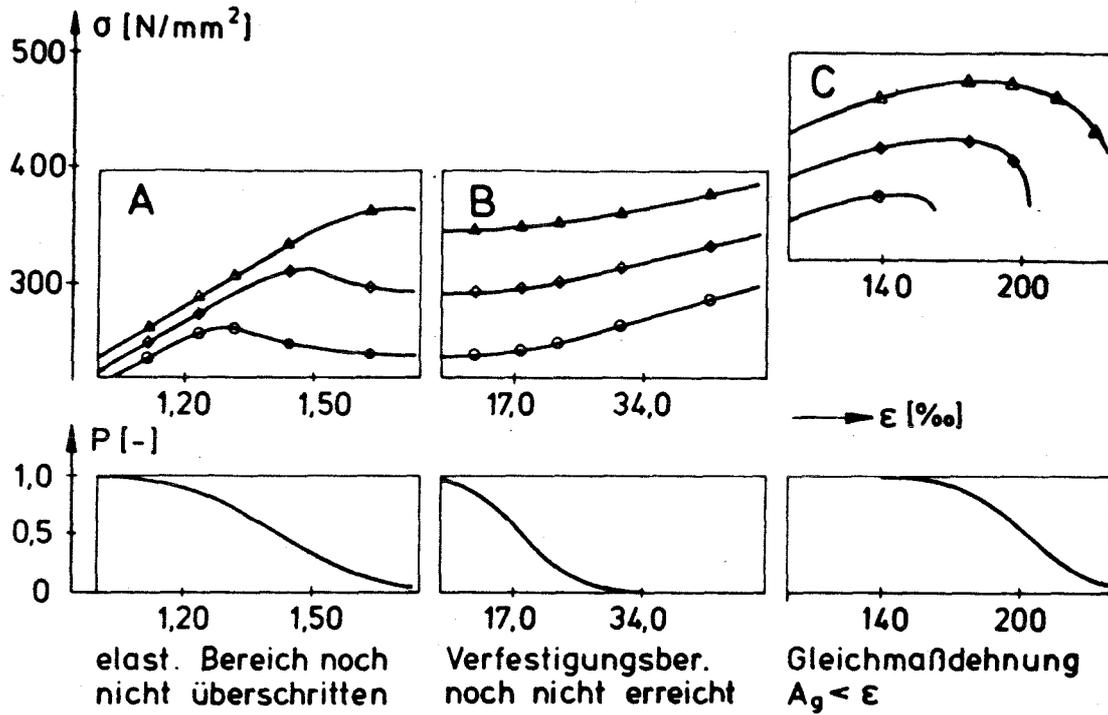


Bild 8.3. Fraktilwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurve für den St37 mit dynamischen Festigkeitskennwerten R_{eL} , UA_1 und R_m

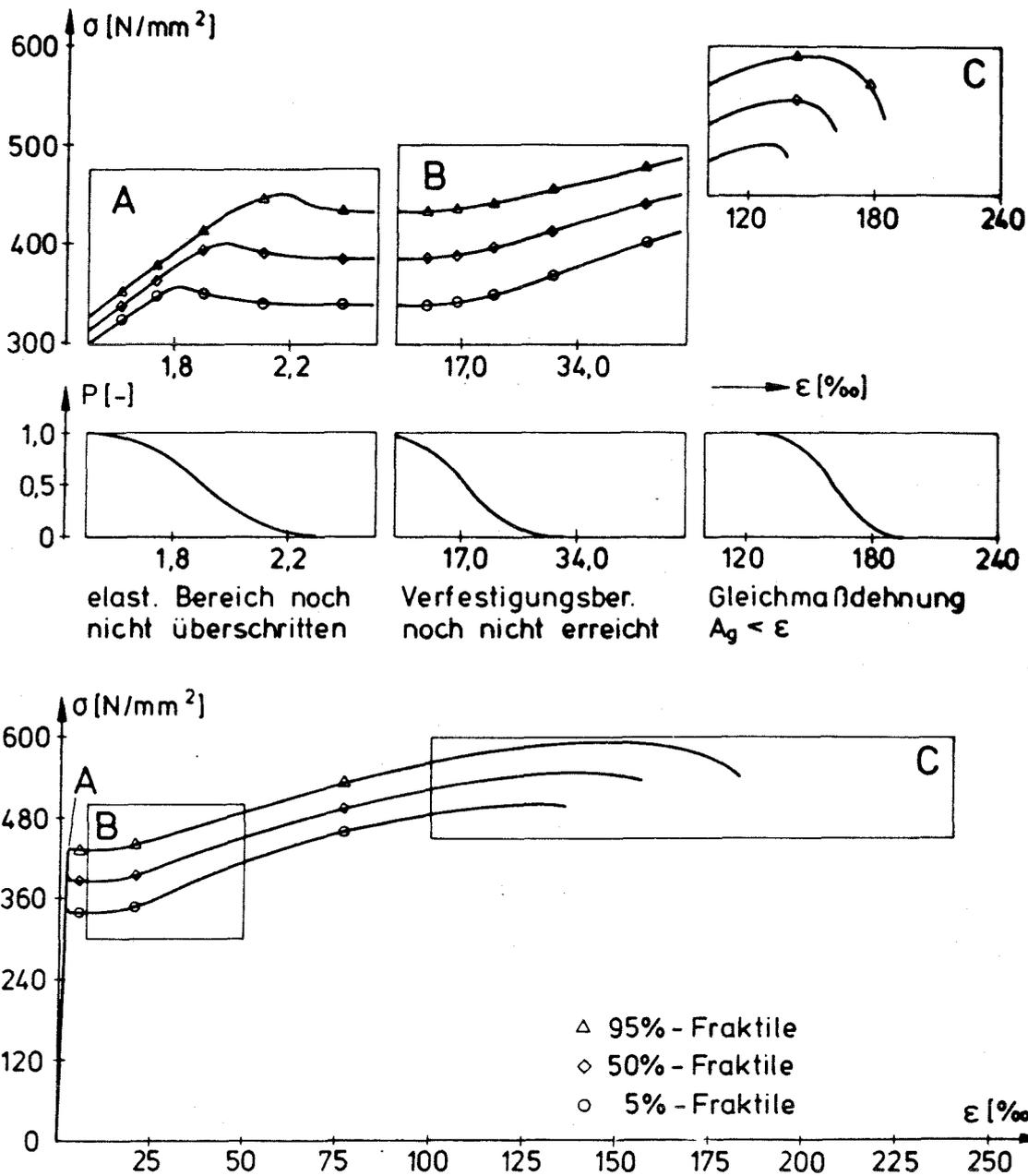


Bild 8.4. Fraktilwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurve für den St52 mit dynamischen Festigkeitskennwerten R_{eL} , UA_1 und R_m

Im Bild 8.5 und 8.6 sind die Fraktilwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurve für die Stähle St37 und St52 für die statischen Festig-

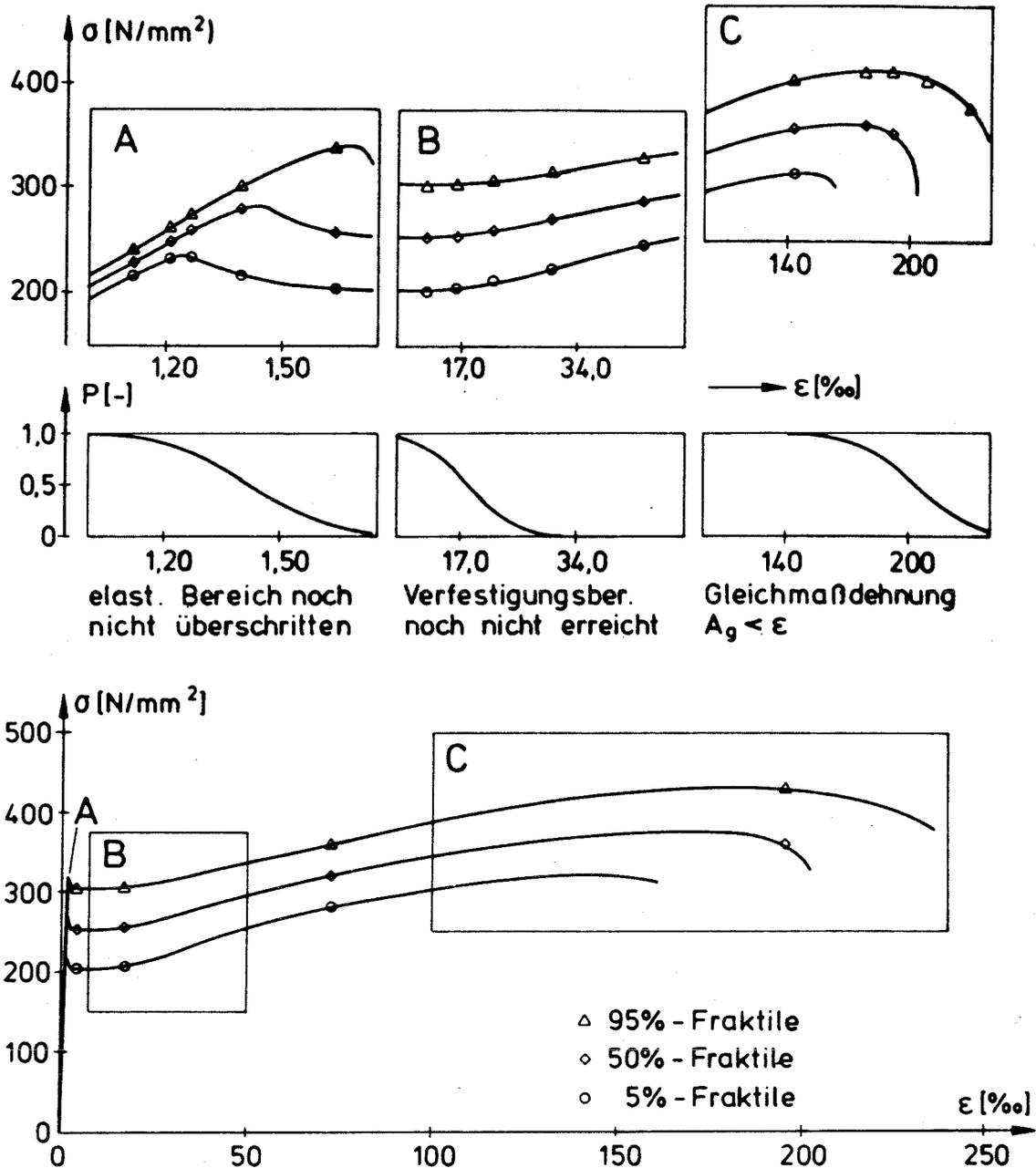


Bild 8.5. Fraktilwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurve für den St37 mit statischenn Festigkeitskennwerten R_{eS} und $R_{m,S}$

keitskennwerte R_{eS} und $R_{m,S}$ dargestellt. Im Vergleich zu den dynamischen Kurven sind die Spannungen deutlich kleiner.

