



Avak
Meiss

Spannbetonbau

Theorie, Praxis,
Berechnungsbeispiele
nach Eurocode 2

3. Auflage

Bauwerk **BBB**
Beuth

(Leerseite)

Prof. Dr.-Ing. Ralf Avak
Prof. Dr. Ing. Kathy Meiss

Spannbetonbau

**Theorie, Praxis,
Berechnungsbeispiele
nach Eurocode 2**

**3., vollständig
überarbeitete Auflage**

Beuth Verlag GmbH • Berlin • Wien • Zürich

Bauwerk

© 2015 Beuth Verlag GmbH

Berlin · Wien · Zürich

Am DIN-Platz

Burggrafenstraße 6

10787 Berlin

Telefon: +49 30 2601-0

Telefax: +49 30 2601-1260

Internet: www.beuth.de

E-Mail: kundenservice@beuth.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt.
Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung
des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen,
Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronische Systeme.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und
geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen.
Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages
zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck und Bindung: Colonel, Krakow

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706.

ISBN 978-3-410-22537-9

Vorwort

Die hier vorliegende 3. Auflage wurde vollständig überarbeitet und auf DIN EN 1992 und DAfStb Heft 600 umgestellt.

Die umfassenden „Komplexbeispiele“, die Dr.-Ing. Ronny Glaser konzipierte, wurden von der vorangegangenen Auflage aktualisiert übernommen. Beide Verfasser danken ihm, dass sie auf seine Vorarbeit der vergangenen Auflagen zurückgreifen konnten.

Dem Beuth Verlag danken die Autoren für die stets gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit. Hinweise, die der Verbesserung des Buches dienen, werden gerne angenommen.

Biberach an der Riß/ Stuttgart, im Januar 2015

*Ralf Avak
Kathy Meiss*

Aus dem Vorwort zur 1. Auflage

Im Ingenieurbau ist der Spannbeton ein wesentlicher Eckpfeiler zeitgemäßer Baukonstruktionen. Seit Jahrzehnten sind ca. 90 % aller Brückenneubauten vorgespannte Tragwerke.

DIN 1045-1 ermöglicht vorgespannte Konstruktionen im Hoch- und Brückenbau, ohne grundsätzliche Änderungen des für Stahlbeton-Bauwerke geltenden Bemessungskonzeptes. Die in diesem Buch dargestellte Theorie des Spannbetonbaus wird demzufolge so entwickelt, dass sie eine Erweiterung derjenigen des Stahlbetons ist. Daher werden lediglich Grundkenntnisse im Stahlbeton vorausgesetzt. Im Zuge der Harmonisierung des europäischen Binnenmarktes und zunehmender internationaler Tätigkeitsfelder im konstruktiven Ingenieurbau ist es Ziel der Autoren, den Zusammenhang zwischen Theorie und Bemessungsansatz detailliert darzustellen. Damit ist die Voraussetzung gegeben, auch mit anderen Regelwerken als mit DIN 1045-1 zu arbeiten.

Neben zahlreichen einfachen Beispielen, an denen Leserinnen und Leser neu erworbene Kenntnisse unmittelbar im Anschluss an die Theorievermittlung üben können, werden anhand von zwei vollständigen Berechnungs- und Konstruktionsbeispielen die Theorie und deren Anwendung im Spannbetonbau vertieft.

Cottbus, im April 2005

*Ralf Avak
Ronny Glaser*

(Leerseite)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Begriffe	1
1.1	Prinzip und Ziel der Vorspannung	1
1.2	Begriffe	5
1.2.1	Übersicht	5
1.2.2	Vorspannung mit sofortigem Verbund	6
1.2.3	Vorspannung mit nachträglichem Verbund	8
1.2.4	Vorspannung ohne Verbund	8
1.2.5	Vorspanngrad	9
1.3	Vor- und Nachteile zwischen Spannbeton und Stahlbeton	9
1.4	Geschichtliche Entwicklung des Spannbetons	12
1.5	Querschnittswerte	12
1.5.1	Bruttoquerschnitt	12
1.5.2	Nettoquerschnitt	13
1.5.3	Ideeller Querschnitt	13
2	Vorspanntechnologie.....	14
2.1	Spannglieder und Spannverfahren	14
2.1.1	Bestandteile und Ausführungsform	14
2.1.2	Hüllrohre	15
2.1.3	Anker	16
2.1.4	Kopplungen	18
2.2	Fertigung und Einbau der Spannglieder	19
2.2.1	Erforderliche Angaben	19
2.2.2	Baustellengefertigte Spannglieder	20
2.2.3	Werksgefertigte Spannglieder	21
2.2.4	Einschieben des Spannstahls	21
2.3	Einbringen des Betons	21
2.4	Spannvorgang	22
2.4.1	Regelungen	22
2.4.2	Spannbettvorspannung	22
2.4.3	Vorspannen von Spanngliedern in Hüllrohren	22
2.5	Einpressen des Mörtels	23
3	Baustoffe des Spannbetonbaus.....	25
3.1	Unterschiede zum Stahlbetonbau	25
3.2	Beton	25
3.2.1	Druckfestigkeit	25
3.2.2	Kriechen und Schwinden	26
3.2.3	Kriechzahl	29
3.2.4	Schwindmaß	32
3.3	Betonstahl	38
3.4	Spannstahl	39

3.4.1	Werkstoffkennwerte	39
3.4.2	Werkstoffgesetze	41
3.4.3	Spannungsrissskorrosion.....	42
4	Spanngliedführung.....	44
4.1	Bemessung von Spannbetontragwerken	44
4.2	Rand- und Achsabstände von Spanngliedern	44
4.2.1	Betondeckung	44
4.2.2	Abstände zwischen Spanngliedern	47
4.3	Spanngliedverlauf	50
4.3.1	Krümmung von Spanngliedern bei unterschiedlichen Verbundarten	50
4.3.2	Länge von Spanngliedern	51
4.3.3	Mathematische Beschreibung von Spannsträngen	51
5	Spannkraft und Spanngliedreibung	59
5.1	Differentialgleichung der Spanngliedreibung.....	59
5.2	Umlenkwinkel.....	61
5.2.1	Planmäßiger Umlenkwinkel	61
5.2.2	Ungewollter Umlenkwinkel	62
5.3	Reibungsbeiwert	63
5.4	Spannkraftverlauf.....	64
5.4.1	Planmäßige Spannkraften	64
5.4.2	Spannkraftfehler	65
5.5	Optimierung der Spanngliedführung	67
5.5.1	Anordnung von Spann- und Festankern.....	67
5.5.2	Reibungsverluste und Spanngliedlänge.....	68
5.5.3	Empfehlungen für die konstruktive Bearbeitung	70
5.6	Vorspannung ohne Verbund	71
5.7	Vorspannung mit sofortigem Verbund	71
6	Spannweg und Spannprotokoll.....	73
6.1	Berechnung für ein Spannglied.....	73
6.1.1	Spannweg	73
6.1.2	Nachlassweg	75
6.2	Kontrollen und Maßnahmen bei Abweichungen	81
6.2.1	Maßnahmen der Bauausführung	81
6.2.2	Ermöglichen des Überspannens	84
6.2.3	Planung einer robusten Spanngliedführung	84
6.3	Berechnung für mehrere Spannglieder	87
6.4	Spannanweisung und Spannprotokoll.....	87
6.4.1	Spannanweisung.....	87
6.4.2	Spannprotokoll	88
7	Schnittgrößen	96
7.1	Vorspannkraft für Schnittgrößenermittlung.....	96

