Bauforschung

Untersuchung der Eigenschaften von zurückgebogenen Betonstählen

T 1118

Fraunhofer IRB Verlag

T 1118

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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen 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

T 1118: Untersuchung der Eigenschaften von zurückgebogenen Betonstählen.

7.62

BETON STAHL
GÜTE ÜBER WACHUNG

PRÜFSTELLE FÜR BETONSTAHL PROF. REHM
Fritz-Reuter-Straße 26
D-8000 München 60
Telefon (089) 88 24 91
Telex 05-22 872

Eingang: 17.08.83.

Forschungsvorhaben

Untersuchung der Eigenschaften von

zurückgebogenen Betonstählen

Finanziert durch das Institut für Bautechnik in Berlin

1. Problemstellung

In DIN 1045, Ausgabe Dezember 1978, ist keine Aussage über das Rückbiegen von Betonstählen enthalten. Da es nicht ausdrücklich verboten ist, wird es in vielen Fällen plangemäß, aber auch unkontrolliert angewandt.

Plangemäßes Arbeiten ist z.B. bei Anschlußbewehrungen üblich, bei denen sich in letzter Zeit eine Vielzahl von Elementen in der Baupraxis durchgesetzt haben. Weiterhin ist diese Arbeitsweise bei bestimmten Bauweisen, wie Schlitzwandbau, Gleitschalung etc. eine nötige Voraussetzung für rationelles Arbeiten.

Unkontrolliertes Rückbiegen tritt an nahezu jeder Baustelle auf und dem Praktiker bleibt nur das Staunen darüber, wie gutmütig sich Betonstähle durch Korrekturbiegen wieder in die vorgesehene Form bringen lassen. Ein Beispiel für eine stark durch die Bauarbeiten deformierte Bewehrung zeigt Bild 1. Leider keine extreme Ausnahme.

Bild 1: Schlitzwandbaustelle, stark verbogene Anschlußbewehrung

Für die Tragfähigkeit maßgebend ist nicht so sehr das Erreichen der ursprünglichen Form des Bewehrungsstahles, sondern die Frage, welche Eigenschaften der mehrfach verformte Stahl im Bereich der zwei- oder gar mehrfach gebogenen Zone aufweist und wie sich die beim Rückbiegen meist einstellende Abweichung von der Geradheit auf die Rißbildung, Dehnung und die Überdeckung in diesem Bereich auswirkt.

Das Zurückbiegen wird fälschlicherweise als gesichert angesehen, wenn der Rückbiegeversuch gemäß DIN 488, Teil 3, bestanden wurde. Hier liegt aus mehreren Gründen ein Mißverständnis vor.
Der Rückbiegeversuch wurde in DIN 488 übernommen, weil ursprünglich bei der Kaltverformung der gerippten Betonstähle ein großes Maß von "Sprödbruchempfindlichkeit" zutage trat (Lit.1/3). Durch die Änderung der Technologie bei der Stahlherstellung hat sich dieser Sachverhalt geändert. Dementsprechend wurde im Rahmen der Arbeiten an DIN 488 sowie an der Euronorm versucht, Klarheit darüber zu gewinnen, welches Prüfverfahren für die Biegefähigkeit die verläßlicheren und praxisnäheren Aussagen liefert. Die Entscheidung zwischen Falt- und Rückbiegeversuch fiel eindeutig für den letztgenannten aus (Lit. 4).
Für das Rückbiegen selbst war jedoch damit keine Klärung erreicht. Der Versuchsablauf beim Rückbiegeversuch (Hinbiegen um d_{Br} bis 90°, künstliche Alterung bei 250° C, Rückbiegen um 60°) entsprechen nicht denen des "normalen" Rückbiegens an der Baustelle: Der Biegedorn d_{Br} gemäß DIN 488 ist größer als der zulässige gemäß DIN 1045, der Rückbiegewinkel mußte zu 90° angesetzt werden. Entscheidend ist jedoch, daß in diesem Versuch n i c h t die Eigenschaften im mehrfach gebogenen Bereich bestimmt werden.

Rein werkstoffkundlich stellt das Zurückbiegen eine mehrfache Kaltverformung dar. Dadurch ändern sich die Eigenschaften des Werkstoffes beträchtlich, je nachdem, welche Biege- bzw. Rückbiegebedingungen gewählt werden.
Beim Hinbiegen - korrekter Biegedorn vorausgesetzt - erfolgt eine Kaltverformung mit

- Erhöhung der Festigkeitseigenschaften,

- Abminderung des Verformungsvermögens,

- Änderung der Spannungs- Dehnungslinie, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die 0,01-Grenze beträchtlich absinkt und bei naturharten und wärmebehandelten Stählen die ausgeprägte Streckgrenze verschwindet,

- Ausbildung von Eigenspannungen.

Dies sind Fakten, die im einzelnen nicht des Nachweises im Rahmen dieser Untersuchung bedürfen.

Weiterhin erleidet der Betonstahl eine sog. Reckalterung (Lit. 4), welche je nach Stahlgüte in unterschiedlichem Ausmaß die Dehnung erneut mindert, die 0,01-Grenze aber steigen läßt. Lokal kann auch der sog. Bauschinger-Effekt eine Rolle spielen.

Das Zurückbiegen stellt die eigentlich schwierige Manipulation dar, und zwar aus mehreren Gründen.
Das Ziel wäre an sich,den gebogenen Bereich des Stabes wieder völlig gerade zu bekommen. Der gebogene Bereich setzt aber wegen der mit der Kaltverformung verbundenen Festigkeitserhöhung dem Rückbiegen einen höheren Widerstand entgegen. Der Werkstoff versucht auszuweichen und die Gegenbiegung in Bereichen niedrigerer Festigkeit - also am Ende oder außerhalb der Biegezone zu realisieren.
Dies bedeutet, daß ein exaktes Rückbiegen zur völligen Geradheit nur bei fester Einspannung des vorgebogenen Stahles und abschnittsweisem Ansetzen des Rückbiegewerkzeuges erreicht werden könnte.

Diese Bedingungen sind aber meist - zumindest an der Baustelle - nicht herstellbar.

Somit muß stets nach dem Rückbiegen mit einem mehr oder weniger "welligen" Stahl gerechnet werden (Bild 2)