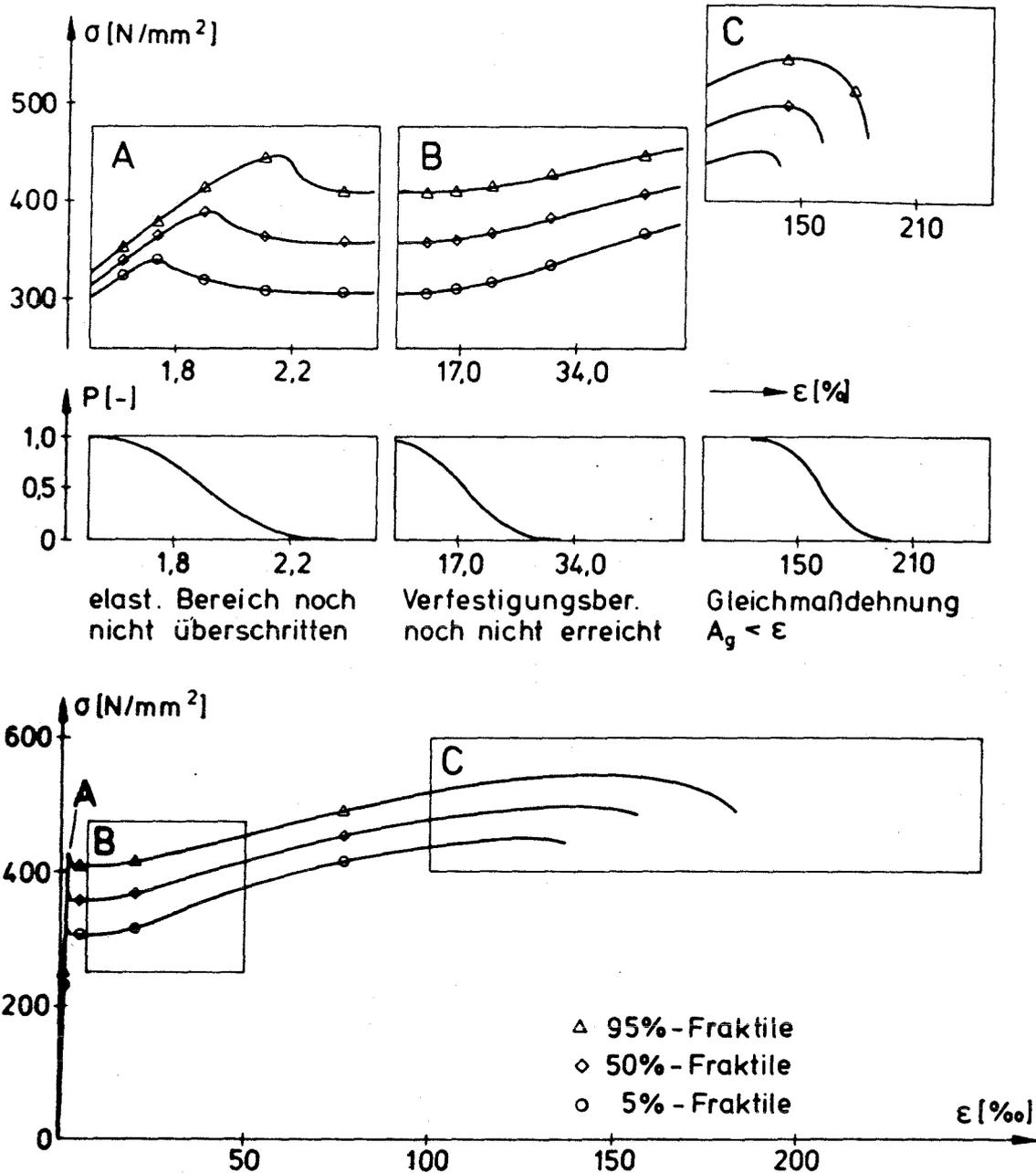


Bild 8.6. Fraktilwerte der Spannungs-Dehnungs-Kurve für den St52 mit statischen Festigkeitskennwerten R_{eS} und $R_{m,S}$

8.7 ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Beschreibung der Verteilungsfunktion der Spannungs-Dehnungs-Kurve können Grenzkurven angegeben werden, zwischen denen die im Versuch ermittelten Spannungen mit einer Wahrscheinlichkeit p liegen. Mit Verteilungsfunktionen wird der Übergang in die verschiedenen Bereiche beschrieben und mit dem Satz der totalen Wahrscheinlichkeit die Verteilungsfunktion der Spannung berechnet. Da der Verfestigungsbereich zur Erzielung einer ausreichenden Genauigkeit mit mehreren Parametern beschrieben werden muß, wird der Fließ- und Verfestigungsbereich mit der Monte-Carlo-Simulation beschrieben.

Mit Hilfe dieses Verfahrens kann der Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve für Simulationen beschrieben werden.

9 ZUSAMMENFASSUNG

In der vorliegenden Arbeit wurde auf statistischer Grundlage die Qualität der z.Zt. in Stahlbaubetrieben der Bundesrepublik Deutschland verarbeiteten Baustähle untersucht.

Hierfür standen zwei Möglichkeiten zur Verfügung:

Einerseits wurden die Ergebnisse von Qualitätsprüfungen der Hersteller, die in Bescheinigungen über Materialprüfungen dem Verarbeiter mitgeteilt werden müssen, ausgewertet.

Andererseits wurde eine Fremdprüfung durchgeführt, indem eine Stichprobe direkt in den Stahlbaubetrieben entnommen wurde.

Diese Stichprobe wurde nach den zur Verfügung stehenden Mitteln möglichst repräsentativ entnommen. Dazu war ein wiederholter Besuch in den Stahlbaubetrieben notwendig.

Zur Ermittlung möglichst vieler Materialkennwerte war eine möglichst umfangreiche Prüfung sinnvoll, weil wegen der Weiterentwicklung der Nachweismethoden auch heute noch nicht genormte Werte, die durch Standardprüfungen nicht erfaßt werden, in die Berechnung eingehen werden: Es wurde für die Materialproben ein neuer Prüfmodus entwickelt, der alle zur Beschreibung des Festigkeitsverhaltens von Baustahl notwendigen Kennwerte erfaßt.

Um zum einen die Genauigkeit der Ergebnisse der Materialprüfungen aus den Bescheinigungen und zum anderen den neuen Prüfmodus zu kontrollieren, wurde eine sog. "Blindprüfung" durchgeführt: Es wurden verschiedene Materialprüfanstalten beauftragt, Zugversuche an Proben aus einer Blechtafel durchzuführen. Weitere Proben aus dieser Blechtafel wurden mit dem Prüfmodus untersucht. Der Vergleich der Ergebnisse ergab einen Aufschluß über Genauigkeiten und Streuungen.

Die Verteilungsfunktionen der vergleichbaren Materialkennwerte aus Bescheinigungen und Fremdprüfung waren teilweise signifikant unterschiedlich. Erklärt werden konnte dieser Unterschied durch

die Sichprobenentnahme, weil die Bescheinigungen im Vergleich zur Fremdprüfung grundsätzlich nur die Stähle mit nachgewiesener, bestandener Qualitätskontrolle repräsentieren. Ein Qualitätsnachweis in Form von Bescheinigungen für die in den Stahlbaubetrieben eingesetzten Stähle war nur in Ausnahmefällen erhältlich. Die 5%-Fraktilen - besonders der oberen Streckgrenze - lagen bei der Fremdprüfung im Vergleich zu denjenigen aus den Bescheinigungen deutlich niedriger. Daraus wurde geschlossen, daß auf dem Weg vom Hersteller über die Händler in die Stahlbaubetriebe Stähle hinzukommen, die nicht die Grenzwerte der Normen einhalten und daß jegliche Auswertung von Bescheinigungen nicht die Gesamtheit aller in der Bundesrepublik Deutschland verarbeiteten allgemeinen Baustähle erfaßt.

Als Anwendung der statistischen Auswertung der Fremdprüfung wurde ein Modell zur Berechnung von Verteilungsfunktionen der Spannungs-Dehnungs-Kurve von Baustahl für beliebige Dehnungen vorgeschlagen.

A N H A N G

-- Prüfmodus für Zugversuche und Datenbank --

A1.1 PRÜFMODEUS UND AUSWERTUNG DER ZUGVERSUCHE

A1.1 DEHNMEßGERÄTE

Die Probendehnung wird mit einem Feinwegdehnaufnehmer mit der Firmenbezeichnung "DD1" - im weiteren als DD1 bezeichnet - bestimmt. Durch Wahl von Verstärkereinstellungen und durch Veränderung der Meßbasis kann der Meßbereich des DD1 von $\pm 2,5\%$ bis maximal $\pm 100\%$ betragen, wodurch die Genauigkeit im zweiten Fall bedeutend schlechter ist als im ersten.

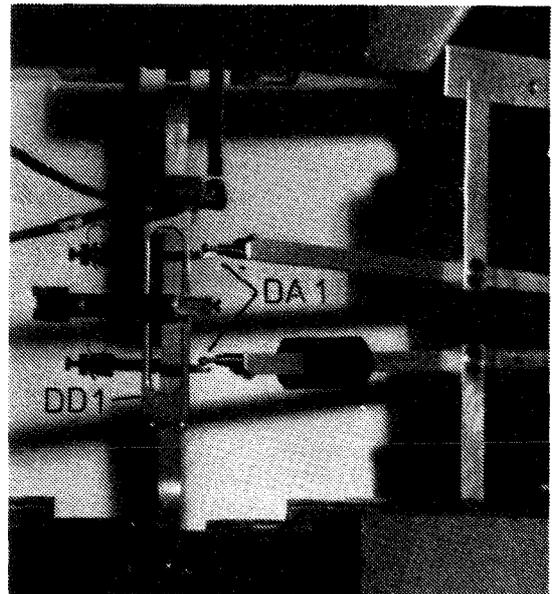
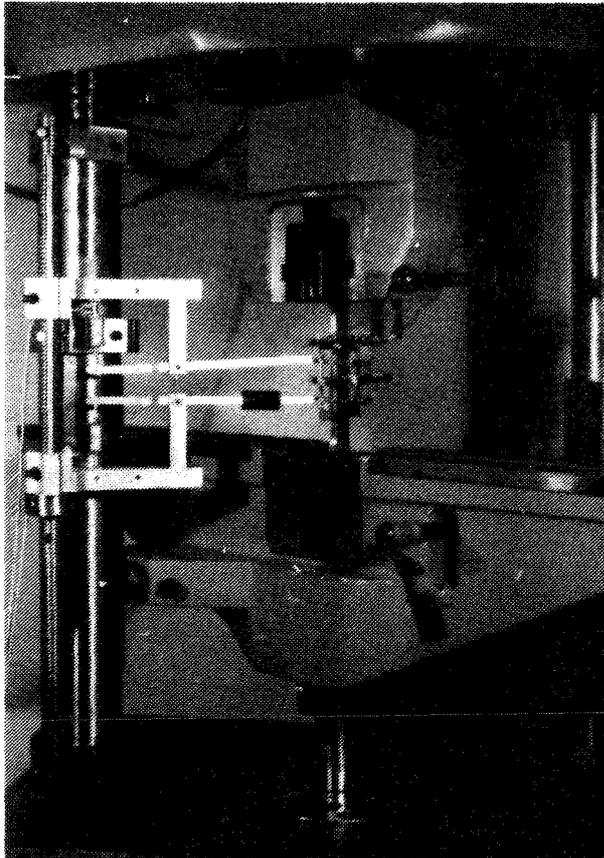


Bild A1.1. Dehnaufnehmer DD1 und DA1

Durch Dehnungsmessung mit handelsüblichen Dehnmeßgeräten kann die Gleichmaßdehnung nicht ermittelt werden, die z.B. beim St37 Werte über 300 %, erreichen kann. Deshalb wurde ein Meßsystem für diese großen Dehnungen entwickelt, bei dem durch Anklemmen zweier zusätzlicher Schneiden mit einem bekannten Anfangsabstand l_0 und zugehörigen externen Wegaufnehmern die Dehnung bis zum Bruch der Probe bestimmt wird. Dieses Meßsystem zur Dehnungsmessung wird im weiteren Text mit "DA1" bezeichnet. Der Versuchsaufbau mit DA1 und DD1 ist im Bild A1.1 dargestellt. Bei DD1 und DA1 wird die Veränderung des Abstandes zweier Schneiden Δl , bezogen auf den Schneidenabstand im unbelasteten Zustand l_0 , als Dehnung registriert.