7.2	Äußerlich statisch bestimmte Systeme	98
7.2.1	Übersicht	98
7.2.2	Beschreibung der Vorspannwirkung durch Anker- und Umlenkkräfte	98
7.2.3	Beschreibung durch die Kraft im freigeschnittenen Strang (Hebelarmmethode)	100
7.2.4	Grundsätze für Schnittgrößen aus Vorspannung statisch bestimmter Systeme	101
7.2.5	Schnittgrößen im Spannbett	103
7.2.6	Einfluss des Spannstrangs auf die Schnittgrößen	105
7.3	Äußerlich statisch unbestimmte Systeme	107
7.3.1	Übersicht	107
7.3.2	Grundsätze für Schnittgrößen aus Vorspannung statisch unbestimmter Systeme	107
7.3.3	Konkordante Vorspannung	109
7.3.4	Formtreue Vorspannung	110
7.3.5	Einfluss von Vouten	110
7.3.6	Rahmentragwerke	111
7.4	Praktische Schnittgrößenermittlung	119
7.4.1	Verfahren zur Schnittgrößenermittlung	119
7.4.2	Hilfsmittel zur Schnittgrößenermittlung	120
7.5	Mehrsträngige Vorspannung	121
8	Auswirkungen von Kriechen und Schwinden	122
8.1	Allgemeines	122
8.2	Verformungen infolge Kriechen	122
8.2.1	Kriechen unter konstanten Spannungen	123
8.2.2	Kriechen unter variablen Spannungen	124
8.3	Einfach statisch unbestimmte Kopplung	132
8.4	Erweiterte Kriechgleichungen nach DISCHINGER	133
8.4.1	Allgemeines	133
8.4.2	Kontinuierliche Kopplung	134
8.4.3	Örtliche Kopplung	145
8.5	Kriechgleichungen nach TROST	147
8.5.1	Algebraisches Werkstoffgesetz nach TROST	147
8.5.2	Ableitung der Kriechgleichung nach TROST	148
8.5.3	Berechnung der Spannkraftverluste infolge Kriechen, Schwinden und Relaxation gemäß DIN 1045-1	150
8.6	Zweifach statisch unbestimmte Kopplung	157
8.6.1	Grundlagen	157
8.6.2	Glieder der Kontinuitätsbedingungen	159
8.6.3	Gleichgewichtsbedingungen	160
8.6.4	Bestimmungsgleichungen	160
9	Grundlagen der Bemessung	166
9.1	Unterschiede zum Stahlbeton	166

9.2	Bemessungswerte im Grenzzustand der Tragfähigkeit	167
9.3	Bemessungswerte im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	169
9.4	Zeitpunkte für die Bemessung	170
10	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	171
10.1	Nachweis der Dekompression	171
10.2	Begrenzung der Spannungen	174
10.2.1	Erfordernis.....	174
10.2.2	Höhe der Betondruckzone	174
10.2.3	Berücksichtigung von Langzeiteinflüssen.....	177
10.2.4	Begrenzung der Betondruckspannung.....	178
10.2.5	Begrenzung der Betonstahlspannung	179
10.2.6	Begrenzung der Spannstahlspannung.....	179
10.3	Begrenzung der Rissbreite	183
10.3.1	Erfordernis.....	183
10.3.2	Berechnung der Rissbreite.....	184
10.3.3	Beschränkung der Rissbreite ohne direkte Berechnung.....	190
10.3.4	Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreite.....	196
10.4	Begrenzung der Verformungen	202
10.4.1	Anforderungen.....	202
10.4.2	Vereinfachter Nachweis ohne direkte Berechnung	202
10.4.3	Direkte Berechnung der Verformungen.....	203
11	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit	204
11.1	Biegebemessung bei Vorspannung ohne Verbund	204
11.2	Biegebemessung bei Vorspannung mit Verbund.....	204
11.2.1	Allgemeines.....	204
11.2.2	Einsträngige Vorspannung ohne Druckbewehrung.....	208
11.2.3	Einsträngige Vorspannung mit Druckbewehrung	215
11.2.4	Mehrsträngige Vorspannung	215
11.3	Robustheitsbewehrung.....	216
11.3.1	Vereinfachter Nachweis (Oberer Grenzwert).....	216
11.3.2	Genauerer Nachweis (Unterer Grenzwert).....	217
11.4	Querkraftbemessung bei Vorspannung ohne Verbund	219
11.5	Querkraftbemessung bei Vorspannung mit Verbund	219
11.5.1	Grundbemessungswert der auf den Querschnitt einwirkenden Querkraft.....	219
11.5.2	Bauteile ohne Querkraftbewehrung.....	220
11.5.3	Bauteile mit Querkraftbewehrung.....	226
11.6	Bemessung bei Torsion.....	230
11.7	Bemessung auf Durchstanzen	230
11.8	Nachweis gegen Ermüdung	231
11.8.1	Besonderheiten vorgespannter Bauteile gegenüber Stahlbetonbauteilen	231
11.8.2	Möglichkeiten der Nachweisführung	233
11.8.3	Vereinfachter Nachweis	233