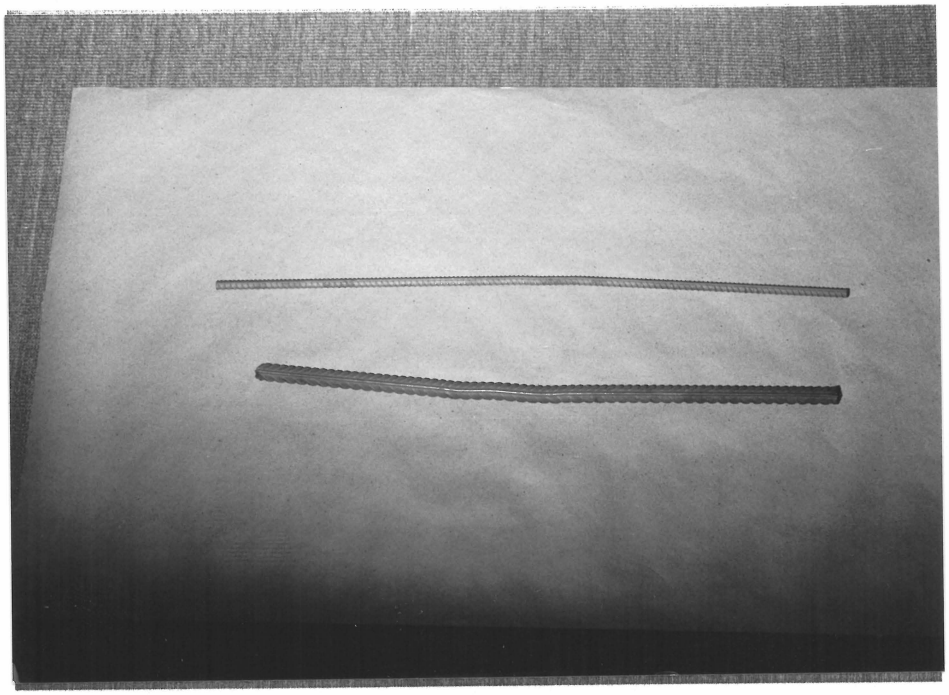

Bild 2

Die Einspannung im Beton bei unmittelbar anschließender Biegung ist nicht so starr, als daß sich dabei die obengenannte günstigste Bedingung einstellen würde. Das verwendete Werkzeug - bei kleinen Abmessungen (kleiner 14 mm) meist nur ein aufgestecktes Rohr - läßt zwar ein sukzessives Geraderichten zu, es bleibt aber ein sehr starker manueller Einfluß der Arbeitskraft.

Erst in letzter Zeit haben sich spezielle Rückbiegegeräte eingeführt (z.B. Firma GMA), die in geeigneter Weise ein recht ordentliches Rückbiegen auch der großen Abmessungen erlauben (Bild 3).
Dabei ist jedoch ausreichend Platz zum Ansetzen des Gerätes und, sofern die Stäbe einbetoniert sind, ein gewisser Abstand der Abbiegung vom Beton erforderlich.

T 1118

2. Untersuchungskonzept

2.1. Generelle Angaben

Eine Untersuchung der Rückbiegefähigkeit kennt zwei natürliche Schwerpunkte

- werkstofftechnische Fragen
- bautechnische Fragen.

Das ursprüngliche Versuchsprogramm beinhaltete beide Komplexe. Nach Abstimmung im Betreuerkreis sollte es Hauptaufgabe des hier beschriebenen Teilprogrammes sein, die werkstoffkundlichen Fragen zu bearbeiten, die bautechnische Seite wird schwerpunktmäßig von einer Paralleluntersuchung erfaßt.

Es war von besonderer Wichtigkeit, die im Zusammenhang mit der Überarbeitung der DIN 488 zu Bedeutung gelangenden Stahlsorten BSt 500/550 ebenso zu berücksichtigen, wie die bislang bewährten Sorten BSt 220/340, BSt 420/500 RU und BSt 500/550 RK.

Das Rückbiegen selbst ist ein stark von der manuellen Ausführung beeinflußter Vorgang. Im Rahmen einer derartigen Untersuchung ist es prinzipiell nicht möglich a l l e Varianten, die in der Praxis vorkommen, zu realisieren. Auf Feld-Untersuchungen kann nicht zurückgegriffen werden, da diese Stähle herausgetrennt und erneuert hätten werden müssen.

Aus diesem Grunde war man gezwungen, eine versuchstechnisch realisierbare Berücksichtigung der Verhältnisse in der Praxis zu finden.

Einige Vorversuche zeigten den starken Einfluß des Biegedorndurchmessers beim Hinbiegen.
Aus diesem Grunde wurden als wesentliche Versuchsparameter die Biegedorndurchmesser variiert. Damit war es auch möglich, eine vergleichsweise Bewertung der Stahlsorten vorzunehmen: Die Änderung der Eigenschaften in Funktion des Biegedorndurchmessers ergab sich als die wesentliche Beurteilungsgröße.
Das Rückbiegen selbst geschah bei Abmessungen bis 12 mm mit aufgestecktem Rohr, wobei der Stab selbst in einer Kupferzwischenlage im Schraubstock festgespannt war. Damit war es möglich, reproduzierbare Verhältnisse zu schaffen. Die größeren Abmessungen wurden in der Biegemaschine, ähnlich der Weise,wie sie das Gerät von Bild 3 zeigt, zurückgebogen. Das typische Aussehen der Proben zeigt das Bild 2.

2.2. Versuche

Hauptserie

Folgendes Vorgehen wurde festgelegt:

a) Die Betonstahlproben wurden bei Raumtemperatur um unterschiedliche Biegedorne auf 90° vorgebogen. Der Zustand der Probe am Ende des Biegevorganges wird in geeigneter Weise festgehalten (das Bewertungsschema wird noch separat erläutert).

b) Die Probe wird künstlich gealtert (250° C, 1/2 h) und anschließend an ruhender Luft auf Raumtemperatur abgekühlt.

c) Die Probe wird bei Raumtemperatur (oder bei - 15 ° C, nur bei einigen Stäben) um 90 ° zurückgebogen (wie voran beschrieben).
Der Zustand der Probe am Ende des Zurückbiegens auf "Geradheit" wird festgehalten (siehe Bewertungsschema).

d) Die Probe wird bei Raumtemperatur einem Zugversuch unterworfen und dabei die

- Lage des Bruches in Bezug auf die mehrfachgebogene Zone,
- die Festigkeitswerte,
- die Verformungswerte in der mehrfach gebogenen Zone und außerhalb bestimmt,
- evtl. Anrisse und die max. Abweichung von der Geradheit ermittelt.

Für alles Versuchsmaterial wurden Vergleichswerte im Zugversuch an unbehandelten Proben bestimmt.

Im Rahmen der Hauptserie wurden auch Ergebnisse der Routineprüfung von Betonstählen mit Biegedornen nach DIN 488 einbezogen.

Nebenserie 1

An einer Stahlsorte (BSt 420/500 RUS) wurden dieselben Untersuchungen wie an der Hauptserie vorgenommen und zusätzlich die Alterungsbedingungen des gebogenen Stabes variiert.

Vier Varianten wurden benutzt:

- künstliche Alterung bei 250° C, 1/2 h
- künstliche Alterung bei 100° C, 1/2 h
- natürliche Alterung von 3 Tagen, Raumtemperatur
- natürliche Alterung von 3 Monaten, Raumtemperatur.

Nebenserie 2

An geraden, freien Stäben fanden Dauerschwingversuche statt. Die Stäbe waren zurückgebogen und wurden im Einstufenversuch im Hochfrequenzpulsator geprüft.

Ergänzung

Bei der Hauptserie wurden eine Reihe von Versuchsergebnissen aus der laufenden Prüfung im Rahmen der Fremdüberwachung einbezogen. In diesem Fall entsprachen die Biegedorndurchmesser denjenigen des Prüfversuches gemäß DIN 488, Teil 1.

2.3. Bewertungsschema

Um bei der Vielzahl der Meßgrößen beim Biege-, Rückbiege- und Zugversuch zu einer quantifizierbaren Bewertung zu kommen, wurde ein Bewertungsschema genutzt.

Dieses lautet für den Biege- und Rückbiegeversuch:

Ereignis	Bewertungsziffer
Ohne Schädigung	0
Bruch beim Hinbiegen	10
Bruch beim Zurückbiegen Biegewinkel: <30°	8
30 ÷ 60°	7
60 ÷ 90°	6
Anriß	3

Das Bewertungsschema für den Zugversuch an der zurückgebogenen Probe lautet:

Lage des Bruches	Meßgröße		Bewertungsziffer (a + b)
Bruch in der mehrfach gebogenen Zone	Festigkeitswerte	$\beta_z < \beta_{s,0}$	a: 5
		$\Delta\beta_z > 10\ \%$	a: 4
		$\Delta\beta_z \leq 10\ \%$	a: 2
	Gleichmaßdehnung außerhalb der mehrfach gebogenen Zone	$< 2\ \%$	b: 5
		$2\% \div 3\%$	b: 3
		$> 3\ \%$	b: 1
Bruch außerhalb der mehrfach gebogenen Zone			0

2.4. Überblick über die Zahl der Versuche

Hauptserie

Stahlsorte	Zahl der Proben
RTS (III S, IV S)	248 (11)
RU (III U)	149 (63)
RK (III K)	74 (12)
RU (IV U)	23 (7)
RUS (IV S)	18 (0)
IV R (IV M)	48 (0)
I U (I U)	29 (0)
Gesamtzahl	591 (95) *

* Zahlen in Klammern: Ergebnisse aus Routineprüfung übernommen.