A1.2 PRUFANLAGE

A1.2.1 Prüfeinrichtung

Sämtliche Zugversuche wurden an einer Universalprüfmaschine HUN 20 der Firma MFL durchgeführt. Die maximale Prüfkraft beträgt +/- 200 kN bei einem maximalen Kolbenhub von 300 mm. Durch Verstärkereinstellungen kann der Kraftbereich auf +/- 40, 100 und 200 kN eingestellt werden, wodurch eine höhere Genauigkeit bei der Kraftmessung auch für kleinere Prüfkraft erreicht wird. Die Steuerung erfolgt durch eine elektronische Regeleinrichtung der Firma MFL. Die von der Regeleinrichtung verstärkten Ist-Werte werden durch eine Meßanlage registriert, wobei die analogen Meßwerte verstärkt und digitalisiert werden. Eine detaillierte Beschreibung der Prüfanlage ist in /7/ nachzulesen.

Mit einem für den Prüfmodus erweiterten Meßprogramm können die Meßwerte von einem 16 Bit Rechner (DATA General Nova 3D) gelesen und weiterverarbeitet werden. Alle Meßwerte werden praktisch gleichzeitig mit einem maximalen Zeitunterschied von ca. 10 ms erfaßt. Durch Eichfaktoren erfolgt die Umrechnung in die physikalischen Größen, die während des Versuchs auf ein graphisches und ein alphanumerisches Display zur Kontrolle des

Versuchs, sowie zur späteren Auswertung auf die Platte des Rechners ausgegeben werden können. Sämtliche Meßstellen werden kontinuierlich abgerufen und vom Meßprogramm weiterverarbeitet. Die Entscheidung, ob ein Meßwertkollektiv ausgegeben wird, wird durch eine signifikante Änderung der Meßwerte gesteuert, wobei ein Meßwertkollektiv zum einen aus physikalischen Größen, zum anderen aus berechneten physikalischen Größen, z.B. Dehnungen oder Differenzwegen besteht. Sobald sich ein Meßwert im Vergleich zum zuletzt ausgegebenen um einen vor dem Versuch gewählten Schwellwert geändert hat, wird das Meßwertkollektiv ausgegeben. Schwellwerte und Eichfaktoren, sowie die Zuordnung der Kanäle der Meßanlage zu den Meßstellen, sind in einem sog. Steuerfile abgelegt (Tabelle A1.1). Vor Versuchsbeginn werden die Vorlast F_0 , sowie die Schneidenabstände im unbelasteten Zustand der Zugprobe für DD1 ($l_0(DD1)$) und DA1 ($l_0(DA1)$) eingegeben.

A1.2.2 Eichung

Es wurden mindestens 200 Messungen pro Eichung durchgeführt. Ausgehend von der elektrischen Nullpunktsslage wurden die Sollwerte im Pilgerschrittverfahren verändert, d.h. der Sollwert wurde zunächst um $1/40$ des Eichbereichs gesteigert. Nach ca. 10 s Warten wurde der Istwert mittels eines Eichprogramms zusammen mit dem Sollwert eingelesen und gespeichert. Danach wurde der Sollwert um $1/80$ des Eichbereichs in der entgegengesetzten Richtung verändert und wiederum nach ca. 10 s Wartezeit eine Messung durchgeführt usw. Entsprechend wurden nach Erreichen der Bereichsgrenzen die Sollwerte in entgegengesetzter Richtung in $1/40$ bzw. $1/80$ Schritten verändert. Die Eichfaktoren wurden anschliessend durch lineare Regression ermittelt. Die Eichung der Kraftmeßdose erfolgte mittels eines geeichten 100 kN Kraftmeßbügels vom Typ MBM für den 40 und 100 kN-Bereich und mittels eines 500 kN Kraftmeßbügels des gleichen Typs für den 200 kN-Bereich. Nach DIN 50 301 ist die Geräteklasse beider Kraftmeßbügel G1. Die Eichung der Wegaufnehmer des DA1 sowie des DD1 erfolgte mit einem Meßschlitten mit einer Ablesegenauigkeit von $1/1000$ mm.

Tabelle A1.1. Aufgenommene Größen, Schwellwerte und Bezeichnungen

Meßst.	Zeichen	Berechnung	Bezeichnung	Einheit	Meßbereich	Schwellw. Aufzeich.
1	F_1	Meßwert	gemessene Kraft	kN	+/- 40,100, 200 kN	1/400 der max. Last
2	w	Meßwert	Querhauptweg	mm	+/- 50 mm	1 mm
3	$\Delta l(DD1)$	Meßwert	Schneidenabstandsveränderung DD1	1/1000 mm	+/-2.5, 1.25 0.625, 0.25 mm	25/1000 mm
4	w_o	Meßwert	Weg obere Schneide DA1	mm	20 mm	1 mm
5	w_u	Meßwert	Weg untere Schneide DA1	mm	20 mm	1 mm
6	F_2	$F_1 - F_0$	tatsächliche Kraft	kN	-	1/400 der max. Last
7	$l_B(DD1)$	$l_0(DD1) + \Delta l(DD1)$	aktuelle Meßbasis DD1	mm	-	1 mm
8	$\epsilon_w(DD1)$	$\Delta l(DD1) / l_B(DD1)$	wahre Dehnung	%	-	0.0125 %
9	$l_B(DA1)$	$l_0(DA1) + (w_o - w_u)$	aktuelle Meßbasis DA1	mm	-	-
10	$\epsilon(DA1)$	$(w_o - w_u) / l_0(DA1)$	Dehnung	%	-	1 %
11	t	Meßwert	Versuchszeit	s	-	5 s

A1.3 AUSWERTUNG DER ZUGVERSUCHE

A1.3.1 Allgemeines

Neben den während des Versuches zur Kontrolle an einem Analogkompensator abgelesenen Kraftwerten für die obere und statische Streckgrenze, sowie für den der Zugfestigkeit, werden die Meßergebnisse durch eine Auswertung nach dem Versuch mittels eines Rechnerprogramms ermittelt. Der Versuchsablauf wird über Kennziffern eingegeben, wobei in folgende Bereiche unterschieden wird:

- elastischer Bereich
- untere Streckgrenze
- statische Streckgrenze
- Entlastung
- Übergang Fließbereich in den Verfestigungsbereich
- Verfestigungsbereich.

Die Materialkennwerte werden mittels eines Regressionsansatzes

$$f(x) = f(x, \hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k) \quad (\text{A1.1})$$

ermittelt.

Die Meßwertkollektive werden bereichsweise in eine Matrix eingelesen und bearbeitet. Die Regressionsfunktion ist für die einzelnen Bereiche bekannt und hängt von den unbekanntem Parametern $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k$ ab. Es gilt zwischen den m gemessenen Beobachtungswerten y_j der Zufallsvariablen y , den gemessenen Werten x_j von x und der Abweichung der Meßwerte von der Regressionsfunktion δ_j der Zufallsvariablen δ die Beziehung

$$\begin{aligned} y_j &= f(x_j, \hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k) + \delta_j \quad (j = i_a, i_e) \\ \delta &: \text{NV}(0, s_f). \end{aligned} \quad (\text{A1.2})$$

Hierbei ist i_a die erste und i_e letzte für die Regression zu

berücksichtigende Messung mit $n = i - i_a + 1$ und $m =$ Anzahl der registrierten Messungen. Die Restvarianz um die Regressionskurve s_F ist

$$s_F^2 = \sum (\delta_j^2) / (n - k). \quad (\text{A1.3})$$

Die Parameter \hat{a}_i ($i = 0, 1, \dots, k$) werden mit der Fehlerquadratmethode ermittelt und anschließend s_F berechnet. Mittels eines Ausreißertests über die zentrale t -Verteilung bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% werden Ausreißer eliminiert, wenn die Bedingung

$$|y_j - f(x_j, \hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_k)| < t_{0.05, n-k} s_F. \quad (\text{A1.4})$$

nicht erfüllt ist. Die Regression wird wiederholt, wenn mindestens ein Ausreißer gefunden wurde. Der Außreißertest wird bei allen nachfolgend beschriebenen Funktionsansätzen angewendet.

In allen Bereichen werden neben den Bereichsgrenzen die Dehn-, Querhauptweg- und Spannungszunahmegeschwindigkeit berechnet. Sämtliche Daten werden vor Beendigung des Programms in eine Datenbank eingespeist (siehe Abschnitt A2).

A1.3.2 Elastischer Bereich

Mittels eines Funktionsansatzes

$$\begin{aligned} \sigma &= \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \epsilon_w & (\text{A1.5}) \\ \text{mit } \epsilon_w &= \Delta l / (l_0(\text{DD1}) + \Delta l) \end{aligned}$$

wird der E-Modul ermittelt, wobei a_1 der E-Modul ist. Die Dehnung ϵ_w ist hierbei die "wahre" Dehnung, gemessen mit dem DD1. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Abzisse (rechnerische Dehnung ϵ_0 bei einer Spannung $\sigma=0$) ist:

$$\epsilon_0 = -a_0/a_1. \quad (\text{A1.6})$$

Die elastische Gerade kann neben der Hysterese auch nach Überschreiten der Proportionalitätsgrenze im Endbereich, sowie durch Einspielerscheinungen im Anfangsbereich nichtlinear sein. In Bild A1.2 ist dazu das Vorgehen zur Ermittlung der ersten sowie letzten zu berücksichtigenden Messung i_a und i_e dargestellt. Zunächst sind i_a und i_e unbekannt. Im ersten Schritt wird i_e von 3 bis m bei konstantem $i_a = 1$ variiert (Bild A1.2.b). Ausgehend von den diskreten Meßwerten im Spannungs-Dehnungs-Diagramm des elastischen Bereiches wird

$$s_E^2 = s_F^2 / (\Sigma(x^2) - (\Sigma x)^2/n), \quad (A1.7)$$

sowie der Vertrauensbereich des E - Moduls mit der zentralen t -Verteilung bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%

$$VB(E) = a_1 \pm t_{0.05, n-2} s_E \quad (A1.8)$$

berechnet. Die letzte zu berücksichtigende Messung i_e ergibt sich aus der Bedingung, daß $t_{0.05, n-2} s_E$ minimal wird. Entsprechend wird anschließend i_a für $i_a = 1$ bis $i_e - 3$ bestimmt, wobei i_e aus der vorherigen Berechnung bekannt ist (Bild A1.2.c).

In Bild A1.2.d ist die Regressionsgerade dargestellt, sowie in Bild A1.2.f die Abweichung der Meßwerte δ_j von der Regressionsgeraden. Die nichtlinearen Anteile im Anfangs- und Endbereich werden durch die Abweichungen von der Regressionsgeraden deutlich.