11.8.4	Nachweise auf Basis der Betriebsfestigkeit	235
12	Bauliche Durchbildung	236
12.1	Oberflächenbewehrung	236
12.2	Verankerung von Spanngliedern	238
12.2.1	Verankerung durch Verbund	238
12.2.2	Verankerung mit Ankerkörpern am Bauteilende	241
12.2.3	Verankerung mit Ankerkörpern im Bauteil bei internen Spanngliedern	242
12.2.4	Verankerung mit Ankerkörpern im Bauteil bei externen Spanngliedern	244
12.2.5	Spanngliedkopplungen	245
12.3	Umlenkstellen von externen Spanngliedern	248
12.4	Planunterlagen	249
13	Vorbemessung	251
13.1	Notwendigkeit	251
13.2	Teilschritte der Vorbemessung	251
13.2.1	Vorgehensweise	251
13.2.2	Festlegen der Querschnittsform	252
13.2.3	Festlegen der Spannstrangführung	252
13.2.4	Vorbemessung der Betondruckzone	253
13.2.5	Vorbemessung des Spannstahlquerschnitts	255
13.2.6	Wahl der Spannglieder	256
13.2.7	Überprüfung der vorgedrückten Zugzone	256
14	Vorspannung von Flächentragwerken	258
14.1	Vorgespannte Flachdecken	258
14.1.1	Vergleich von vorgespannten und nicht vorgespannten Flachdecken	258
14.1.2	Wahl der Vorspannart und Spanngliedführung	258
14.1.3	Vorspanngrad und Verteilung der Vorspannung auf x- und y-Richtung	262
14.1.4	Schnittgrößen und Bemessung	263
14.1.5	Konstruktive Durchbildung	263
14.2	Vorgespannte Flachgründungen	264
14.3	Vorgespannte Behälter	264
15	Komplexbeispiel Zweifeldträger	266
15.1	Statisches System, Querschnittswerte und Baustoffkenngrößen	266
15.2	Schnittgrößen infolge Lasten	267
15.3	Vorspannung	267
15.3.1	Vorbemessung	267
15.3.2	Spanngliedführung	270
15.3.3	Spannkraftverlauf	273
15.3.4	Schnittgrößen infolge Vorspannung	275

15.3.5	Zeitabhängige Spannkraftverluste.....	277
15.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	281
15.4.1	Biegebemessung.....	281
15.4.1.1	Biegebemessung Zeitpunkt $t = 0$	281
15.4.1.2	Biegebemessung zum Zeitpunkt $t = \infty$	283
15.4.2	Querkraftbemessung.....	286
15.4.2.1	Bemessung des Plattenbalkensteges.....	286
15.4.2.2	Schubkräfte zwischen Balkensteg und Gurten.....	289
15.4.3	Oberflächenbewehrung	291
15.4.4	Zusatzbewehrung im Bereich der Spannanker.....	291
15.5	Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	293
15.5.1	Spannungsbegrenzung.....	293
15.5.1.1	Nachweis unter der seltenen Lastkombination.....	294
15.5.1.2	Nachweis unter der quasi-ständigen Lastkombination.....	297
15.5.2	Rissbreitenbegrenzung	298
16	Komplexbeispiel Flachdecke	299
16.1	Statisches System, Querschnittswerte und Baustoffkenngrößen.....	299
16.2	Schnittgrößen infolge äußerer Lasten	300
16.3	Spanngliedführung, Spannkraftverlauf und Schnittgrößen infolge Vorspannung.....	302
16.3.1	Allgemeines.....	302
16.3.2	Spanngliedführung	302
16.3.3	Spannkraftverlauf.....	305
16.3.4	Anzahl der erforderlichen Monolitzen	308
16.3.5	Umlenkkräfte.....	310
16.3.6	Schnittgrößen infolge Vorspannung.....	312
16.3.7	Zeitabhängige Spannkraftverluste.....	313
16.4	Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	315
16.4.1	Spannungszuwachs in den Spanngliedern.....	315
16.4.2	Biegebemessung.....	316
16.4.3	Durchstanzen	322
16.5	Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	328
16.5.1	Allgemeines.....	328
16.5.2	Spannungsnachweise.....	328
16.5.3	Verformungsbegrenzung	330
	Literatur.....	337
	Bezeichnungen	341
	Anlagen.....	344
	Stichwortverzeichnis	357

1 Einführung und Begriffe

1.1 Prinzip und Ziel der Vorspannung

Bei alleiniger Betrachtung des Grenzzustandes der Tragfähigkeit liegen in einem auf Biegung beanspruchten *Stahlbetonbauteil* eine Druck- und eine Zugzone vor. In der Druckzone trägt der Beton (und eine evtl. vorhandene Druckbewehrung) über Druckspannungen; in der Zugzone ist der Beton gerissen und alleine der Betonstahl weist Zugspannungen auf (Abb. 1.1). Ziel des *Spannbetons* ist es, die Zugzone im Bauteil durch eine künstlich aufgebrachte Verformung (und die damit einhergehende Beanspruchung) zu verringern oder ganz zu eliminieren. Damit kann das Tragvermögen des Betons auf Druck in einem größeren Anteil des Bauteilquerschnittes aktiviert werden. Im Ergebnis wird ein schlankeres und/oder wirtschaftlicheres Bauteil möglich.

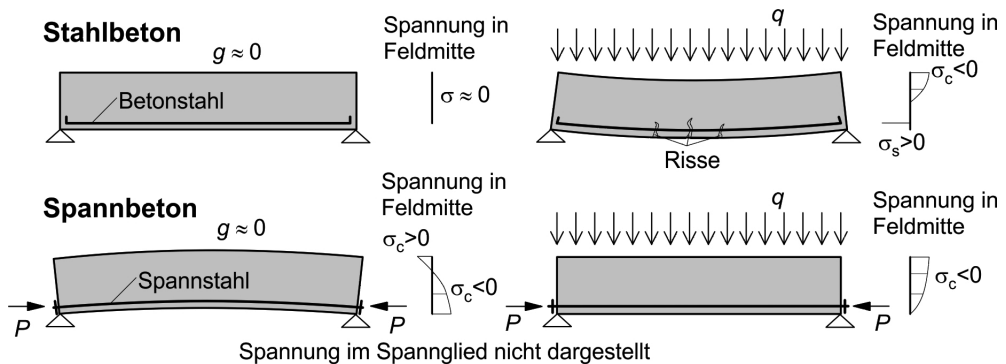


Abb. 1.1 Tragprinzip eines Stahlbeton- und Spannbetonbalkens

Die Vorspannung ist genau wie der Lastfall Eigenlast eine ständige Einwirkung. Aus praktischen Gründen werden Vorspannung und Eigenlast als getrennte Lastfälle behandelt. Der Lastfall Vorspannung (prestressing) erhält ebenso wie das Spannglied hierbei den Index p. Abb. 1.2 zeigt das Prinzip der Vorspannung.

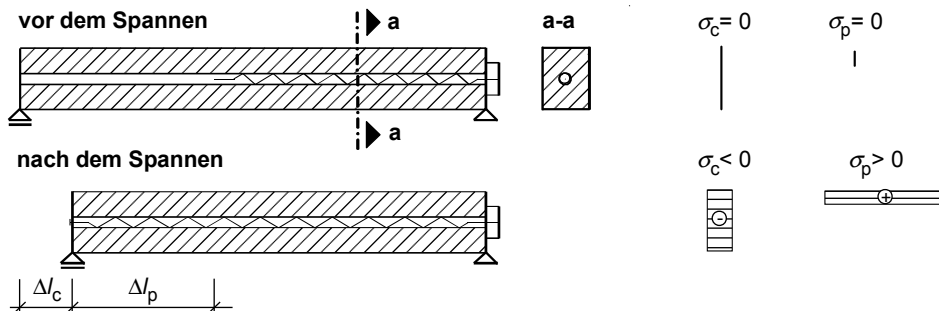


Abb. 1.2 Prinzip des Spannbetons (prestressed concrete)

Die Auswirkungen der Vorspannung hängen nicht nur von der Größe der (Vor-) Spannkraft ab, sondern ganz wesentlich auch von der Formgebung des Spanngliedes. Daher liegt eine wesentliche Ingenieuraufgabe im Finden der optimalen Spanngliederführung und der Größe der Vorspannung. Der Ingenieur hat hierdurch größere Einflussmöglichkeiten auf die Bauteilbeanspruchung als bei allen anderen Baustoffen. Wie die erforderliche Bewehrung über Spannkrafthöhe und -lage beeinflusst werden kann, zeigt **Beispiel 1.1**.