Nebenserie 1:

Stahlsorte: BSt 420/500 RUS
30 Versuche

Nebenserie 2:

Stahlsorte: BSt 420/500 RU, Durchmesser 10 mm

d_{Br} = 0 :	5 Versuche		
$4 \cdot d_s$	3 Versuche	$2\sigma_a$ = 230 N/mm²	
$2 \cdot d_s$	3 Versuche		

2.5. Darstellung der Ergebnisse

Wegen des riesigen Schreibaufwandes und der daraus resultierenden großen Seitenzahl sind die Einzelergebnisse diesem Bericht nicht beigefügt. Falls die Notwendigkeit zur Einsichtnahme besteht, können sie bei der forschenden Stelle angefordert werden.

Die Darstellung selbst erfolgt in zusammenfassenden Tabellen, in denen jeweils die wesentlichen Versuchsbedingungen

- Stahlsorte, Stahldurchmesser,
- Biegedorndurchmesser
- Temperatur beim Rückbiegen

sowie das Ergebnis, aufgeteilt nach Rückbiege- und Zugversuche mit den wesentlichen Erkenntnissen

- versuchsbezogene Bewertungsziffer (Zugversuch und Zurückbiegen),
- Angaben über die Häufigkeit der Brüche in der mehrfach gebogenen Zone,
- Häufigkeit von Anrissen,
- Festigkeitsabfall,
- verbleibende Dehnung

enthalten sind.

Es handelt sich dabei jeweils um Mittelwerte.
Die Abweichungen von der Geradheit (nach dem Zurückbiegen) sind in separaten Tabellen dargestellt.

3. Versuchsmaterial

Das Versuchsmaterial entspricht im wesentlichen demjenigen des Forschungsvorhabens "Biegen und Rückbiegen von Betonstählen" über das der Bericht Nr. 391/11/79 Auskunft gibt.

In den Tabellen 1 bis 3 sind die Festigkeitseigenschaften sowie - soweit vorhanden - die chem. Analysen angegeben.

Für die aus der Routineprüfung entnommenen Proben war für jede einzelne ein Vergleichszugversuch vorhanden. Die Auflistung der insgesamt 95 Ergebnisse ist in diesem Bericht nicht enthalten.

Es wurde bei der Auswahl des Versuchsmaterials besonders darauf Wert gelegt, die neu in den Markt kommenden wärmebehandelten Sorten zu berücksichtigen.

4. Ergebnisse

Hauptserie

Die Einzelergebnisse wurden sortenbezogen und durchmesserbezogen in den Tabellen 4 bis 38 zusammengestellt. Dazu folgende Übersicht:

Stahlsorte	Durchmessergruppe	Nr. der Tabellen für Ergebnis Zug- und Biegeversuche	Nr. der Tabellen für Messung der Abweichung von der Geradheit
I G	6-12	4	-
	20-28	5	-
	6-28	6	7
III U	6-12	8	-
	14-18	9	-
	20-28	10	-
	6-28	11	12
III K	6-12	13	-
	14-18	14	-
	20-28	15	-
	6-28	16	17
IV U	14-20	18	-
	20-28	19	-
	14-28	20	21
IV R (Matte)	6-12	22	23
IIIS/IVS (RTS)	6-12	24,25,26	-
	14-18	27	-
	20-28	28	-
III RTS	6-28	29	-
IV RTS	6-28	30	-
III RTS u. IV RTS	6-28	31	32
III RUS	20	33	34
IV RUS	14-18	35	
	20-28	36	
	14-28	37	38

N e b e n s e r i e 1:

Stahlsorte: BSt 420/500 RUS, Durchmesser 8 mm

R_e: 466 N/mm²

R_m: 642 N/mm²

(Nullversuche)

A_{10}: 22,6 %

A_{gl}: 13,6 %

Biegedorn: $1{,}0 \cdot d_s$

Die Ergebnisse dieser Untersuchungsreihe enthält Tabelle 41.

N e b e n s e r i e 2:

Stahlsorte BSt 420/500 RU

d_{br}	Schwingbreite	Bruchlastspielzahlen ($\cdot 10^6$)
0	230 N/mm²	2,0, 2,0, 2,0, 2,0, 2,0
$4 \cdot d_s$		0,46*, 1,1, 1,3
$2 \cdot d_s$		0,07*, 0,12, 0,16

2,0 = kein Bruch

* Proben mit Anrissen nach dem Geradebiegen.

5. Diskussion der Ergebnisse

Die entscheidende Frage der Untersuchung im Rahmen der Hauptserie lautete:

- Können bei Verwendung der Biegedorne gemäß DIN 1045, Tab. 18, Betonstähle unterschiedlicher Sorten kalt zurückgebogen werden?

Die zulässigen Biegedorne lauten:

d_s (mm)	III / IV	I
	d_{br}	d_{br}
< 20	$4 \cdot d_s$	$2{,}5 \cdot d_s$
20 bis 28	$7 \cdot d_s$	$5 \cdot d_s$

Ein einwandfreies Arbeiten wäre gegeben, wenn sichergestellt ist, daß

- Beim Biegen keinerlei Verletzung des Stabes A (Anrisse) auftreten

  u n d

- im Zugversuch, d.h. bei anschließender Belastung kein signifikanter Festigkeitsabfall (B1) auftritt und kein Bruch im mehrfachgebogenen Bereich entsteht (B2).

Um die Ergebnisse unter diesem Aspekt betrachten zu können, wurden die Tabellen 39 und 40 angefertigt. Ein Auszug, bei dem die voran mit A) und B) bezeichneten Kriterien positiv bzw. negativ beantwortet werden, ist in folgender Übersicht gegeben.

Stahlsorte	Durchmesser-bereich	A eingehalten bei Biegedorn gemäß DIN 1045	B eingehalten bei Biegedorn gemäß DIN 1045	
			B1	B2
I G	6-18	+	-	-
	20-28	+	-	+
III U	6-18	-	-	-
	20-28	-	-	-
III K	6-18	±	-	±
	20-28	+	+	+
IV U	< 20	+	-	-
	20-28	+	-	+
IV R	< 12	-	-	-
III RTS	8-18	±	-	+
IV RTS	20-28	+	+	+
IV RUS	< 18	+	+	+
	20-28	+	+	-

Bei dieser auf der sicheren Seite liegenden Betrachtungsweise stehen zweifellos die Kriterien A und B2 im Vordergrund. Legt man den Maßstab an wie bei Schweißverbindungen üblich, so verschiebt sich das Bild:

Bei geschweißten Proben ist ein Festigkeitsabfall von maximal 10 % zulässig, ferner soll die Zahl der Schweißstellenbrüche einen Relativanteil von 10 % nicht übersteigen (Entwurf zu DIN 488, Teil 7). Damit erhält man folgenden Sachverhalt:

Stahlsorte	Durchmesser-bereich	Bewertung der Kriterien für Biegedorne gemäß DIN 1045, Tab. 18	
		$\Delta \beta_z$ $\leq$ 10 %	Bruchhäufigkeit in der mehrfach gebogenen Zone
I G	6-18	+	+
	20-28	+	+
III U	6-18	+	-
	20-28	+	+
III K	6-18	+	+
	20-28	+	+
IV U	$\leq$ 18	-	-
	20-28	+	+
IV R	$\leq$ 12	+	-
III RTS		+	+
IV RTS		+	+
IV RUS	< 18	+	+
	> 20	+	+

Aus der letzten Übersicht geht eindeutig der große Einfluß der Stahlsorte/Herstellungsart hervor, der auch bereits in den Tabellen 39 und 40 aufschien. Dabei können die Werte für III U und III K sowie für RTS (III + IV) als gut gesichert angesehen werden. Wie sich im Laufe der Produktion von RUS-Stahl das Qualitätsniveau entwickelt, ist noch nicht absehbar.
Allerdings ist es generell äußerst schwierig, im Rahmen einer derartigen Untersuchung die Extremwerte des Produktionsniveaus zu untersuchen. Dies gilt insbesondere deswegen, weil die Mindestanforderung der Norm für A_{10} bei einigen Stählen sehr niedrig in Bezug auf das übliche Produktionsniveau angesetzt ist.

Der Idealfall einer Untersuchung würde dann gegeben sein, wenn man für alle Stahlsorten (Produktionsarten) gezielt mehrere Qualitätsniveaus untersuchen könnte: Der Aufwand für das Versuchsmaterial alleine ist jedoch so groß, daß daran gar nicht zu denken ist.

Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, die in dieser Versuchsserie gefundenen Werte auf die am Werkstoff vorhandenen Eigenschaften zu beziehen. Nimmt man an, daß die Dehnung (A_{10}) die maßgebende Rolle spielt, so lauten die Bezugswerte wie folgt:

Stahlsorte (Herstellungsart)	Dehnungsniveau des Versuchsmaterials (A_{10})	
	Range	Mittelwert
BSt 220/340 GU	16,9 - 27,9	23,9
BSt 420/500 RU	13,5 - 20,3	17,1
BSt 420/500 RK	10,8 - 17,6	14,4
BSt 500/550 RU	15,0 - 17,5	16,3
BSt 500/550 RUS	18,4 - 21,5	19,4
BSt 500/550 RK	8,9 - 14,2	11,8
BSt 420/500 RTS	19,4 - 22,4	20,9
BSt 500/550 RTS	15,9 - 16,6	16,3

Vergleicht man diese Werte mit den vorangemachten Angaben, so sieht man keine eindeutige Korrelation in dem Sinne, daß höhere Ausgangswerte auch ein günstigeres Verhalten beim Rückbiegen zur Folge haben. Das mag innerhalb einer Stahlsorte gelten, aber beim Vergleich der Stahlsorten offensichtlich nicht.
Die Folgerung daraus lautet, daß das Verformungsverhalten beim Rückbiegen sortenspezifisch zu beurteilen ist.
Im Vordergrund scheint aber die Herstellungsart zu sein. Mit anderen Worten: ein A_{10}- Wert von 15 % ist bei III RK anders zu beurteilen als bei III RTS oder III U.
Diese Zusammenhänge exakt aufzuspüren wäre einer - voran bereits besprochenen - Arbeit vorbehalten, zu der gezielt Versuchsmaterial hergestellt werden müßte. Im Rahmen dieser Untersuchung ist nur die eben gemachte qualitative Aussage für den Mittelwert möglich.

Nebenserie 1 (unterschiedliche Alterung)

Das wesentliche Ergebnis der Nebenserie 1 besteht darin, daß die ungünstigste Prüfart herausgefunden wurde, nämlich die Proben ohne irgendeine Form der Alterung zu prüfen.
Nur bei dieser Variante traten Brüche in der zurückgebogenen Zone auf.
Dieser Sachverhalt äußert sich bereits in der mittleren Rißtiefe. Durch die künstliche Alterung scheint sich zwar die Verformungsfähigkeit der mehrfach gebogenen Zone zu vermindern in dem Sinne, daß sich bei 250° kleiner wird als bei 100° C, aber maßgebend ist offenbar der Grad der Schädigung beim Zurückbiegen. Andererseits scheint das künstliche Altern und die 3-monatige Auslagerung bei Raumtemperatur bei diesem Stahl die Verformungswerte im nicht gebogenen Bereich zu heben.

Nebenserie 2

Die Dauerschwingversuche bestätigen die banale Vermutung, daß durch das Mehrfachbiegen ein sehr starker Abfall der Dauerschwingfestigkeit eintritt. Im vorliegenden Fall ist er nur qualitativ zu fassen, da bei den Nullversuchen nur Durchläufer aufgetreten waren.
Falls es gar zu einem Anriß beim Biegen kommt, kann von einer Schwingfestigkeit gar nicht mehr gesprochen werden.

Auch in dieser Versuchsreihe zeigt sich der vorrangige Einfluß des Biegedorns beim Hinbiegen.

6. Zusammenfassung

Der Gesamtkomplex Rückbiegen von Betonstählen wird von werkstoff- und bautechnischen Gesichtspunkten maßgeblich beeinflußt.
In dem vorliegenden Forschungsprogramm wurde die werkstofftechnische Seite des Problems Rückbiegen ausführlich untersucht.

Aufgabe dieser Untersuchung war es, die verschiedenen derzeit im Stahlbetonbau eingesetzten Betonstähle auf ihre Rückbiegefähigkeit zu untersuchen. Zu diesem Zweck mußte der Begriff "Rückbiegen" definiert und eine geeignete Untersuchungsmethodik gewählt werden.
Als geeignete Versuchsmethode erwies sich ein Zugversuch nach dem Hin- und Zurückbiegen.

Das Zurückbiegen erfolgte dabei in einer Form, die einer günstigen Ausführung in der Praxis nahekommt. Die in der Baupraxis im ungünstigsten Fall auftretenden extremen Rückbiegeprozeduren (Geradeschlagen mit Hämmern) konnten in ein derartiges Versuchsprogramm nicht mit einbezogen werden.

Als Hauptparameter für das Untersuchungsprogramm wurden die Stahlsorten sowie der Biegedorndurchmesser des Hinbiegens eingeführt.

Als Hinbiegewinkel wurde einheitlich 90 ° gewählt. Ein Winkel, der in vielen Fällen bei planmäßigem Rückbiegen auftritt, der aber bei Korrekturbiegungen nie erreicht wird.
Andererseits werden Betonstähle, die auf Biegewinkel über 90° gebogen wurden (z.B. Schlaufen) in der Regel nie zurückgebogen.

Als Kriterien für die Beurteilung der Rückbiegefähigkeit wurde der Werkstoffzustand im zurückgebogenen Stab ermittelt, was über die Feststellung von Anrissen, der erreichten Geradheit sowie der Festigkeits- und Verformungseigenschaften geschah.

Die Untersuchung zeigte, daß Betonstahl in der Regel das Rückbiegen gestattet, wenn beim Hinbiegen der Biegedorn demjenigen entspricht, der in der DIN 488, Teil 1, Tabelle 1, für Betonstahl vorgegeben ist und ein Biegewinkel von 90 ° nicht überschritten wird. Allerdings sind werkstoffspezifische Einschränkungen zu machen, insofern als bestimmte Stahlsorten, z.B. III U und IV U erkennen lassen, daß nicht in allen Fällen (Durchmesser) diese Feststellung zutrifft.