A1.3.3 Untere Streckgrenze

Die untere Streckgrenze wird aus dem Ansatz

$$\sigma = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \epsilon \quad (A1.9)$$

berechnet. Es wird die minimale und maximale Dehnung ϵ_A und ϵ_E bestimmt und $\epsilon_M = (\epsilon_A + \epsilon_E)/2$ in die Regressionsfunktion eingesetzt. Die untere Streckgrenze ist somit

$$R_{eL} = a_0 + a_1 \epsilon_M. \quad (A1.10)$$

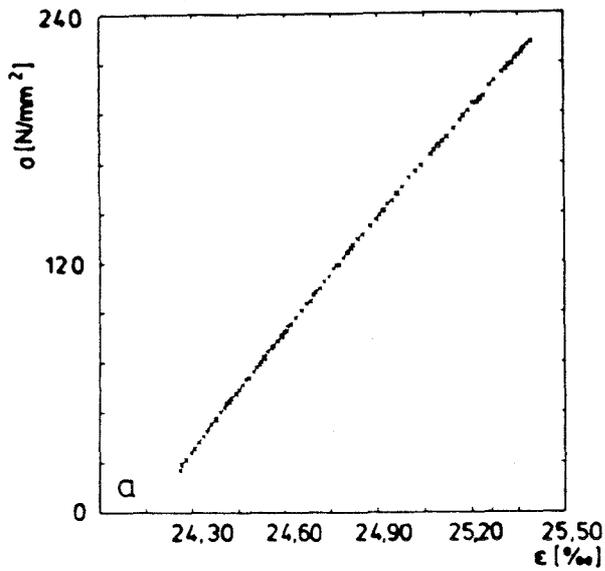
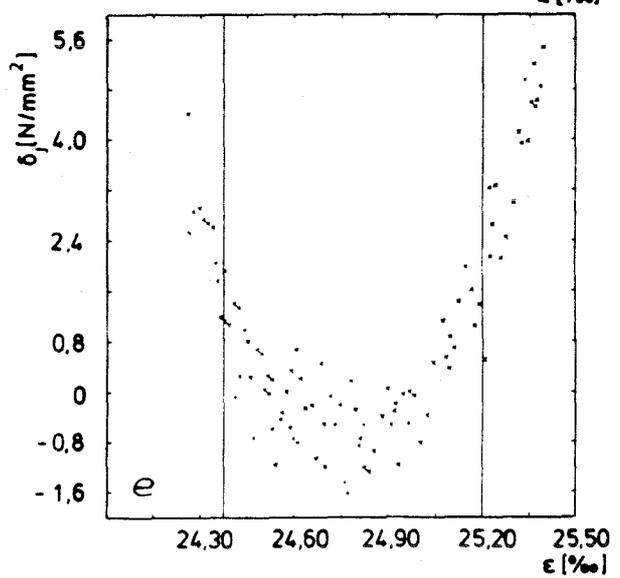
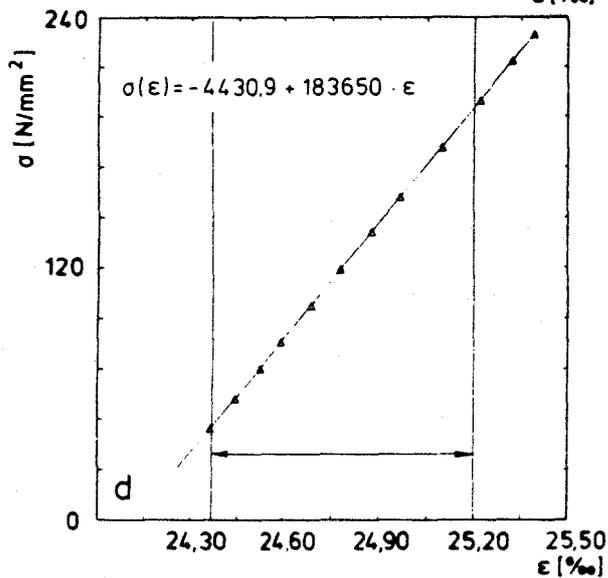
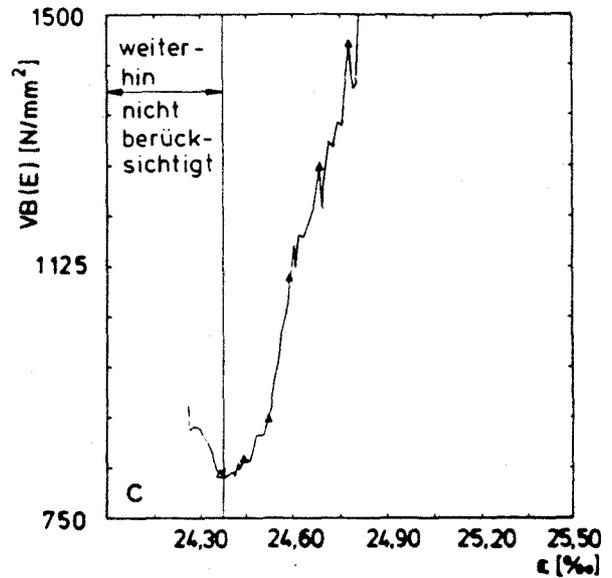
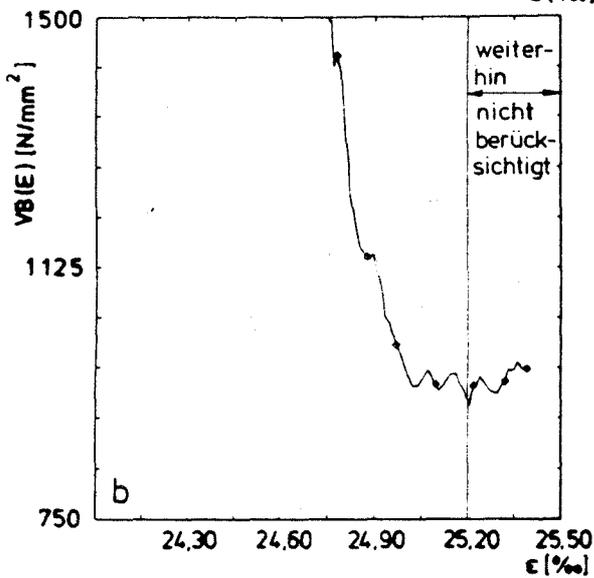


Bild A1.2 a-e. Beispielhafte Auswertung der Meßergebnisse zur Bestimmung des E - Moduls E_3 in der Versuchsphase 3; a Meßwerte; b Bestimmung des Minimums $t_{0,05}$, $n-2^{\text{SE}}$ für den Endbereich; c Bestimmung des Minimums $t_{0,05}$, $n-2^{\text{SE}}$ für den Anfangsbereich; d Regressionsgerade; e Abweichung δ_j der Meßergebnisse von der Regressionsgeraden.



A1.3.4 Statische Streckgrenze

Im Fließbereich wird die Dehngeschwindigkeit $\dot{\epsilon} = 0$ über einen Zeitraum $t \rightarrow \infty$ konstant gehalten. Die Spannung strebt einem Grenzwert R_{eS} zu, der als statische Streckgrenze definiert ist. Versuchstechnisch wird die statische Streckgrenze dadurch bestimmt, daß die Spannungs- und die dazugehörigen Zeitwerte über einen bestimmten Zeitraum registriert werden. Der Verlauf der diskreten Punkte im Spannungs-Zeit-Diagramm wird durch die Funktion

$$\sigma(t_S) = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 e^{t_S \hat{a}_2} \quad (\text{A1.11})$$

approximiert. Der Koeffizient a_0 ist für $t_S \rightarrow \infty$ die statische Streckgrenze, a_2 kann als Maßzahl für die Völligkeit der Kurve $\sigma(t_S)$, bzw. als Abklingfaktor gedeutet werden und ist immer negativ [7,10,15]. Die Meßwerte der ersten 45 Sekunden werden nicht berücksichtigt (s. Bild A1.3).

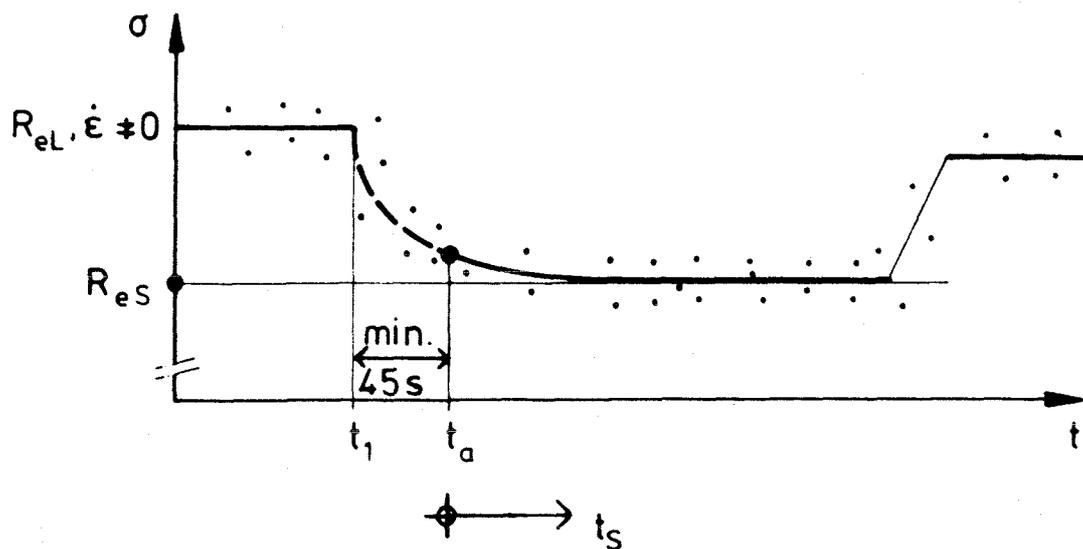


Bild A1.3. Schematische Darstellung für die Spannungswertermittlung für die statische Streckgrenze

Da durch den größeren Spannungsabfall zu Beginn der Haltepause mehr Meßwerte registriert werden, als zum Ende der Haltepause,

werden die Meßwerte so gewichtet, daß sie quasi äquidistante Zeitabstände haben. Der Wichtungsfaktor w_j für die Messung j ist

$$w_j = (t_{s,j+1} - t_{s,j-1}) / 2, \quad (\text{A1.12})$$

sowie für die erste zu berücksichtigende Messung

$$w_{ia} = (t_{s,ia+1} - t_{s,ia}) / 2 \quad (\text{A1.13})$$

und für die letzte Messung

$$w_{ie} = (t_{s,ie} - t_{s,ie-1}) / 2. \quad (\text{A1.14})$$

In Bild A1.4 ist beispielhaft die Berechnung der Wichtungsfaktoren für $n = 5$ Messungen dargestellt.

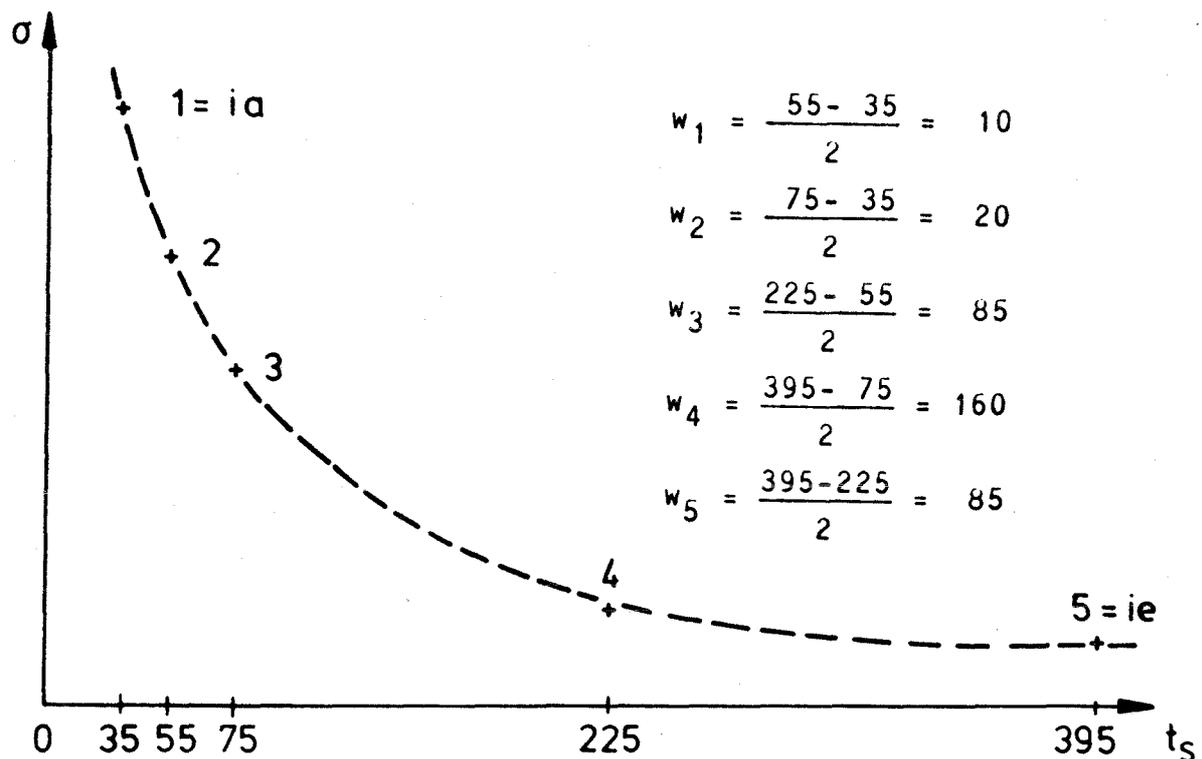


Bild A1.4. Beispiel zur Berechnung der Wichtungsfaktoren

Die Fehlerquadratmethode führt, wenn man

$$S = \sum (w_j \sigma_j - w_j (\hat{a}_0 + \hat{a}_1 e^{t_{sj}} \hat{a}_2))^2 \quad (\text{A1.15})$$

partiell nach \hat{a}_0 , \hat{a}_1 und \hat{a}_2 ableitet und die Ableitungen zu Null setzt, zu den Bestimmungsgleichungen für a_0 , a_1 und a_2 :

$$\sum w_j^2 \sigma_j - \hat{a}_0 \sum w_j^2 - \hat{a}_1 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2 = 0 \quad (\text{A1.16})$$

$$\sum w_j^2 \sigma_j e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \hat{a}_0 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \hat{a}_1 \sum w_j^2 e^{2t_{sj}} \hat{a}_2 = 0 \quad (\text{A1.17})$$

$$\sum w_j^2 \sigma_j t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \hat{a}_0 \sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \hat{a}_1 \sum w_j^2 t_{sj} e^{2t_{sj}} \hat{a}_2 = 0 \quad (\text{A1.18})$$