Beispiel 1.1: Positive Wirkung der Vorspannung

An dem in **Abb. 1.3** dargestellten Stahlbetonbalken aus Beton C30/37 mit einer Spannweite $l_{\text{eff}} = 12,5 \text{ m}$ soll der erforderliche Bewehrungsquerschnitt bestimmt werden. Bei der Biegebemessung sind die folgenden drei Fälle zu berücksichtigen:

- (1) reine Biegung
- (2) Biegung mit zentrischer Druckkraft
- (3) Biegung mit exzentrischer Druckkraft.

Der Balken wird im Grenzzustand der Tragfähigkeit durch eine rechnerische Gleichlast $g_d + q_d$ von $25,0 \text{ kN/m}$ beansprucht. Die in den Fällen (2) und (3) zu berücksichtigende Druckkraft N_{Ed} beträgt 600 kN . Der Abstand z_{cp} zwischen der Schwerachse des (Netto-) Betonquerschnitts und der Wirkungslinie der exzentrischen Druckkraft beträgt 30 cm .

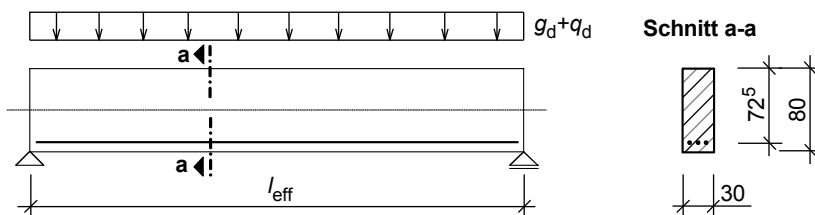


Abb. 1.3 Statisches System und Querschnittsabmessungen des Beispiels 1.1

Lösung:

Rechenwert der Betondruckfestigkeit eines C30/37

$$f_{\text{cd}} = 0,85 \cdot \frac{30}{1,5} = 17,0 \text{ N/mm}^2$$

Maximales Feldmoment im GZT

$$M_{\text{Ed}} = \frac{25 \cdot 12,5^2}{8} = 488 \text{ kNm}$$

Fall (1) – reine Biegung ($N_{\text{Ed}} = 0$)

$$M_{\text{Eds}} = M_{\text{Ed}} = 488 \text{ kNm}$$

Bemessung erfolgt mit dem ω -Verfahren

$$f_{\text{cd}} = \alpha \cdot \frac{f_{\text{ck}}}{\gamma_c}$$

$$M = \frac{q \cdot l^2}{8}$$

$$M_{\text{Eds}} = M_{\text{Ed}} - N_{\text{Ed}} \cdot z_{\text{s1}}$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{488}{30 \cdot 72,5^2 \cdot 17} = 0,182$$

$$\omega = 0,2032$$

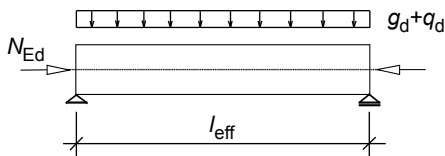
$$\sigma_{\text{sd}} = 443 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{\text{s,erf}} = \frac{1}{443} \cdot (0,2032 \cdot 30 \cdot 72,5 \cdot 17) = 17,0 \text{ cm}^2$$

gewählt: 9 Ø16

$$A_{\text{s,vorh}} = 18,1 \text{ cm}^2 > A_{\text{s,erf}} = 17,0 \text{ cm}^2$$

Fall (2) – Biegung mit zentrischer Druckkraft



$$M_{\text{Eds}} = 488 + 600 \cdot (72,5 - 0,5 \cdot 80) = 683 \text{ kNm}$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{683}{30 \cdot 72,5^2 \cdot 17} = 0,255$$

$$\omega = 0,3019$$

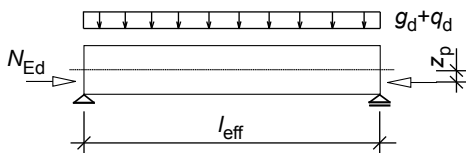
$$\sigma_{\text{sd}} = 439 \text{ N/mm}^2$$

$$A_{\text{s,erf}} = \frac{1}{439} \cdot (0,3019 \cdot 30 \cdot 72,5 \cdot 17 - 600) = 11,8 \text{ cm}^2$$

Gewählt: 6 Ø16

$$A_{\text{s,vorh}} = 12,1 \text{ cm}^2 > A_{\text{s,erf}} = 11,8 \text{ cm}^2$$

Fall (3) – Biegung mit exzentrischer Druckkraft



$$M_{\text{Ed}} = 488 - 600 \cdot 0,30 = 308 \text{ kNm}$$

$$M_{\text{Eds}} = 308 + 600 \cdot (0,725 - 0,5 \cdot 0,80) = 503 \text{ kNm}$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{503}{30 \cdot 72,5^2 \cdot 17} = 0,188$$

$$\omega = 0,2109$$

$$\sigma_{\text{sd}} = 442 \text{ N/mm}^2$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{M_{\text{Eds}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}}$$

Tafel A.1

Verfestigungsbereich des Betonstahls wird ausgenutzt

$$A_{\text{s}} = \frac{1}{\sigma_{\text{sd}}} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{\text{cd}})$$

$$N_{\text{Ed}} = -600 \text{ kN}$$

$$M_{\text{Eds}} = M_{\text{Ed}} - N_{\text{Ed}} \cdot z_{\text{s1}}$$

$$z_{\text{s1}} = d - 0,5 \cdot h$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{M_{\text{Eds}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}}$$