Die Zusammenhänge des Rückbiegevermögens zu den Eigenschaften des Ausgangsmaterials sind sehr schwierig darstellbar. Dies könnte nur geschehen, wenn für ein derartiges Versuchsprogramm gezielt Schmelzen von Betonstählen unterschiedlicher Herstellungsart mit gezielten Eigenschaften produziert werden. Ein derartiges Unterfangen ist jedoch so kostspielig, daß es den Rahmen eines Forschungsprogrammes, wie es hier vorliegt, sprengen würde.

Man muß aber davon ausgehen, daß die Stähle III U und IV U eine derartig große Herstellungsbreite hinsichtlich der Eigenschaften aufweisen, wodurch es zu den vorhin beschriebenen Grenzfällen kommt. Andererseits war Material anderer Stahlsorten mit derartigen Extremzuständen gar nicht verfügbar.

Einen nicht zu unterschätzenden Einfluß auf das Rückbiegen übt die Art der Auslagerung aus. Durch die Versuche wurde festgestellt, daß die ungünstigste Form der Beanspruchung vorliegt, wenn die Proben nicht künstlich gealtert, sondern einer natürlichen Auslagerung unterzogen werden. Eine Erklärung hierfür ist insofern möglich, als durch alle Wärmebehandlungen, auch bei Temperaturen kleiner 250°C, eine Erholung der durch Kaltverformung extrem hoch beanspruchten Stellen auftritt.

Ferner konnte festgestellt werden, daß die Dauerschwingfestigkeit der Stähle durch das Rückbiegen beträchtlich sinkt.
Eine Erklärung sind die aufgetretenen mechanischen Verletzungen im Bereich des Rippenfußes sowie die sich aus der Abweichung von der Geradheit des Stabes ergebenden mehrfachen Zusatzbeanspruchungen.

Betrachtet man ausschließlich die werkstofftechnische Seite des Rückbiegens, so können folgende wesentlichen Schlußfolgerungen gezogen werden.

a) Der Rückbiegevorgang selbst muß mit großer Sorgfalt durchgeführt werden. Knicke sind zu vermeiden.

b) Werden Rückbiegungen vorgenommen, bei Biegedorndurchmessern größer als in DIN 488 und Hinbiegewinkeln kleiner 45 °, so ist im Regelfall davon auszugehen, daß der Werkstoff die vorgeschriebenen statischen Festigkeitseigenschaften sowie eine Gleichmaßdehnung von $\geq$ 2 % besitzt.

c) Muß in einem Anwendungsfall in größerem Umfang zurückgebogen werden oder sind die eben in b) genannten Bedingungen nicht erfüllt, so empfiehlt es sich, werkstoffkundliche Untersuchungen über das Rückbiegen zu machen.

   Diese dürfen jedoch nicht isoliert von der bautechnischen Beanspruchung betrachtet werden.

d) Es empfiehlt sich für das Rückbiegen Betonstahlsorten zu wählen, die von Hause aus eine sehr große Verformungsfähigkeit mitbringen, deren Qualität möglichst wenig streut und die eine günstige Ausbildung der Rippen besitzen.

e) Ist im Bereich des Mehrfachbiegens mit einer nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchung zu rechnen, so sind in jedem Fall gezielte Versuche über die Dauerschwingfestigkeit im Anwendungsfall vorzunehmen.

Acknowledgement:
Die PRÜFSTELLE bedankt sich beim Institut für Bautechnik für die Zur-Verfügung-Stellung der Mittel.
Besonderer Dank gilt den Herren Baudirektor Kulessa, Ministerialrat Dr. Wagner und Dr. Martin für die Betreuung des Vorhabens.

Literaturverzeichnis:

(1) Sprödbruchgefahr bei Betonstählen, Betonstahl in Entwicklung, Heft 6, 1957

(2) Lückerath,W.: Rißanfälligkeit quergerippter Betonstähle, Phönix-Rheinrohr AG, 1956

(3) Banerjee, P. und A. Krüger: Einfluß der Kaltverformung auf die mechanischen Eigenschaften von Betonstählen nach künstlicher Alterung, Arch.EH.Wesen, 37, 1966, Heft 8, S. 639

(4) Wagner O. und D. Rußwurm: Untersuchung der Vergleichbarkeit von Faltversuch und Rückbiegeversuch an Betonstählen, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 8/80

(5) Stolte E. und W. Heller: Stand der Kenntnisse über die Alterung von Stählen, Stahl und Eisen 90, 1970, Nr. 16, S. 861 und 909

(6) Rehm G. und D. Rußwurm: Warmbiegefähigkeit von Betonstählen, Betonwerk + Fertigteiltechnik, Heft 7/80

(7) Lalik J.F. und R.L. Cusick: Cold Straigthening of Partially Embedded Reinforcing Bars, Concrete International, July 1979

ERGEBNISSE VERSUCHSMATERIAL - NULLVERSUCHE

Tabelle 1

Stahlsorte	Durchmesser mm	Stat. Festigkeitswerte			Chemische Analyse								
		β_s	β_z	A_{10}	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
BSt	12	440	738	16,9									
220/340 GU	12	316	471	27,9									
	20	315	525	27,0									
BSt	8	445	722	20,3									
420/500 RU	8	540	765	13,5									
	8	475	732	17,0	0,32	0,36	0,87	0,027	0,067	0,32	0,19	0,77	
	8	488	786	15,4	0,30	0,34	1,37	0,020	0,032	0,16	0,14	0,44	
	12	475	753	18,3	0,39	0,31	1,30	0,015	0,025	0,08	0,08	0,12	
	16	469	750	17,2	0,39	0,31	1,30	0,015	0,025	0,08	0,08	0,12	
	16	547	830	15,0									
	16	430	654	19,7	0,27	0,41	0,91	0,014	0,029	0,07	0,16	0,43	
	20	454	741	18,0	0,39	0,31	1,3	0,015	0,025	0,08	0,08	0,12	
	28	436	716	16,1	0,40	0,23	1,1	0,021	0,047	0,25	0,13	0,34	

ERGEBNISSE VERSUCHSMATERIAL - NULLVERSUCHE

Tabelle 2

Stahlsorte	Durchmesser mm	Stat. Festigkeitswerte			Chemische Analyse								
		β_s	β_z	A_{10}	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
BSt	8	592	622	17,6	0,17	0,24	0,86	0,018	0,030	0,15	0,11	0,27	
420/500 RK	8	544	673	10,8									
	16	465	574	14,3	0,16	0,19	0,77	0,024	0,022				0,005
	25	462	543	12,8									
	28	442	526	16,5	0,19	0,08	0,94	0,024	0,019				0,004
BSt	16	547	830	15,0									
500/550 RU	28	512	722	17,5	0,31	0,23	1,31	0,027	0,042	0,05	0,07	0,14	-
BSt	16	535	679	21,5	0,18	0,50	1,36	0,016	0,023				V 0,08
500/550RUS	28	545	748	18,4	0,19	0,50	1,52	0,029	0,024				V 0,08
BSt	6	645	709	14,2									
500/550 RK	8,5	625	697	12,4									
	10,0	628	661	8,9									

ERGEBNISSE VERSUCHSMATERIAL - NULLVERSUCHE

Tabelle 3

Stahlsorte	Durchmesser mm	Stat. Festigkeitswerte			Chemische Analyse								
		β_s	β_z	A_{10}	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	N
BSt	10	501	600	19,4	0,19	0,07	0,68	0,025	0,020	0,03	0,08		0,007
420/500 RTS	16	480	553	20,9	0,17	0,07	0,87	0,025	0,012				
	28	445	539	22,4	0,18	0,05	0,79	0,024	0,014				
BSt	16	588	653	16,6	0,16	0,04	1,04	0,020	0,015	0,02	0,04		
500/550 RTS	28	568	665	15,9	0,19	0,04	1,08	0,021	0,031	0,01	0,05		