Dieses Gleichungssystem ist nichtlinear in a_2 . Als Lösung erhält man

$$a_0 = (\sum w_j^2 \sigma_j - a_1 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2) / \sum w_j^2$$

$$a_1 = \frac{(\sum w_j^2 \sigma_j) / \sum w_j^2 \sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \sum w_j^2 \sigma_j t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2}{(\sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2) / \sum w_j^2 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \sum w_j^2 t_{sj} e^{2t_{sj}} \hat{a}_2} \quad (\text{A1.19})$$

$$f(\hat{a}_2) = (\sum w_j^2 \sigma_j e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - (\sum w_j^2 \sigma_j) / \sum w_j^2 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2) \cdot (\sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - (\sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2) / \sum w_j^2 \sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2) - (\sum w_j^2 e^{2t_{sj}} \hat{a}_2 - (\sum w_j^2 e^{t_{sj}} \hat{a}_2)^2 / \sum w_j^2) \cdot (\sum w_j^2 t_{sj} \sigma_j e^{t_{sj}} \hat{a}_2 - \sum w_j^2 \sigma_j / \sum w_j^2 \sum w_j^2 t_{sj} e^{t_{sj}} \hat{a}_2) \stackrel{!}{=} 0. \quad (\text{A1.21})$$

a_2 wird iterativ aus Gl. A1.21 bestimmt und anschließend a_0 und a_1 aus Gl. A1.19 und A1.20. In Bild A1.5 ist die Auswertung für den Versuch K11025 der Blindprüfung (Abschnitt 5) dargestellt. Alle weiteren Beispiele stammen ebenfalls aus diesem Versuch. Die Regressionsfunktion stimmt im Endbereich mit den Meßwerten ausreichend genau überein und liefert eine gute Näherung der statischen Streckgrenze. Der Spannungsabfall $\Delta\sigma$ von der unteren zur statischen Streckgrenze wird ermittelt, indem die während der

Haltepause konstante Solldehnung ϵ_S in den Regressionsansatz der unteren Streckgrenze nach Abschnitt A1.2.3 eingesetzt wird, abzüglich der statischen Streckgrenze nach Gl. A1.21.

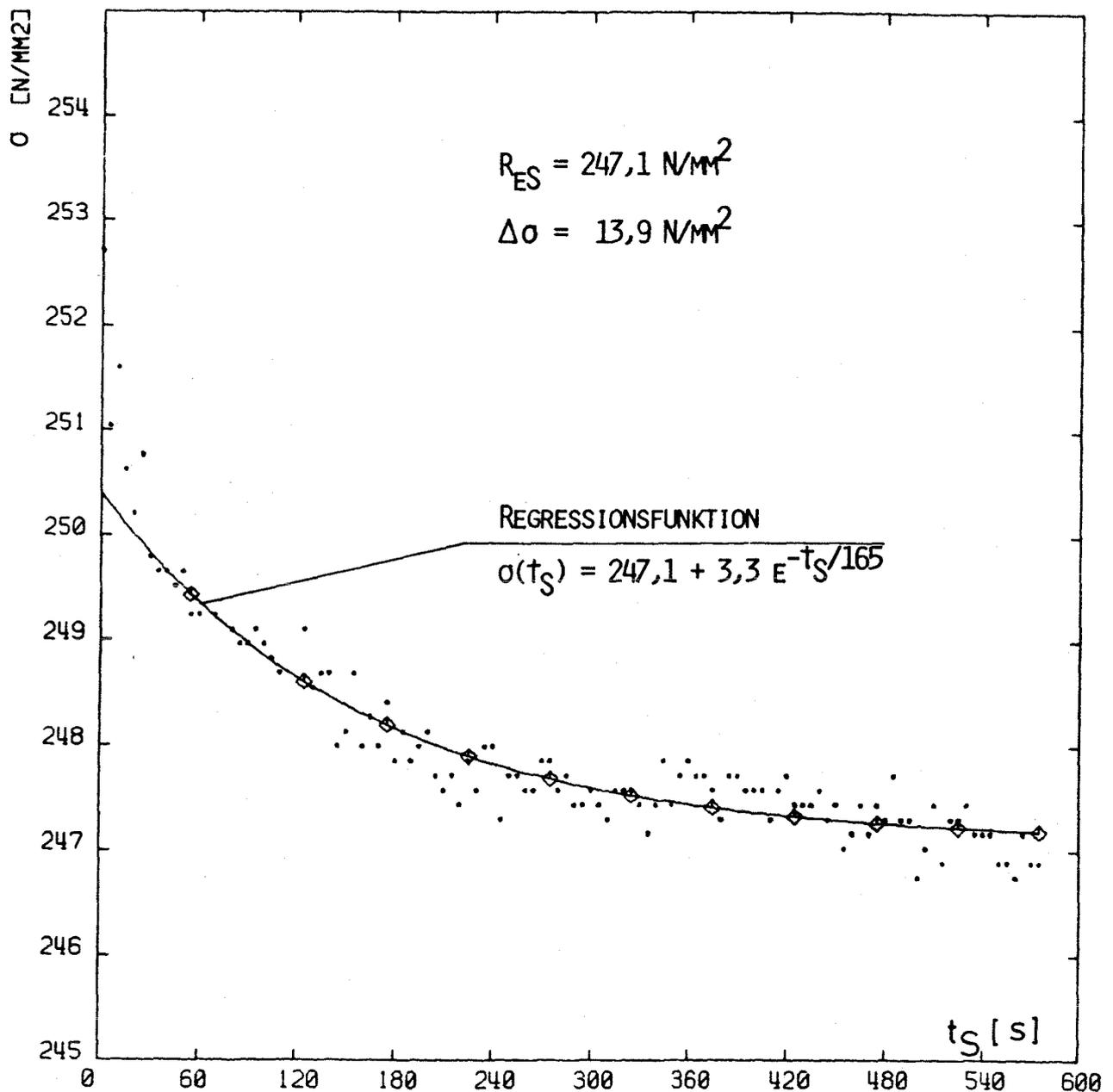


Bild A1.5. Spannungs-Zeit-Verlauf während der Haltepause
Versuch K11025

A1.3.5 Entlastung

Die Berechnung des E-Moduls erfolgt entsprechend der Berechnung bei A1.3.2.

A1.3.6 Übergang Fließbereich in den Verfestigungsbereich

In der Versuchsphase 2 wird die Probe mindestens 3 % in den Verfestigungsbereich gefahren (s. Bild 4.2, Seite 66), um neben der unteren Streckgrenze auch die Lüdersdehnung $A_{l\ddot{u}}$ und den Verfestigungsmodul E_V zu ermitteln. Alle in der Literatur vorgeschlagenen Verfahren beruhen darauf, $A_{l\ddot{u}}$ und E_V aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm graphisch zu bestimmen /7,16,17,18/. Einheitliche Regelungen bestehen nicht. Auf die Definition und Berechnung von $A_{l\ddot{u}}$ und E_V wird im weiteren eingegangen.

In Bild A1.6 sind 5 Vorschläge zur Ermittlung von E_V zusammengestellt (entnommen aus /18/), wobei die Verfahren nach Bild A1.6 b-e E_V als Sekantenmodul und nach Bild A1.5 a als Tangentenmodul definieren.

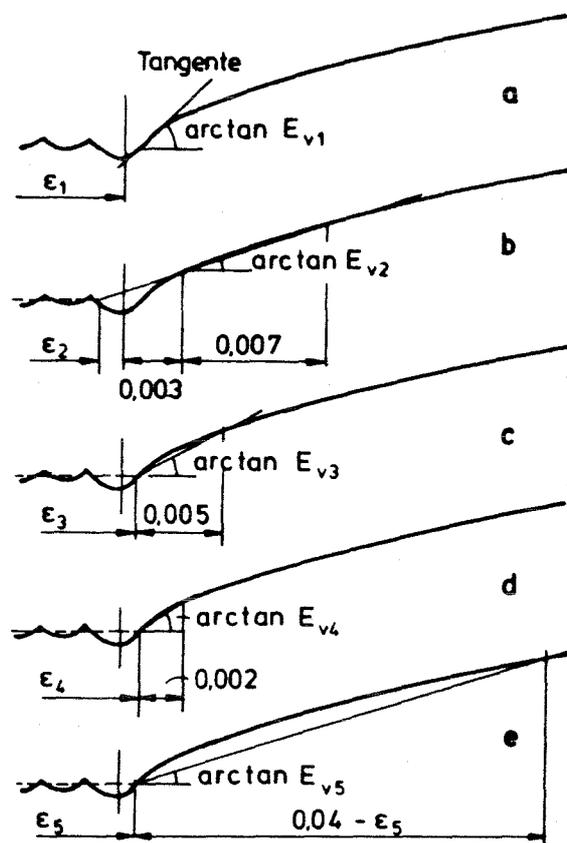


Bild A1.6. Zusammenstellung der Methoden zur Berechnung des Verfestigungsmoduls E_V

$A_{1\ddot{u}}$ und E_V werden nach Bild A1.6 a rechnerisch ermittelt. Die Grenze ϵ_{gr} des Fließ- und Verfestigungsbereichs zur Bestimmung von $A_{1\ddot{u}}$ und E_V sind in Bild A1.7 dargestellt.