Tafel A.1

$$A_{\text{s}} = \frac{1}{\sigma_{\text{sd}}} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{\text{cd}} + N_{\text{Ed}})$$

$$N_{\text{Ed}} = -600 \text{ kN}$$

$$z_{\text{cp}} = 30 \text{ cm}$$

$$M_{\text{Ed}} = M_{\text{Ed}} - N_{\text{Ed}} \cdot z_{\text{cp}}$$

$$M_{\text{Eds}} = M_{\text{Ed}} - N_{\text{Ed}} \cdot z_{\text{s1}}$$

$$z_{\text{s1}} = d - 0,5 \cdot h$$

$$\mu_{\text{Eds}} = \frac{M_{\text{Eds}}}{b \cdot d^2 \cdot f_{\text{cd}}}$$

Tafel A.1

$$A_{s, \text{erf}} = \frac{1}{442} \cdot (0,2109 \cdot 30 \cdot 72,5 \cdot 17 - 600) = 4,1 \text{ cm}^2 \quad \left| \quad A_s = \frac{1}{\sigma_{sd}} \cdot (\omega \cdot b \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}) \right.$$

Gewählt: 2 Ø16

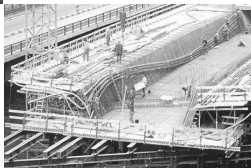
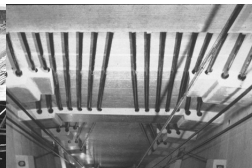
$$A_{s, \text{vorh}} = 4,0 \text{ cm}^2 \approx A_{s, \text{erf}} = 4,1 \text{ cm}^2$$

Im Vergleich der drei Fälle zeigt sich, dass die zentrische Längsdruckkraft und insbesondere die exzentrisch wirkende Längsdruckkraft die erforderliche Bewehrung deutlich gegenüber dem Fall der reinen Biegung reduzieren. Im Spannbetonbau wird die Längsdruckkraft durch ein Spannglied künstlich erzeugt und (z. B.) am Bauteilende eingetragen.

Die Vorspannung ermöglicht wirtschaftlichere Bauverfahren, größere Stützweiten durch verringerte Eigenlasten, geringere Rissbreiten und eine Steigerung der Dauerhaftigkeit. Vorspannung ist in folgenden Bereichen sinnvoll:

- Brückenbau
- Fertigteilbau (geringere Montagegewichte)
- Flachdecken im Hochbau (verminderte Durchstanzbewehrung)
- Spannbeton-Fertigdecken (einachsige gespannte Hohldecken ohne Betonstahlbewehrung)
- Behälter (hohe Dichtigkeit durch fehlende bzw. kleinere Risse gegenüber dem Stahlbeton)
- Anker im Grundbau (geringere Verformungen des Verbaus)
- Betonwaren (z. B. Bahnschwellen und vorgespannte Maste).

Tafel 1.1 Unterscheidungsmerkmale für Vorspannungen

Verbund			vor dem Erhärten des Betons	Zeitpunkt des Aufbringens der Vorspannung	
sofortiger -	nachträglicher -	ohne -			
					
interne -		externe -			
Lage des Spannglieds					

1.2 Begriffe

1.2.1 Übersicht

Zur Beschreibung bestimmter Auswirkungen der Vorspannung wird eine Terminologie benötigt, die auf den zu beschreibenden Effekt hinweist. Daher gibt es für sachlich gleiche Vorspannarten (-verfahren) mehrere Bezeichnungsmöglichkeiten (**Tafel 1.1**).

1. Unterscheidung nach der *Verbundwirkung*
 - Vorspannung *mit sofortigem Verbund*
 - Vorspannung *mit nachträglichem Verbund*
 - Vorspannung *ohne Verbund*.
2. Unterscheidung nach dem *Zeitpunkt* des Aufbringens der *Vorspannung*
 - Spannen *vor* dem Erhärten des Betons (Spannbettvorspannung)
 - Spannen *nach* dem Erhärten des Betons.
3. Unterscheidung nach der *Lage des Spanngliedes*
 - *interne* Vorspannung
 - *externe* Vorspannung.
4. Unterscheidung nach der *Größe der Spannungen* infolge Vorspannung (**Tafel 1.2**)
 - *volle* Vorspannung
 - *beschränkte* Vorspannung
 - *teilweise* Vorspannung
 - *ohne* Vorspannung.
5. Unterscheidungsmerkmal nach der *Spannungsart im Spannstahl*
 - gedehnte Spannglieder (Zug-Spannglied¹)
 - gestauchte Spannglieder (Druck-Spannglied).

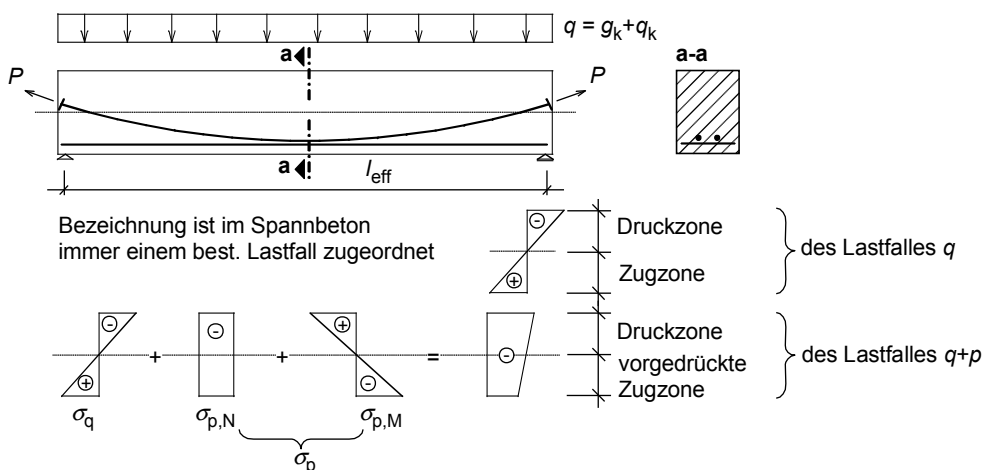
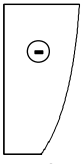
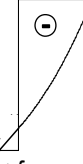
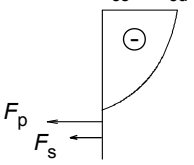
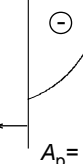


Abb. 1.4 Bezeichnungen im Querschnitt (dargestellt für elastisches Materialverhalten)

¹ Da dies der Regelfall ist, wird unter der Bezeichnung „Spannglied“ ein Zug-Spannglied verstanden.