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: I U - BSt 220/340 GK Durchmesserbereich: 6 bis 12 mm									Tabelle 4
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0		9	0	0	0	9	0,8	- 5,9	20,5	11,1
2,0		5	0	0	0	5	1,2	- 3,3	14,3	4,0
3,0		1	0	0	0	1	0	- 7,0	21,3	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: I U - BSt 220/340 GK Durchmesserbereich: 20 bis 28 mm									Tabelle 5
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	11	0	0	0	11	0	0	16,8	0
2,0		2	0	0	0	2	0	-1,1	16,3	0
3,0		1	0	0	0	1	0	-1,1	17,3	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: I U - BSt 220/340 GK Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm									Tabelle 6
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\,\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	20	0	0	0	20	0,4	- 2,7	18,5	5
2,0		7	0	0	0	7	0,9	- 2,7	14,9	28,6
3,0		2	0	0	0	2	0	- 4,1	19,3	0

AUSLENKUNG	Stahl: I U BSt 220/340 GK	Durchmesser: 12,20	Tabelle 7

Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
1,0	20	4,4	0,9	3,0	6,6
2,0	7	3,8	0,9	2,5	5,4
3,0	2	2,9	0,4	2,6	3,2
Alle	29	4,2	1,0	2,5	6,6

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III U	Durchmesserbereich: 6 bis 12 mm	Tabelle 8

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	4	2,3	0	75	4	7,5	-26,3	2,6	100
2,0		8	2,6	0	87,5	8	5,3	-18,7	5,3	75
2,5		4	1,5	0	50	4	0,8	0	8,7	25
3,0		2	1,5	0	50	2	1,5	- 2,6	10,5	50
3,5		4	0	0	0	4	0	0	10,0	0
4,0		1	0	0	0	1	0	- 5,1	7,8	0
5,0		25	0	0	0	25	0	- 0,4	11,3	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III U	Durchmesserbereich: 14 bis 18 mm	Tabelle 9

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{B}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,5	RT	3	3,0	0	100	3	7,0	- 14,8	2,3	100
3,0		16	1,5	0	50	16	3,0	- 7,1	7,4	50
4,0		16	1,3	0	43,8	16	2,4	- 6,8	8,0	50
5,0		8	0	0	0	8	0,8	- 0,7	10,3	25
6,0		16	0	0	0	16	0,2	- 0,6	11,9	6,3

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III U	Durchmesserbereich: 20 bis 28 mm	Tabelle 10

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
3,0	RT	1	0	0	0	1	0	0	11,0	0
4,0		5	0	0	0	5	0	0	10,8	0
5,0		4	0	0	0	4	0	0	10,9	0
6,0		8	1,5	0	50	8	2,0	0	7,7	50
7,0		1	3,0	0	100	1	3,0	-6,9	3,7	100
8,0		23	0	0	0	23	0,1	-0,1	10,8	4,3

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III U	Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm	Tabelle 11

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\,\overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	4	2,3	0	75	4	7,5	- 26,3	2,6	100
2,0		8	2,6	0	87,5	8	5,3	- 18,7	5,3	75
2,5		7	2,1	0	71,4	7	3,5	- 6,3	6,0	57,1
3,0		19	1,4	0	47,4	19	2,7	- 6,3	7,9	47,4
3,5		4	0	0	0	4	0	0	10,0	0
4,0		22	1,0	0	31,8	22	1,7	- 5,2	8,6	36,4
5,0		37	0	0	0	37	0,2	- 0,4	11,0	5,4
6,0		24	0,5	0	16,7	24	0,8	- 0,4	10,5	20,8
7,0		1	3,0	0	100	1	3,0	- 6,9	3,7	100
8,0		23	0	0	0	23	0,1	- 0,1	10,8	4,3

AUSLENKUNG	Stahl: III U	Durchmesser: 6 bis 28 mm	Tabelle 12

Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
1,0	4	3,4	0,9	2,5	4,5
2,0	8	3,1	2,1	1,1	8,0
2,5	7	3,6	1,2	2,0	5,1
3,0	19	5,3	3,3	2,5	13,0
3,5	4	4,5	0,7	3,5	5,2
4,0	22	5,7	2,4	3,2	12,0
5,0	37	6,5	4,3	1,0	16,0
6,0	24	13,2	4,1	5,0	23,0
7,0	1	5,2	-	5,2	5,2
8,0	23	13,8	2,8	7,0	18,0
Alle	149	8,0	5,1	1,0	23,0

RÜCKBIEGEVERSUCHE Stahl: III K Durchmesserbereich: 6 bis 12 mm

Tabelle 13

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	16	3,0	0	100	16	2,6	- 3,0	7,0	50
2,0		7	2,6	0	85,7	7	2,1	- 1,9	7,0	57,1
3,0		7	1,3	0	42,9	7	3,6	- 11,0	5,2	42,9
4,0		4	0	0	0	4	0	- 3,4	9,2*	0
5,0		12	0	0	0	12	0	- 0,5	9,5	0

* nur 2 Proben

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III K	Durchmesserbereich: 14 bis 18 mm	Tabelle 14

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon_{\overline{A}}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,0	RT	1	3,0	0	100	1	10,0	- 27,2	0,3	100
2,5		5	0	0	0	5	0	0	7,2	0
3,0		3	0	0	0	3	0	0	7,2	0
4,0		1	0	0	0	1	0	0	9,1	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III K	Durchmesserbereich: 20 bis 28 mm	Tabelle 15

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,0	RT	1	3,0	0	100	1	0	0	4,6	0
3,0		7	1,7	0	57,1	7	0	- 3,3	7,8	0
4,0		9	0,3	0	11,1	9	0	0	5,8	0
6,0		1	0	0	0	1	0	0	6,1	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III K	Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm	Tabelle 16

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	16	3,0	0	100	16	2,6	- 3,0	7,0	50
2,0		9	2,7	0	88,9	9	2,7	- 4,5	6,0	55,6
2,5		5	0	0	0	5	0	0	7,2	0
3,0		17	1,2	0	41,2	17	1,5	- 5,9	6,6	17,6
4,0		14	0,2	0	7,1	14	0	- 1,0	7,0	0
5,0		12	0	0	0	12	0	- 0,5	9,5	0
6,0		1	0	0	0	1	0	0	6,1	0

AUSLENKUNG	Stahl: III K gereckt und TOR-Stahl	Durchmesser: 6 bis 28 mm			Tabelle 17
Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
1,0	16	2,0	1,1	0,9	4,5
2,0	9	2,3	1,3	1,0	5,0
2,5	5	4,5	4,2	2,0	12,0
3,0	17	4,1	1,8	0,9	9,0
4,0	14	3,7	1,2	1,0	5,6
5,0	12	4,9	1,8	3,0	9,0
6,0	1	2,9	–	2,9	2,9
Alle	74	3,5	2,0	0,9	12,0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV U	Durchmesserbereich: 14 bis 18 mm	Tabelle 18

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\ \bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
4,0	RT	4	0	0	0	4	8,0	- 14,3	1,9	100
5,0		4	0	0	0	4	0	0	8,8	0
6,0		6	0	0	0	6	0	- 0,1	11,0	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV U	Durchmesserbereich: 20 bis 28 mm	Tabelle 19

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\,\overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
4,0	RT	1	3,0	0	100	1	3,0	- 4,4	7,5	100
6,0		7	0	0	0	7	0	- 3,0	11,9*	0
8,0		1	0	0	0	1	0	- 1,1	13,0	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV U	Durchmesserbereich: 14 bis 28 mm	Tabelle 20