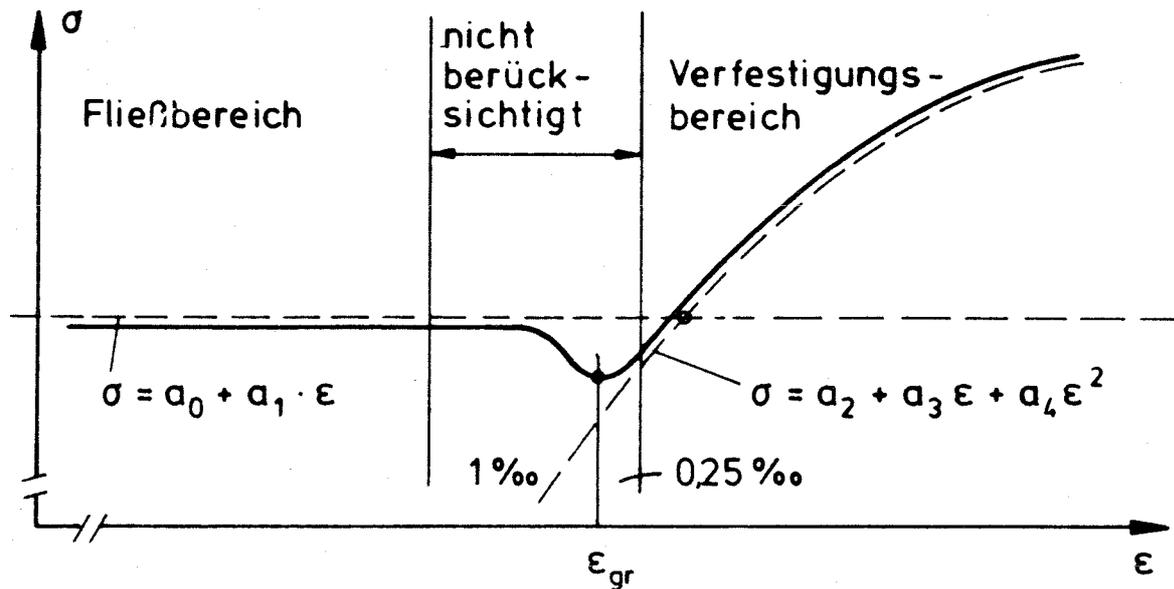


Bild A1.7. Abgrenzung des Fließbereichs vom Verfestigungsbereich für die Versuchsauswertung

Entsprechend Abschnitt A1.3.3 wird der Fließbereich mit einer Geraden

$$\sigma = \hat{a}_0 + \hat{a}_1 \epsilon \quad (\text{A1.22})$$

beschrieben. Der Verfestigungsbereich wird mit einem quadratischen Funktionsansatz

$$\sigma = \hat{a}_2 + \hat{a}_3 \epsilon + \hat{a}_4 \epsilon^2 \quad (\text{A1.23})$$

approximiert. Durch Gleichsetzen von Gl. A1.22 und Gl. A1.23 wird der Schnittpunkt ermittelt:

$$\epsilon' = \frac{a_1 - a_3}{2a_4} - \sqrt{\left(\frac{a_1 - a_3}{2a_4}\right)^2 - \frac{a_2 - a_0}{a_4}} \quad (\text{A1.24})$$

mit

$$\sigma' = a_0 + a_1 \epsilon'.$$

(A1.25)

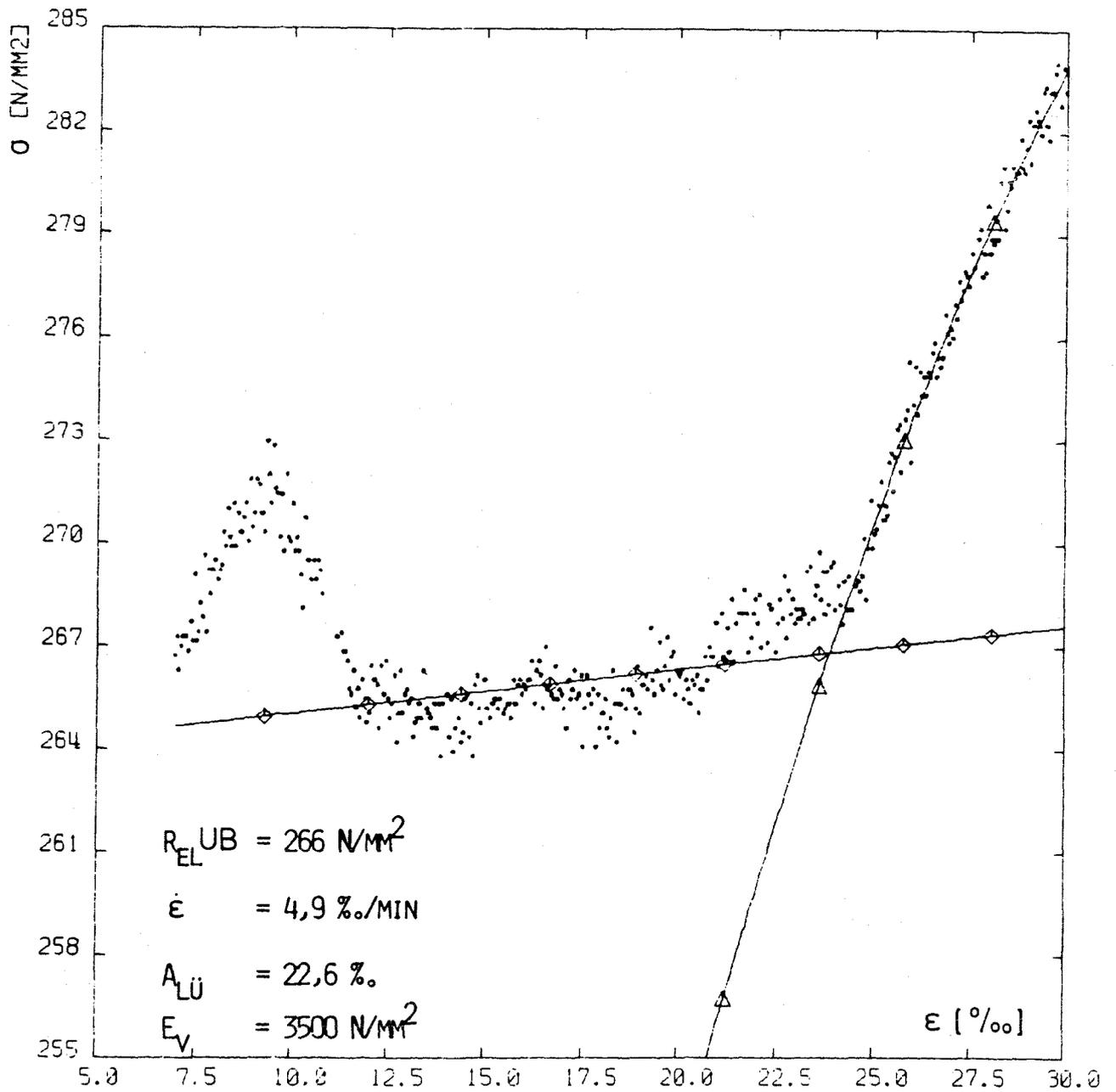


Bild A1.8. Auswertung für den Übergang Fließbereich - Verfestigungsbereich Versuch K11025

$A_{1\ddot{u}}$ wird als die nichtproportionale Dehnung der Zugprobe im Übergang vom Fließ- in den Verfestigungsbereich im Punkt (σ', ϵ') definiert

$$A_{1\ddot{u}} = \epsilon' - \sigma'/E_1, \quad (A1.26)$$

und der Verfestigungsmodul E_v als Steigung der Tangente an die Parabel (Gl. A1.23) gemäß Bild A1.6 a im Punkt (σ', ϵ')

$$E_v = a_3 + 2a_4\epsilon'. \quad (A1.27)$$

In Bild A1.8 ist die Auswertung für einen Versuch dargestellt.

A1.3.7 Verfestigungsbereich

Der Verfestigungsbereich wird mit einem ganzrationalen Polynom vom Grad k

$$\sigma = \sum_{i=0}^k \hat{a}_i \epsilon^i. \quad (A1.28)$$

approximiert. Es werden die Polynome für $k = 3, 4$ und 5 berechnet, wobei derjenige Grad gewählt wird, bei dem der Standardfehler s_F nach Gl. A1.1 am kleinsten ist.

Die Bereichsgrenzen werden ausgehend vom Maximum der Spannung im Punkt C nach Bild A1.9 so bestimmt, daß im Punkt B die Spannung maximal 90 % derjenigen im Punkt C ist und im Einschnürbereich (Punkt D) maximal 95 % derjenigen im Punkt C. Für den Regressionsansatz werden nur die Messungen berücksichtigt, deren Dehnungen größer als ϵ_B und kleiner als ϵ_D sind. Die Meßwerte innerhalb von Haltepausen werden nicht berücksichtigt.

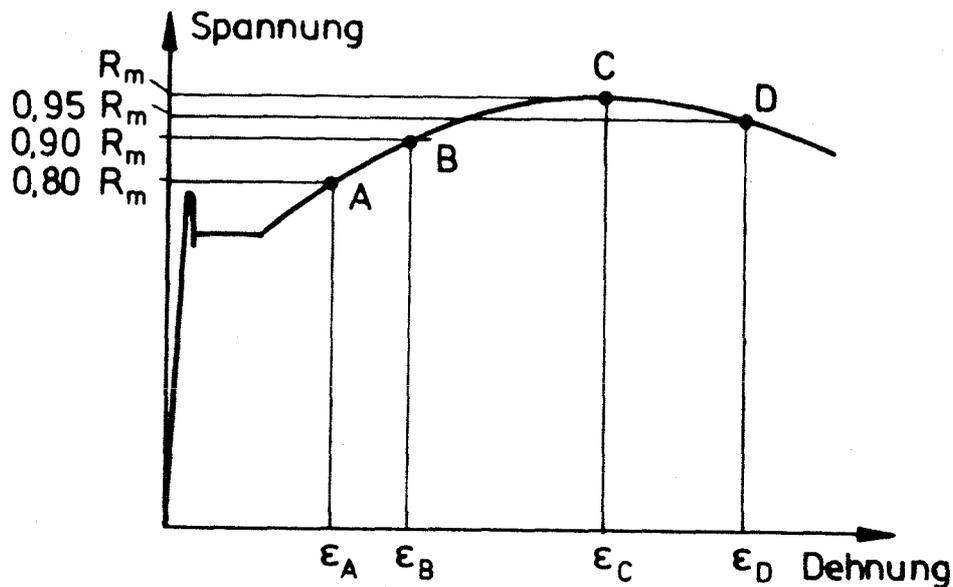


Bild A1.9. Dehnungen und zugehörige Spannungen zur Bestimmung der Bereichsgrenzen im Verfestigungsbereich

Die Gleichmaßdehnung A_g ist die nichtproportionale Dehnung der Zugprobe bei Beanspruchung durch die Höchstzugkraft F_m und die Zugfestigkeit R_m die auf den Anfangsquerschnitt S_0 bezogene Höchstzugkraft.

Ausgehend vom Schätzwert ϵ_C wird zunächst die Gleichmaßdehnung mit proportionalem Anteil A'_g durch Bestimmung der Nullstelle der Ableitung des Regressionsansatzes nach Gl. A1.28 (= Dehnung bei Höchstzugkraft) bestimmt. Die Zugfestigkeit R_m wird durch Einsetzen von A_g in den Regessionsansatz bestimmt und A_g zu

$$A_g = A'_g - R_m/E_1. \quad (A1.30)$$

Die Spannungs-Dehnungslinie des Stahls im Verfestigungsbereich wird in der Literatur durch einen mathematisch einfach handhabbaren Ansatz nach Ludwik und Hollomon /9,19/ bestimmt:

$$\begin{aligned} \sigma_w &= k_1 * \varphi^n & (A1.31) \\ \text{mit } \sigma_w &= \sigma(1+\varphi) \\ \text{und } \varphi &= \ln(1+\epsilon) \end{aligned}$$

Die Parameter der Gleichung werden für die Meßwerte zwischen ϵ_A und ϵ_C bestimmt.

Der Spannungsabfall $\Delta\sigma$ während der Haltepause bei $\epsilon_S \approx 60\%$ wird entsprechend Abschnitt A1.2.4 berechnet. Zur Abschätzung der Zeitstandfestigkeit wird die statische Zugfestigkeit

$$R_{m,S} = R_m - \Delta\sigma \quad (A1.32)$$

definiert. Anzumerken ist, daß bei in der Literatur beschriebenen Relaxationsversuchen /6,30/ mit Haltepausen von mehreren Wochen auch am Versuchsende noch ein Spannungsabfall beobachtet wurde und die Größe des Spannungsabfalls von der Solldehnung während der Haltepause abhing. Bei Zeitstandsversuchen waren die Kriechvorgänge noch nach über 11,5 Jahren nicht abgeklungen und innerhalb dieses Zeitraums konnten noch Zeitbrüche verzeichnet werden. Die statische Zugfestigkeit $R_{m,S}$ ist somit nur für kurzzeitige Maximalbeanspruchungen als charakteristischer Wert zur Bemessung geeignet.