Tafel 1.2 Unterscheidungsmerkmal Vorspanngrad

Vorspanngrad	Spannungsdiagramm	Aufgabe des Betonstahls
1. <i>voll</i> vorgespannter Stahlbeton (full prestressing) (rechnerisch) Zustand I	$ \sigma_{co} \leq f_{cd}$  $\sigma_{cu} \leq 0$	Konstruktive Mindestbewehrung zur Aufnahme nicht erfasster Zugkräfte (theoretisch ist rechnerisch kein Betonstahl erforderlich).
2. <i>beschränkt</i> vorgespannter Stahlbeton (limited prestressing) (rechnerisch) Zustand I	$ \sigma_{co} \leq f_{cd}$  $\sigma_{cu} < f_{ct}$	Deckung der Zugkraft des positiven Spannungskeils (unter gewissen Voraussetzungen zusammen mit Spanngliedern), sowie Aufnahme nicht erfasster Zugkräfte.
3. <i>teilweise</i> vorgespannter Stahlbeton (partial prestressing) (rechnerisch) Zustand II	$ \sigma_{co} \leq f_{cd}$  $\sigma_{cu} > f_{ct} \rightarrow \text{Zustand II}$	Deckung der Zugkraft des positiven Spannungskeiles zusammen mit den Spanngliedern sowie Aufnahme nicht erfasster Zugkräfte.
4. <i>nicht</i> vorgespannter Stahlbeton (reinforced concrete) (rechnerisch) Zustand II	$\sigma_{co} \leq f_{cd}$  $\sigma_{cu} > f_{ct} \rightarrow \text{Zustand II}$	Alleinige Aufnahme aller für das Gleichgewicht erforderlichen Zugkräfte (nach Zustand II) durch Betonstahl.

Im Querschnitt müssen die Begriffe Druck- und Zugzone erweitert werden. Diese beiden Begriffe beziehen sich auf die Superposition aller Lastfälle *ohne* den Lastfall Vorspannung. Daneben ist zusätzlich die „vorgedrückte Zugzone“ wichtig, die alle Lastfälle *inklusive* des Lastfalls Vorspannung betrachtet (**Abb. 1.4**).

1.2.2 Vorspannung mit sofortigem Verbund

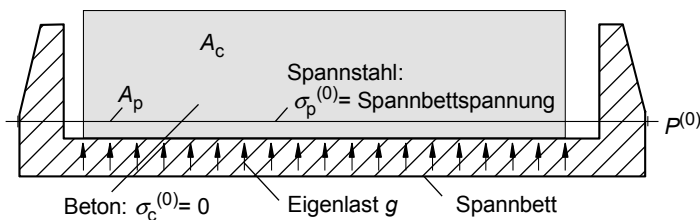
Vorspannung mit sofortigem Verbund (pretensioned prestressed concrete oder pretensioned concrete) wird üblicherweise für Fertigteile verwendet. Der Spannstahl wird in einem „Spannbett“ (**Abb. 1.5**) bereits vor dem Betonieren zwischen den beiden Widerlagern des Spannbetts (stressbed) gedehnt und damit gespannt. Nach dem Betonieren

und Erhärten des Bauteils wird die Verankerung der Spannglieder an den Widerlagern des Spannbetts gelöst. Da der Spannstahl (prestressing steel) mit dem Beton im Verbund ist, kann er innerhalb des Betonquerschnittes nicht mehr in einen spannungslosen Dehnungszustand zurückkehren. Der Beton wird gestaucht (und steht damit unter Druckspannungen), die Stahldehnung geht um den Betrag der Betonstauchung in Höhe des Spanngliedes zurück (geringfügige Verminderung der Vorspannung gegenüber der Spannbettspannung). Die Spannkraft wird am Bauteilende durch Verbundspannungen (ähnlich denen des Betonstahls) und zusätzlich durch die Veränderung im Durchmesser des Spannstahls (= HOYER-Effekt) auf den Beton übertragen.

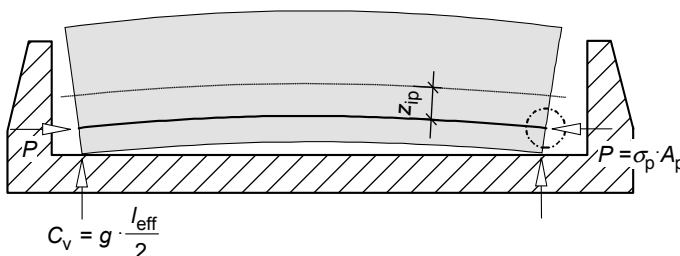
Im Spannbett können einfach geradlinige Spanngliederführungen realisiert werden (Regelfall); es sind jedoch auch polygonale Führungen möglich. Aufgrund erforderlicher Umlenkstellen ist diese aufwändige Lösung jedoch unüblich. Die in **Abb. 1.5** dargestellte Vorspannkraft wird durch mehrere Litzen realisiert. Sofern eine konstante Vorspannkraft im Bauteil nicht möglich sein sollte, können einzelne Litzen im Endbereich mit einer gleitfähigen Trennschicht (z. B. Bitumenanstrich) versehen werden, womit dann für diese Litzen im Bereich der Trennschicht eine vollständige Entspannung ermöglicht wird, und z. B. nur im Bereich des Maximalmomentes in Feldmitte alle Litzen wirksam sind.

Eine Sonderform der Spannbettvorspannung ist bei Spannbeton-Fertigdecken (prefabricated holocast-slab) zu finden. Hier werden zunächst ca. 150 m lange Spannbetonelemente gefertigt, die nach dem Erhärten des Betons in 10 bis 16 m lange Fertigteile zersägt werden.

Vor dem Lösen der Verankerung



Nach dem Lösen der Verankerung



Detail

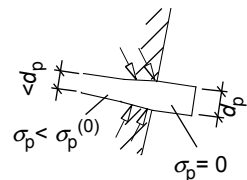
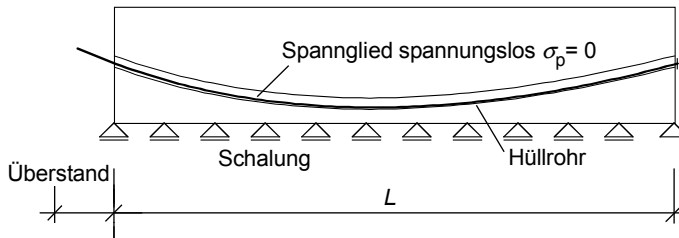


Abb. 1.5 Vorspannung mit sofortigem Verbund (Spannbettvorspannung mit Detail zur Erklärung des HOYER-Effektes)

Vor dem Spannen



Am Ende des Spannens

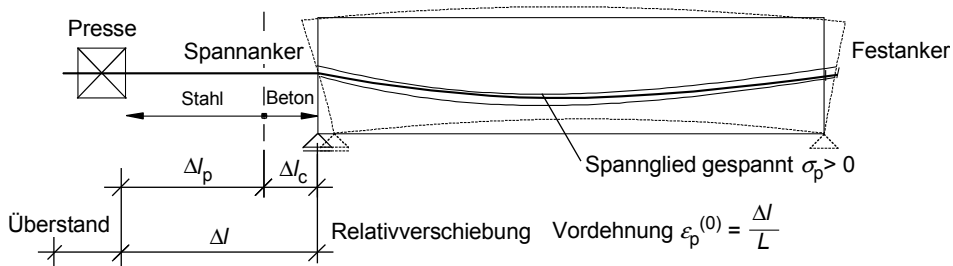


Abb. 1.6 Vorspannung mit nachträglichem Verbund

1.2.3 Vorspannung mit nachträglichem Verbund

Vorspannung mit nachträglichem Verbund (posttensioned prestressed concrete oder posttensioned concrete) wird im Regelfall für Ortbetonbauteile verwendet. Vor dem Betonieren werden hierbei zusätzlich zum Betonstahl Hüllrohre (sheaths) eingebaut. In diese Hüllrohre werden vor oder nach dem Betonieren spannungslose Spannglieder (tendons) eingelegt (Abb. 1.6). Nach dem Erhärten des Betons werden sie vorgespannt. Anschließend wird in den zwischen Hüllrohr und Spanngliedern verbleibenden Raum eine Zementsuspension eingepresst. Nach Erhärten derselben ist über den Zementstein zwischen Spann Stahl und Beton (außerhalb des Hüllrohrs) der Verbund hergestellt.

Bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund ist es möglich, die Spanngliederführung hinsichtlich des Momentenverlaufs zu optimieren (Spanngliederverlauf affin zu den Momenten aus äußeren Einwirkungen, z. B. parabelförmig beim Einfeldträger unter Gleichstreckenlast, siehe Kapitel 7).

Vorspannung mit nachträglichem Verbund wird im Brückenbau angewendet.

1.2.4 Vorspannung ohne Verbund

Bei Vorspannung ohne Verbund (no bond tensioning) wird das Spannglied wie bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund in einem Hüllrohr geführt. Der verbleibende Zwischenraum ist jedoch mit einem Fett (Korrosionsschutz) gefüllt. Somit können keine Verbundspannungen übertragen werden.

Wenn das Spannglied innerhalb des Bauteils geführt wird (interne Vorspannung), ist eine optimale Spanngliedführung (wie bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund) möglich. Sofern das Spannglied außerhalb des Bauteils geführt wird (externe Vorspannung), ist eine geradlinige oder polygonale Spanngliedführung sinnvoll.

Vorspannung ohne Verbund wird im Brückenbau, im Hochbau bei Geschossdecken und im Behälterbau (bei zylindrischen Behältern analog zum Fassreifen) verwendet.

1.2.5 Vorspanngrad

Die Größe der Spannkraft und die hieraus resultierenden Spannungen im Verhältnis zu den Spannungen aus den restlichen äußeren Lastfällen in der gezogenen Randfaser wird als Vorspanngrad κ (degree of prestressing) bezeichnet. Hierbei wird elastisches Materialverhalten unterstellt.

$$\kappa = \frac{|\sigma_{c1,p}|}{\sigma_{c1,g+q}} \quad (1.1)$$

mit: $\sigma_{c1,p}$ Beton- (druck-) spannung infolge Vorspannung am Querschnittsrand der vorgedrückten Zugzone

$\sigma_{c1,g+q}$ Beton- (zug-) spannung infolge äußerer Einwirkungen (z. B. Eigenlast g , Verkehr q und evtl. weitere)

Der Vorspanngrad κ schwankt zwischen $\kappa=0$ beim Stahlbeton ($\sigma_{c1,p}=0$) und $\sigma_{c1,p} \geq 1,0$ (volle Vorspannung). Die gesamte erforderliche Stahlmenge aus Betonstahl A_s und Spannstahl A_p hat bei $\kappa \approx 0,6$ ein Minimum (Abb. 1.7).

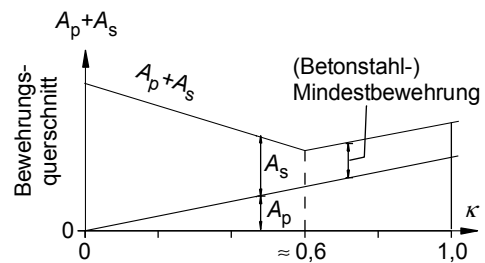


Abb. 1.7 Auswirkung des Vorspanngrads auf die benötigte Stahlmenge

1.3 Vor- und Nachteile zwischen Spannbeton und Stahlbeton

Da Spannbeton im Prinzip ein unter einer künstlich aufgetragenen Längskraft (mit einhergehendem Biegemoment) stehender Stahlbeton ist, sind die Eigenschaften zwischen dem nicht vorgespannten Stahlbeton und dem Spannbeton nicht grundsätzlich verschieden. Vorteile (**Tafel 1.3**) lassen sich bei Auswahl der richtigen Vorspannart (ohne/mit Verbund) und des richtigen Vorspanngrades erreichen (dies schließt auch $\kappa=0$ ein).

Tafel 1.3 Vor- und Nachteile des Spannbetons gegenüber dem Stahlbeton

Vorteile	Nachteile
– Anwendung hochfester Spannstähle möglich (Verhältnis $\sigma_{zul}/\text{Kosten}$ günstiger als bei Betonstahl) – Abmessungen und Eigenlasten geringer aufgrund der Reduzierung der Beanspruchungen (Schnittgrößen) – Verformungen von Bauteilen gering und beeinflussbar – kleinere Rissbreiten oder weitgehend rissfreies Tragwerk (wichtig bei aggressiven Umweltbedingungen und/oder Behältern) – gute Kombinationsmöglichkeit vorgespannter Fertigteile mit nicht vorgespannten Ortbetoneergänzungen auf der Baustelle – Spannglieder sind kontrollierbar, nachspannbar, austauschbar (bei Vorspannung ohne Verbund) – Spannglieder wirken mit bei der Rissbreitenbegrenzung (nur bei Vorspannung mit Verbund) – Spannbeton ermöglicht moderne Brückenbauverfahren	– Zusätzliches Gewerk während der Rohbauarbeiten – Spannstahl ist deutlich empfindlicher als Betonstahl (Korrosion, Sprödeheit, Spannungsrissskorrosion) – Ermüdungsfestigkeit des Spannstahls (im Verbund) gering, sofern das Bauteil im Zustand II ist und wenig Betonstahl vorhanden ist – Witterungsabhängigkeit beim Einpressen von Mörtel in die Hüllrohre (nur Spannglieder mit nachträglichem Verbund) – Entwurf, statische Bearbeitung, Konstruktion und Ausführung erfordern bessere Qualifikation der Ausführenden als im Stahlbetonbau