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
4,0	RT	5	0,6	0	2,0	5	7,0	- 12,3	3,0	100
5,0		4	0	0	0	4	0	0	8,8	0
6,0		13	0	0	0	13	0	- 1,7	11,5	0
8,0		1	0	0	0	1	0	- 1,1	13,0	0

AUSLENKUNG	Stahl: IV U	Durchmesser: 14 bis 28 mm	Tabelle 21

Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
4,0	5	8,8	1,8	7,0	11,0
5,5	11	10,9	3,0	6,0	15,0
6,0	6	10,3	3,6	4,0	15,0
8,0	1	4,5	–	4,5	4,5
Alle	23	10,0	3,1	,40	15,0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV R (Matte)	Durchmesserbereich: 10 mm	Tabelle 22

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	6	3	0	100	6	7,9	- 10,3	1,4	100
2,0		18	3	0	100	18	4,9	- 3,5	2,4	94,4
3,0		13	3	0	100	13	1,9	- 1,9	5,2	53,8
4,0		6	1	0	33,3	6	1,7	- 1,0	4,5	33,3
5,0		5	1,2	0	40	5	0	- 1,6	6,4	0

AUSLENKUNG	Stahl: IV R (Matte)	Durchmesser: 10 mm			Tabelle 23
Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
1,0	6	2,4	0,6	1,3	3,2
2,0	18	2,6	0,7	1,5	4,1
3,0	13	2,4	0,7	1,2	3,6
4,0	6	1,8	0,6	1,2	2,7
5,0	5	2,7	0,6	2,1	3,3
Alle	48	2,4	0,7	1,2	4,1

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S (Tempcore)	Durchmesserbereich: 8 mm	Tabelle 24

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,0	RT	3	3	0	100	3	0	- 3,0	10,2	0
3,0		9	0	0	0	9	0	- 0,9	15,2	0
4,0		12	0	0	0	12	0	- 1,1	17,2	0
2,0	- 15 ° C	3	3	0	100	3	7,7	-26,1	2,6	0
3,0		9	0,7	0	22	9	0	- 2,0	16,6	0
4,0		12	0	0	0	12	0	- 1,1	15,9	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S und IV S TEMPCORE	Durchmesserbereich: 10 mm	Tabelle 25

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\,\overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	15	2,4	0	80	15	3,3	- 3,2	6,2	80
2,0		10	1,5	0	50	10	1,6	- 2,1	7,5	20
2,5		2	0	0	0	2	0,0	0,0	8,9	0
3,0		15	0,2	0	6,7	15	0,0	- 1,3	13,9	0
4,0		20	0	0	0	20	0,0	- 1,4	12,3	0
2,0	- 15° C	3	5,6	67	33	3	6,6	-	-	67
3,0		13	0,2	0	7,7	13	0,2	- 1,8	14,3	0
4,0		20	0	0	0	20	0,0	- 1,8	12,0	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S (TEMCPORE)	Durchmesserbereich: 12								Tabelle 26
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,0	RT	3	3,0	0	100	3	1,0	0,0	7,4	33
3,0		3	1,0	0	33	3	0,0	0,0	9,0	0
4,0		3	0	0	0	3	0,0	0,0	8,1	0
2,0	- 15 ° C	3	3,0	0	100	3	4,7	- 6,2	3,8	100
3,0		3	2,0	0	67	3	0,0	- 1,5	7,2	0
4,0		3	0,0	0	0	3	0,0	- 1,6	7,4	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S (TEMPCORE)	Durchmesserbereich: 14, 16, 18 mm	Tabelle 27

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	17	2,3	0	76,5	17	3,1	- 5,8	6,2	76,5
2,0		13	0	0	0	13	0,0	- 1,3	10,0	0
2,5		4	0	0	0	4	0,0	- 2,1	10,0	0
3,0		2	0	0	0	2	0,0	- 2,1	13,7	0
4,0		2	0	0	0	2	0,0	- 2,6	11,9	0
6,0		9	0	0	0	9	0	- 0,4	13,0	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S und IV S TEMPCORE	Durchmesserbereich: 20 und 28 mm	Tabelle 28

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	1	3	0	100	1	0,0	0,0	12,9	0
2,0		14	2,8	0	92,9	14	0,8	- 0,6	9,8**	21,4
3,0		17	1,4	0	47	17	0	0	13,2*	0
4,0		2	0	0	0	2	0	0	10,5	0
6,0		1	0	0	0	1	0	0	-	0
8,0		2	0	0	0	2	0	0	12,0	0

* nur 9 Werte

** nur 12 Werte

RÜCKBIEGEVERSUCHE Stahl: III S TEMPCORE Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm Tabelle 29

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	33	2,4	0	78,8	33	3,1	- 4,5	6,4	75,8
2,0		30	1,8	0	60,0	30	0,8	- 1,2	9,7 *	16,7
2,5		4	0,0	0	0	4	0,0	- 1,1	10,2	0
3,0		41	0,1	0	4,9	41	0,0	- 0,8	13,6**	0
4,0		32	0,0	0	0	32	0,0	- 1,1	14,3	0
6,0		10	0,0	0	0	10	0,0	- 0,3	13,0	0
8,0		2	0,0	0	0	2	0,0	0	12,0	0
2,0	- 15 ° C	9	3,9	22,2	77,8	9	6,3	-16,2++	3,2++	55,6
3,0		25	0,6	0	20,0	25	0,1	- 1,8	14,3	0
4,0		28	0,0	0	0	28	0,0	- 1,5	14,1	0

++ 6 Proben

* 28 Pr.

**38 Pr.

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV S, TEMPCORE	Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm	Tabelle 30

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,0	RT	13	1,4	0	46,2	13	0,4	- 1,4	8,0	7,7
2,5		2	0,0	0	0	2	0,0	- 2,1	8,5	0
3,0		5	1,2	0	40,0	5	0,0	0,0	-	0
4,0		7	0,0	0	0	7	0,0	- 1,3	9,3	0
4,0	- 15 ° C	7	0,0	0	0	7	0,0	- 1,7	8,3	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S und IV S TEMPCORE	Durchmesserbereich: 6 bis 28 mm								Tabelle 31
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
1,0	RT	33	2,4	0	78,8	33	3,1	- 4,5	6,4	75,8
2,0		43	1,7	0	55,8	43	0,7	- 1,3	9,2	14,0
2,5		6	0,0	0	0	6	0,0	- 1,4	9,6	0
3,0		46	0,3	0	8,7	46	0,0	- 0,7	13,6*	0
4,0		39	0	0	0	39	0,0	- 1,1	13,4	0
6,0		10	0	0	0	10	0,0	- 0,3	13,0	0
8,0		2	0	0	0	2	0,0	0	12,0	0
2,0	- 15 ° C	9	3,9	22	78	9	6,3	- 16,2 **	3,2**	55,6
3,0		25	0,6	0	20,0	25	0,1	- 1,8	14,3	0
4,0		35	0,0	0	0	35	0	- 1,5	12,9	0
									* 38 Pr.	
									** 6 Pr.	