In Bild A1.10 ist die Auswertung für den Verfestigungsbereich der Zugprobe K11025 ohne Berücksichtigung der Haltepause dargestellt.

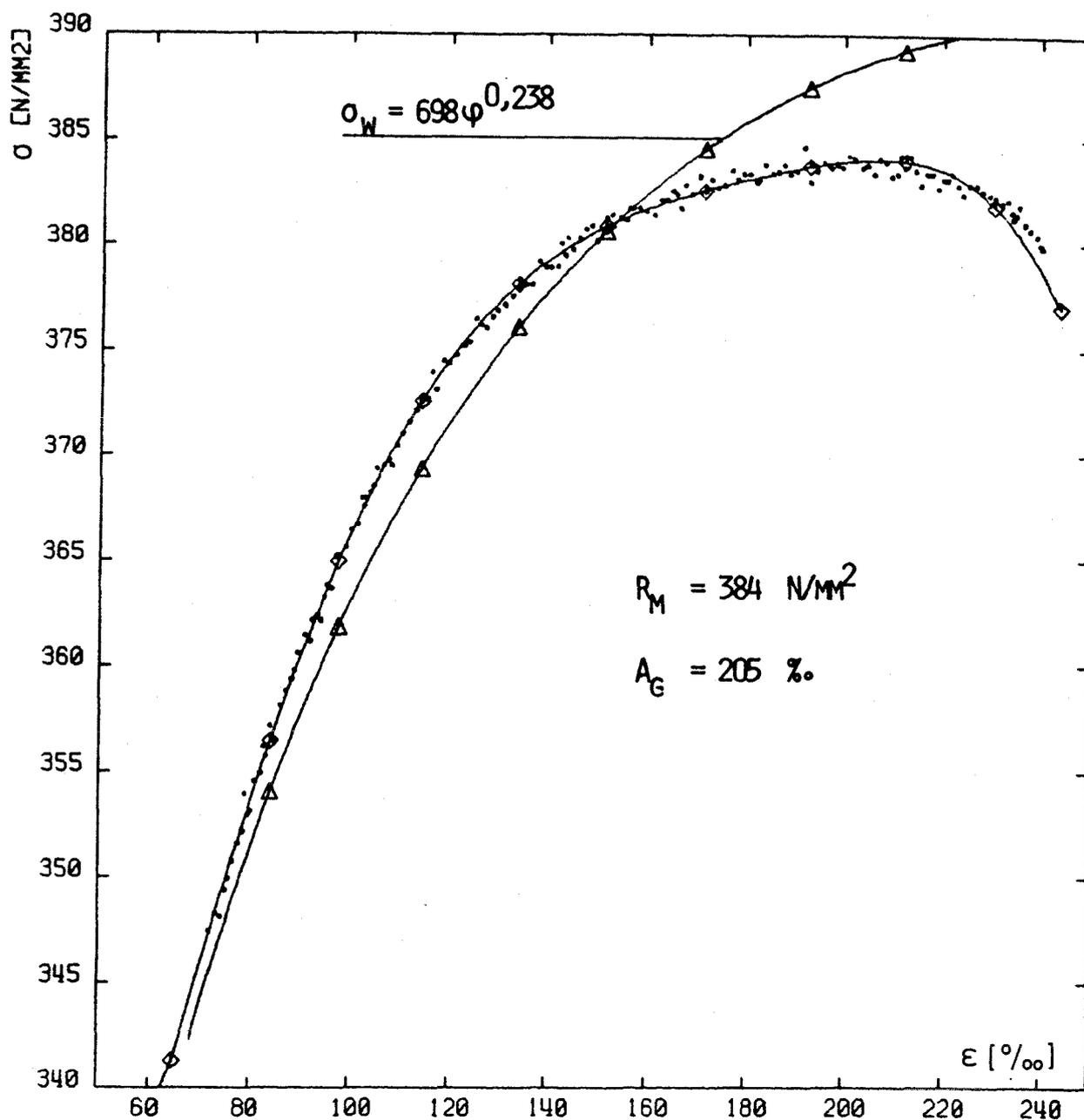


Bild A1.10. Auswertung des Verfestigungsbereiches

A1.4 AUSWERTUNG EINES ZUGVERSUCHES

Die Auswertung der Zugversuche erfolgt mit zeichnerischen Darstellungen der Spannungs-Dehnungs-Zeit-Diagramme. Beispielhaft sind die Diagramme für den Versuch K11025 der Blindprüfung (Abschnitt 5) der Probe 25 in den Bildern A1.11 und A1.12 darge-

stellt, sowie die Ergebnisse der numerischen Auswertung als Versuchsprotokoll im Bild A1.13 mit den Erläuterungen im Bild A1.14.

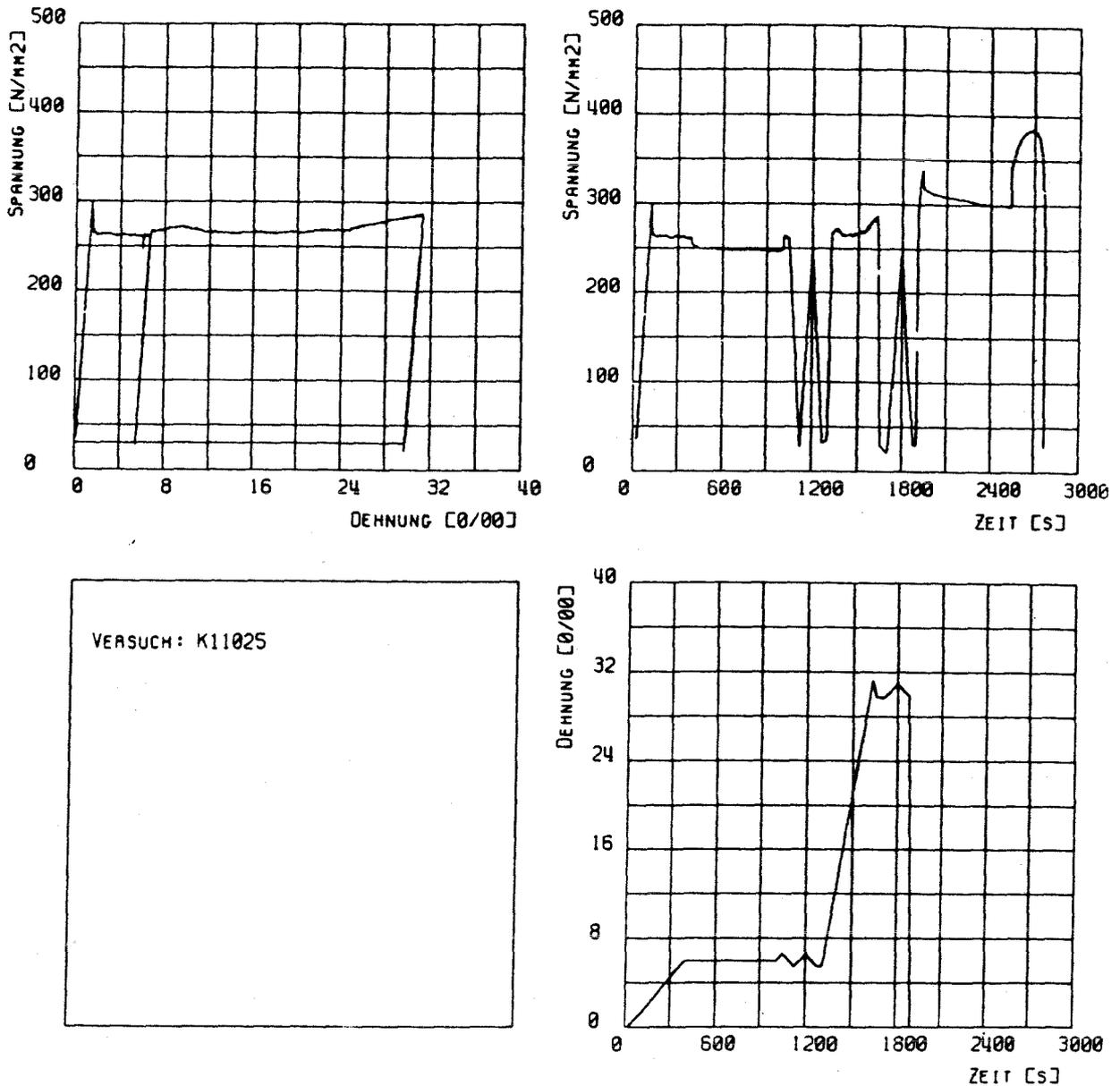


Bild A1.11. Spannungs-Dehnungs-Zeit-Diagramm des Versuchs K11025; Dehnung gemessen mit DD1

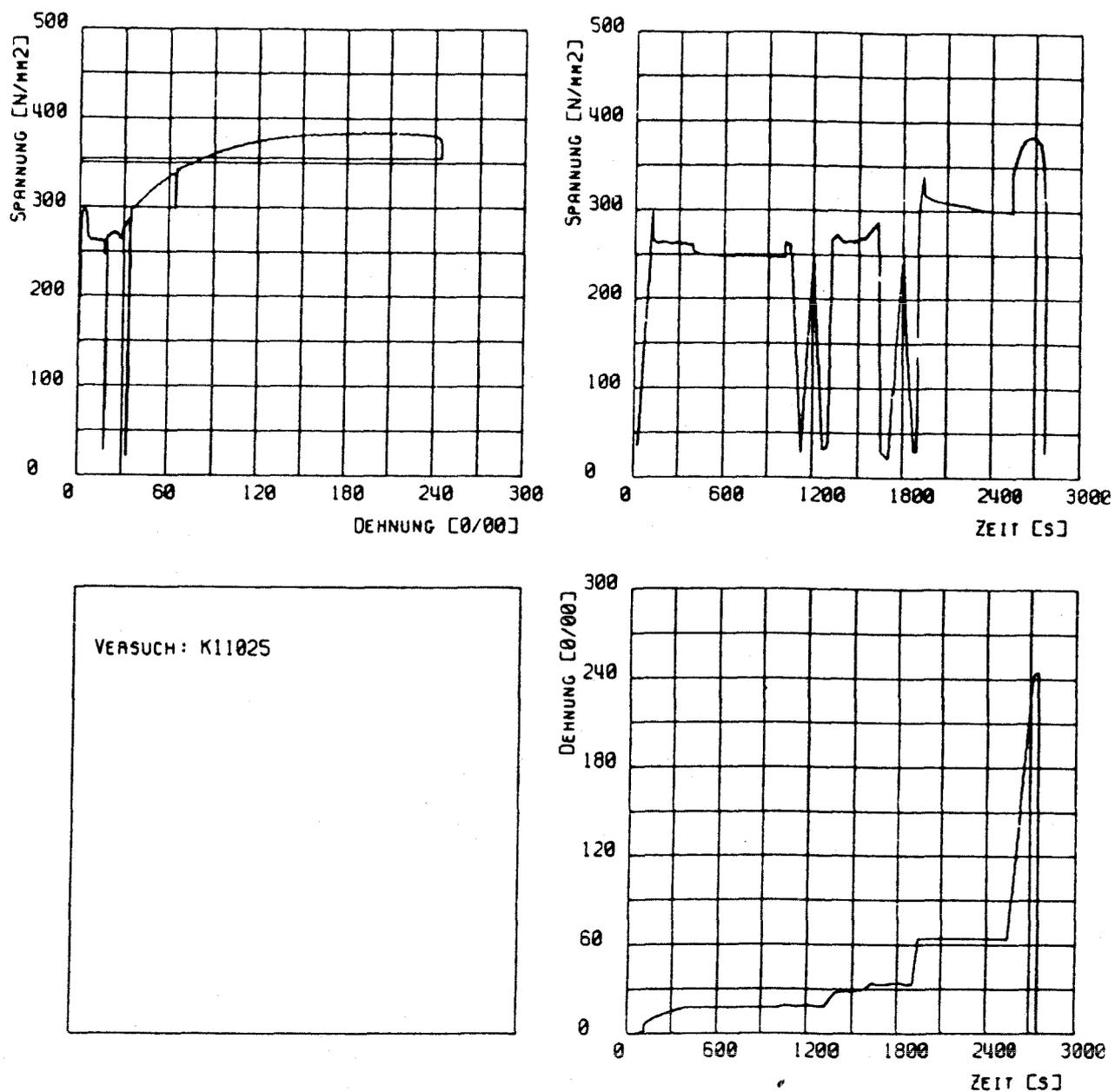


Bild A1.12. Spannungs-Dehnungs-Zeit-Diagramm des Versuchs K11025;
Dehnung gemessen mit DA1