AUSLENKUNG	Stahl: III S und IV S TEMPCORE Durchmesser: 6 bis 28 mm	Tabelle 32

Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
1,0	33	5,5	2,1	2,0	9,5
2,0	43	5,5	4,2	1,5	16,5
2,5	6	4,1	1,3	2,5	6,0
3,0	46	4,3	3,5	1,1	15,3
4,0	39	2,4	1,5	1,0	9,8
6,0	10	6,1	3,9	1,5	13,5
8,0	2	9,0	6,4	4,5	13,5
Alle	179	4,5	3,4	1,0	16,5

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: III S (mikroleg.)	Durchmesserbereich: 20 mm	Tabelle 33

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\ \overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
8,0	RT	2	0	0	0	2	0	0	11,5	0

AUSLENKUNG	Stahl: III S (mikroleg.) Durchmesser: 20 mm				Tabelle 34
Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
8,0	2	5,8	1,1	5,0	6,5

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV S (mikroleg.)	Durchmesserbereich: 14 bis 18 mm	Tabelle 35

Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\overline{\beta}_z$	$\varepsilon\overline{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,5	RT	2	1,5	0	50	2	1,5	0	10,6	50
3,0		5	0	0	0	5	0	0	10,7	0
4,0		3	0	0	0	3	0	0	12,0	0
5,0		4	0	0	0	4	0	0	12,3	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV S (mikrolegiert) Durchmesserbereich: 20 bis 28 mm									Tabelle 36
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\overline{\Delta\beta}_z$	$\overline{\varepsilon A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
6,0	RT	3	0	0	0	3	0	-0,5	10,8	0
7,0		1	0	0	0	1	0	-0,4	11,4	0

RÜCKBIEGEVERSUCHE	Stahl: IV S (mikrolegiert)	Durchmesserbereich: 14 bis 28 mm								Tabelle 37
Biegedorn Hinbiegen	Temperatur Rückbiegen	Ergebnis: Biegen-Rückbiegen				Ergebnis: Zugversuch				
		Zahl	Mittl. Bewertg. Ziffer	%-Anteil Bruch	%-Anteil Riß	Zahl	Mittlere Bewertg. Ziffer	$\Delta\bar{\beta}_z$	$\varepsilon\bar{A}$	%-Anteil Bruch Biegezone
2,5	RT	2	1,5	0	50	2	1,5	0	10,6	50
3,0		5	0	0	0	5	0	0	10,7	0
4,0		3	0	0	0	3	0	0	12,0	0
5,0		4	0	0	0	4	0	0	12,3	0
6,0		3	0	0	0	3	0	- 0,5	10,8	0
7,0		1	0	0	0	1	0	- 0,4	11,4	0

AUSLENKUNG	Stahl: IV S (mikroleg.) Durchmesser: 14 bis 28 mm	Tabelle 38

Biegedorn Hinbiegen	Probenzahl	Auslenkung in mm			
		$\bar{x}$	s	Kleinstwert	Größtwert
2,5	2	4,3	0,3	4,1	4,5
3,0	5	4,9	1,0	4,0	6,5
4,0	3	5,0	2,2	3,5	7,5
5,5	7	5,7	3,5	1,7	12,0
7,0	1	6,5	–	6,5	6,5
Alle	18	5,3	2,3	1,7	12,0

Zusammenfassende Auswertung								Tabelle 39
Stahlsorte	Durchmesser-bereich	Grenzdurchmesser (d_{br}/d_s) für						
		Bewertungs-ziffer ≙ 0	Rißanteil 0 %	Bewertungs-ziffer ≙ 0	$\Delta\beta_z$ ≤ 5 %	$\Delta\beta_z$ ≤ 0 %	Bruchanteil MFB ≙ 0	Mittlere Auslenkung mm
		Zurückbiegeversuch		Zugversuch				
I G	6 - 12	< 1,0	< 1,0	> 3,0	> 3,0	> 3,0	3,0	
	20 - 28	< 1,0	< 1,0	< 1,0	< 1,0	> 3,0	< 1,0	
	6 - 28	< 1,0	< 1,0	3,0	< 1,0	> 3,0	3,0	4,2
III U	6 - 12	3,5	3,5	3,5	> 4,0	> 5,0	3,5	
	14 - 18	5,0	5,0	> 6,0	5,0	> 6,0	> 6,0	
	20 - 28	8,0	8,0	> 8,0	8,0	> 8,0	> 8,0	
	6 - 28	8,0	8,0	> 8,0	5,0	> 8,0	> 8,0	8,0
III K	6 - 12	4,0	4,0	4,0	4,0	> 5,0	4,0	
	14 - 18	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
	20 - 28	6,0	6,0	2,0	< 2,0	4,0	< 2,0	
	6 - 28	5,0	5,0	4,0	4,0	6,0	4,0	3,5
IV U	14 - 18	< 4,0	< 4,0	5,0	5,0	5,0	5,0	
	20 - 28	6,0	6,0	6,0	< 4,0	> 8,0	6,0	
	14 - 28	5,0	5,0	5,0	5,0	> 8,0	5,0	10,0
IV R	< 12	> 5,0	> 5,0	5,0	2,0	> 5,0	5,0	2,4

Zusammenfassende Auswertung								Tabelle 40
Stahlsorte	Durchmesser-bereich	Grenzdurchmesser (d_{br}/d_s) für						
		Bewertungs-ziffer ≙ 0	Rißanteil 0 %	Bewertungs-ziffer ≙ 0	$\Delta\beta_z$ ≤ 5 %	$\Delta\beta_z$ ≤ 0 %	Bruchanteil MFB ≙ 0	Mittlere Auslenkung mm
		Zurückbiegeversuch		Zugversuch				
TEMPCORE								
III S	8	3,0	3,0	< 2,0	< 2,0	> 4,0	< 2,0	
III S + IV S	10	4,0	4,0	2,5	< 2,0	> 4,0	2,5	
III S	12	4,0	4,0	3,0	< 2,0	< 2,0	3,0	
III S	14 - 18	2,0	2,0	2,0	< 2,0	> 6,0	2,0	
III S + IV S	20 - 28	4,0	4,0	3,0	< 1,0	3,0	3,0	
III S	8 - 28	4,0	4,0	2,5	< 1,0	8,0	2,5	
IV S	8 - 28	2,5	4,0	2,5	< 2,0	> 4,0	2,5	
III S + IV S	8 - 28	4,0	4,0	2,5	< 1,0	8,0	2,5	4,5
IV S								
(mikroleg.)	14 - 18	3,0	3,0	3,0	< 3,0	< 3,0	3,0	
	20 - 28	< 6,0	< 6,0	< 6,0	< 6,0	> 7,0	< 6,0	
	14 - 28	3,0	3,0	3,0	< 2,5	> 7,0	3,0	5,3

RÜCKBIEGEVERSUCHE STAHL III S	Durchmesser 8,0 mm	Tabelle 41

Biegedorn (Hinbiegen)	Auslagerungs-bedingungen	Ergebnis des Zugversuches nach Zurückbiegen						
		Rel. Anteil Bruch in der Biegezone	Mittlere Rißtiefe mm	ΔR_e %	ΔR_m %	ΔA_{10} %	A_G außerhalb %	A_G in der Biegezone %
$1{,}0 \cdot d_s$	Raumtemperatur 3 Tage	63 % a)	0,65	± 0	± 0	- 54	- 24	-
		b)	0,50	± 0	± 0	± 0	± 0	± 0
$1{,}0 \cdot d_s$	Raumtemperatur 3 Monate	0 %	0,40	± 0	+ 2,3	- 3,0	+ 9,5	- 15
$1{,}0 \cdot d_s$	100 ° C 1/2 h	0 %	0,30	- 2,3	+ 1,9	± 0	+ 2,9	- 10
$1{,}0 \cdot d_s$	250 ° C 1/2 h	0 %	0,45	+ 4,7	+ 2,2	- 3,5	+14,7	- 38

a) Brüche in der Biegezone

b) Brüche im freien Stabbereich

sämtliche Angaben in den Spalten 4 bis 9: Mittelwerte