Bezeichnung	Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	
----- Bereich E -----				
E	205395.	205103.	200723.	
E (So)	205402.	204021.	194955.	
eo	-.034	5.304	29.588	
tu	35	1128	1707	
to	110	1177	1737	
e(tu)	53.954	34.952	26.908	
e(to)	281.421	182.251	94.870	
ve	.148E-01	.148E-01	.116E-01	
vw	.246E-01	.162E-01	.156E-01	
vs	3.033	3.006	2.265	
V (E)	233.162	551.005	1048.227	
----- Bereich Ua -----		----- Bereich Ub -----		
ReL	262.499	261.583	ReL	265.906
tu	119	1010	tu	1329
to	389	1044	to	1628
e(tu)	1.497	6.026	e(tu)	6.968
e(to)	5.951	6.579	e(to)	31.079
min s	260.200	258.119	min s	263.806
max s	265.471	264.083	max s	269.493
vw	.590E-02	.545E-02	vw	.123E-01
ve	.165E-01	.163E-01	ve	.809E-01
vs	-.180E-01	.110E 00	vs	-.112E-01
			A lue	22.599
			Ev	3458.156
			bei s	266.839
----- Bereich S -----		--- GESAMTBEREICH ---		
ReS	247.063	289.805	ReH	297.649
Delta s	13.935	50.898	Rp0,2	262.434
tu	450	2017	Rm	384.034
to	990	2525	Rm,S	333.135
min e	5.959	63.910	Ag (lo)	204.765
max e	5.969	63.993	w(Ag-Br.)	12.210
min s	246.746	298.065	Br. bei s	339.675
max s	249.520	312.212	kl	698.421
c	-164.856	-504.732	n	.237926
vw	.000E 00	-.754E-04	vw	.161133
ve	.135E-04	.143E-03	ve	.934742
			So	162.655

Bild A1.13. Auswertungsprotokoll des Versuchs K11025

1 Einteilung der Bereiche im Versuchsprotokoll

Bereich E Elastischer Bereich bei Be- und Entlastung
 Bereich Ua Fließbereich, Berechnung der unteren Streckgrenzwerte
 Bereich Ub Fließbereich mit anschließendem Verfestigungsbereich
 Bereich S konstant gehaltene Dehnung bzw. konstant gehaltener Weg
 mit Abfall auf statische Streckgrenzwerte

2 Bezeichnung der errechneten Werte

E E-Modul (mit Ber. der veränderten Fläche) = $E (S_0) \cdot (1 + \epsilon_0)$
 E (S₀) E-Modul (ohne Ber. der veränderten Fläche)
 E_v Verfestigungsmodul
 R_{eH} obere Streckgrenze
 R_{p0,2} 0,2 0/0 - Dehngrenze
 R_{eL} untere Streckgrenze
 R_{eS} statische Streckgrenze
 R_m Zugfestigkeit
 R_{m/S} statische Zugfestigkeit
 A_g (l₀) Gleichmaßdehnung
 A_{lue} Luedersdehnung (Übergang Fließber. - Verfestigungsber.)
 V (E) E-Modul liegt mit 95% Wahrsch. zwischen E-V (E) und E+V (E)
 S₀ Querschnittsfläche

 t Bez. fuer die Zeit, berechnet vom Beginn des Versuches
 t_u Zeitpunkt zu Beginn des untersuchten Bereiches
 t_o Zeitpunkt am Ende des untersuchten Bereiches

 s Bezeichnung fuer Spannungen
 s(t_u) Spannung zum Zeitpunkt t_u
 s(t_o) Spannung zum Zeitpunkt t_o
 min s minimale Spannung im untersuchten Bereich
 max s maximale Spannung im untersuchten Bereich

 e Bezeichnung fuer Dehnungen
 e(t_u) Dehnung zum Zeitpunkt t_u
 e(t_o) Dehnung zum Zeitpunkt t_o
 e₀ rechnerische Dehnung bei s = 0 bei Be- und Entlastung
 w Bezeichnung fuer Querhauptweg der Pruefmaschine
 w(Ag-Br.) w bei Gleichmaßdehnung A_g (l₀) - w bei Bruch der Probe

 v Bezeichnung fuer Geschwindigkeiten
 v_e Geschwindigkeit Dehnungszunahme
 v_w Geschwindigkeit Wegzunahme
 v_s Geschwindigkeit Spannungszunahme

 k_{l/n} Beiwerte der Ludwiggleichung $s_w = k_l \cdot \phi^n$
 zur Beschreibung der s - e - Kurve im Verfestigungsbereich :
 phi = wahre Dehnung = $\ln(1 + e)$
 s_w = wahre Spannung = $e \cdot (1 + e)$
 e = aktuelle Dehnung [dimensionslos]
 c Beiwert fuer die Anpassung der Regressionskurve an die
 Messwerte bei der Ermittlung von R_{eS} (c = 1/a²)

3 Einheiten

Kraft	[N]	Weg	[mm]	Dehnung	[0/00]	Zeit	[s]
Fläche	[mm ²]	Spannung	[N/mm ²]	E-Modul	[N/mm ²]	c	[s]
Geschw.	[N/mm ² /s]	[0/00/s]	[mm/s]	k _l	[N/mm ²]	n	[-]

Bild A1.14. Erläuterung zu den Parametern im Auswertungsprotokoll

A2 DATENBANK

A2.1 ALLGEMEINES

Zur Aufnahme der Versuchsergebnisse aus Bescheinigungen und Fremdprüfung wurde ein Datenbanksystem eingerichtet. Mit diesem System können die Daten wahlweise über Dialog oder über Transferfiles eingegeben und geändert werden.

Der Fragenkatalog ist in einem Steuerfile abgelegt. Sämtliche Antworten werden in einem sog. ASCII-string abgelegt und auf die Platte des Rechners im Randomformat abgespeichert. Hierbei erhält jede Bescheinigung bzw. jeder Versuch eine Satznummer, mit der es jederzeit möglich ist, den entsprechenden Satz zu lesen. Die zu den Fragen zugehörigen Adressen im ASCII-string sind ebenfalls im Steuerfile gespeichert.

Eine Auswertung der Daten wird mit an das System gekoppelten Rechen- und Plottprogrammen durchgeführt.

Für dieses Forschungsvorhaben wurden zwei Datenbanken eingerichtet:

1. Datenbank "Bescheinigungen"
2. Datenbank "Fremdprüfung"

A2.2 DATENBANK "BESCHEINIGUNGEN"

Sämtliche Daten aus den Bescheinigungen wurden über Dialog eingegeben. Im Bild A2.1 ist der auf dem Bildschirm angezeigte Fragenkatalog mit den entsprechenden (eingegebenen) Daten beispielhaft für eine Bescheinigung dargestellt. Zur Kontrolle wird nach der Eingabe ein Plausibilitätstest (Ausreißertest) durchgeführt, um Fehlermöglichkeiten bei der Eingabe zu minimieren.

Als Beispiel für die in die Datenbank aufgenommenen Ergebnisse

A2.3 DATENBANK "FREMDPRÜFUNG"

Bild A2.1. Datenbank "Bescheinigungen"

```

##### SATZ NR. 2212 #####

Quelle      THYSSEN ENGINEERING GMBH WERK KLOENNE DORTMUND
Datum      1984          STAHLSORTE St      52-3          Schmelzennr.      30215
Probenr.   246          Werksnummer      1264          Lieferzust.      -
Eröschmelzungsart -          Hersteller      Thyssen/Kloe.  Bescheinigung    3.1C
Probe {F = flach R = rund} F Lieferform {F T B} B
Querschnitt 16-2000 Dimension B 16.0 T 16.3 [mm]
ReH [N/mm2] 417          bei Temp.      -----
ReM [N/mm2] 563          bei Temp.      -----
Bruchd. [%] 30          bei Temp.      ----- Form {A5 / A10} A5
Kerbs. Form ISO-V --> Erg. { J } 141          bei Temp.      0
Kohlenstoff C {% * 100} 19 Silizium Si {% * 100} 34
Mangan Mn {% * 100} 151 Phosphor P {% * 1000} 19
Schwefel S {% * 1000} 11 Aluminium Al {% * 1000} ----
Niob Nb {% * 1000} ---- Vanadium V {% * 1000} ----
Chrom Cr {% * 100} ---- Kupfer Cu {% * 100} ----
Nickel Ni {% * 100} ---- Stickstoff N {% * 10000} ----
Bemerkung 1 BESCH. AUS DER VEROEFFENTLICHUNG KINDMANN IM STAHLBAU 6/86
Bemerkung 2 WERKSTOFFKENNWERTE DER REIHERSTIEG - KLAPPBRUECKE
Lieferformen: F = Flachstahl ; T = Profile ; B = Bleche

```

ist im Bild A2.2 der Fragenkatalog mit den entsprechenden Antworten für den Versuch K11025 der Blindprüfung dargestellt. Eine detaillierte Auswertung dieses Versuches erfolgte bereits im Anhang A1.

Firma	St	37	Magnetband	13	Block	9	Steuerfilenname	K11025			
Stahlsorte	Blech	Form	7*1800*3150	Bez.	-----	b/t /d	22.04/	7.377			
E-Modul E1	205395	eo	-.0344	vw	.02456	ve	.01477	ve	3.0328		
E-Modul E2	205103	eo	5.3043	vw	.01624	ve	.01476	ve	3.0060		
E-Modul E3	200723	eo	29.587	vw	.01562	ve	.01164	ve	2.2653		
ReL (Ua) 1	262.50	eu	1.4972	eo	5.9513	vw	.0059	ve	.01649	ve	-.018
ReL (Ua) 2	261.58	eu	6.0262	eo	6.5794	vw	.0054	ve	.01627	ve	.1101
ReL (Ub)	265.91	eu	6.9681	eo	31.078	vw	.0123	ve	.08092	ve	-.011
A lue	22.599	bei e.			266.84	Ev	3458.2				
ReS	247.06	bei e.			5.9640	de	13.935	c	-164.9		
ReH	297.65	Rp0.2			262.43						
Rm	384.03	Rm.S			333.14	vw	.16113	ve	.93474		
Ag (lo)	204.77	w(Ag-Br.)			12.210	kl	698.42	n	.23793		
ak(ISO-V)1	-----	2			-----	3	-----				
Protokoll	ReH	294.5	ReS	248	Rm	383	lo	70	lu	99.8	
Zeugnis	ReH	-----			Rm	-----	dBr.	-----			
C[X*100]	-----	Si[X*100]	-----	Mn[X*100]	-----	P[X*1000]	-----	S[X*1000]	-----		
Al[X*1000]	-----	Nb[X*1000]	-----	V[X*1000]	-----	N[X*1000]	-----	Cu[X*100]	-----		
Chemische Analyse	Analyseort	-	noch	nicht	durchgefuehrt	-					
C[X*100]	-----	Si[X*100]	-----	Mn[X*100]	-----	P[X*1000]	-----	S[X*1000]	-----		
Al[X*1000]	-----	Nb[X*1000]	-----	V[X*1000]	-----	N[X*1000]	-----	Cu[X*100]	-----		

Bild A2.2. Datenbank "Fremdprüfung"