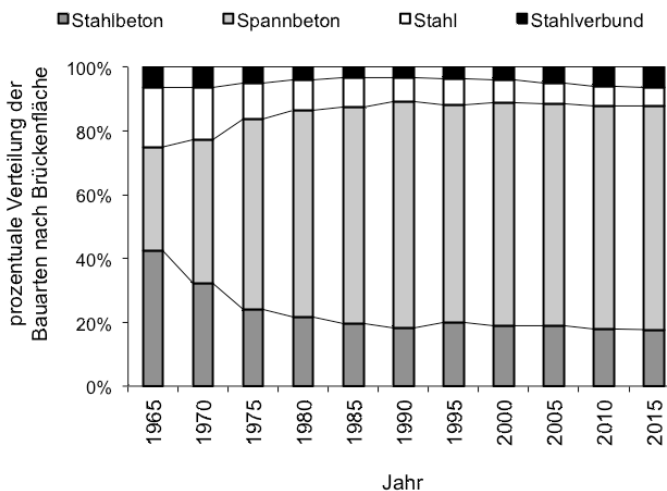


Abb. 1.8 Brückenbestand im Zuge von Bundesfernstraßen nach Bauarten (Quelle BAST)

Tafel 1.4 Entwicklung des Spannbetons im Überblick

Jahr Spannbetonbau	Bauwesen und Bauwerke	Wissenschaft und Technik	Politik und Gesellschaft
1886 <i>P. H. Jackson (USA)</i> Aufnahme des Horizontal- schubs von Gewölben mit- tels vorgespannter Gewin- destangen	<i>J. A. Roebling</i> Brooklyn-Brücke New York (1883)	<i>Th. A. Edison</i> elektr. Glühlampe (1879) und Elektri- zitätswerk (1882)	Benennung von Deut- schen „Schutzgebie- ten“ = Kolonien, Im- perialismus (1884/1885)
1888 <i>W. Döring (D)</i> spannt Betondielen vor (Spannbettvorspannung)	<i>G. Eiffel</i> und <i>M. Köchlin</i> Bau des Eiffelturms (1889)	<i>W. Röntgen</i> Entdeckung der Röntgenstrahlen (1888)	Einführung der Alters- und Invalidenver- sicherung in Deutsch- land (1889)
1906 <i>M. Koenen (D)</i> Erfolgreiche Versuche mit in gespanntem Zustand einbetonierter Beweh- rung	<i>M. Berg</i> Bau der Jahrhunderthalle in Breslau (1913)	<i>N. Bohr</i> erstes Atommodell (1911)	Russisch-Japanischer Krieg und 1. Russ. Revolution (1904/1905)
1919 <i>Wettstein (D)</i> benutzt als Erster hoch- festen Stahl (Klaviersait- ten)	<i>W. Gropius</i> Gründung des Bauhauses in Weimar (1919)	<i>A. Einstein</i> Relativitätstheorie (1915)	Ende des 1. Weltkrieges (1918) und Weimarer Verfas- sung (1919)
1927 <i>Färber (D)</i> Vorspannung ohne Ver- bund und Erfindung des Hüllrohrs	<i>W. Gropius</i> Errichtung des Bauhau- ses Dessau (1926/1927)	<i>Ch. Lindbergh</i> erste Atlantiküber- querung ohne Zwi- schenlandung (1927)	Eintritt Deutschlands in den Völkerbund (1926)
1928 <i>E. Freyssinet (F)</i> erkennt Einflüsse aus Kriechen und Schwin- den; Erfordernis hochfes- ter Stähle	<i>R. Maillart</i> Bau der Brücke über den Salgina-Tobel (1929)		Weltwirtschaftskrise, „schwarzer Freitag“ (1929)
1934 <i>F. Dischinger (D)</i> Patentanmeldung zur Vorspannung ohne Ver- bund u. Spannen gegen erhärteten Beton	<i>W. Bauersfeld</i> und <i>F. Dischinger</i> Bau des Zeiss- Planetariums in Jena (1925)	Erste Fernsehüber- tragung in Deutschland (1935)	„Machtübernahme“ Hitlers, Nationalsozia- lismus (1933)
1936/ <i>F. Dischinger/</i> 1937 <i>DYWIDAG</i> <i>E. Freyssinet/</i> <i>Wayss & Freytag AG</i> erste Spannbetonbrücken	Bahnhofsbrücke in Aue/ Sachsen Brücke über Autobahn A2 bei Oelde	<i>O. Hahn</i> künstliche Kern- spaltung (1938)	Ausbruch des 2. Weltkrieges (1939)
1950 Entwicklung des Frei- vorbaus für Brücken	<i>U. Finsterwalder/</i> <i>DYWIDAG</i> Spannbe- tonbrücke über die Lahn im Freivorbau (1950)	<i>J. Bardeen</i> und <i>W. H. Brattain</i> Erfindung des Transistors (1948)	Gründung der Bun- desrepublik Deutsch- land (1949)
nach Spannbeton wird Regel- 1955 bauweise mit Einführung der [DIN 4227 – 53]	<i>F. Leonhardt</i> Fernsehturm Stuttgart (1956)	<i>G. Gould</i> Entdeckung des Lasers (1957)	Verträge von Rom, Gründung der europ. Wirtschaftsgemein- schaft ⇒ EU (1957)

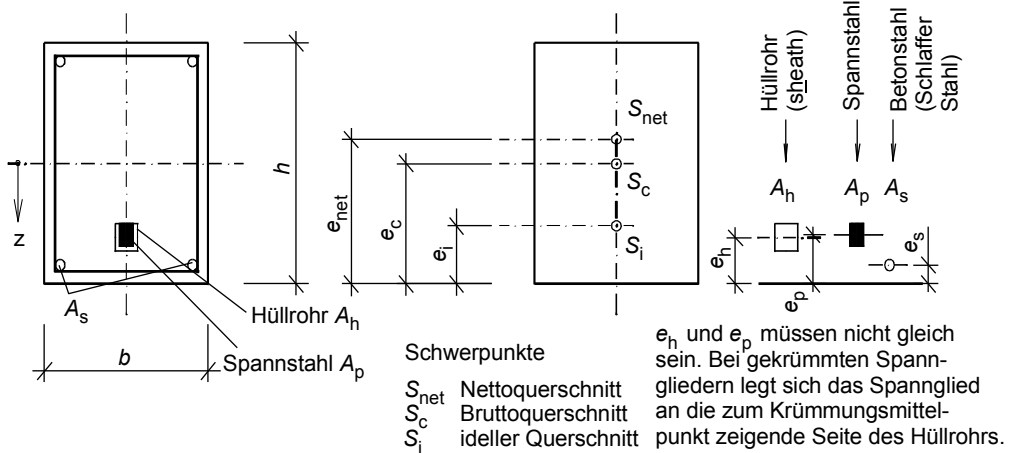


Abb. 1.9 Querschnittsbezeichnungen im Spannbetonbau

1.4 Geschichtliche Entwicklung des Spannbetons

Spannbeton ist verglichen mit anderen Baustoffen eine junge Bauart. Während die Entwicklung zur Anwendungsreife in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts voranschritt (**Tafel 1.4**), ist die zweite Hälfte vom Siegeszug des Spannbetons im Brücken- und Hochbau geprägt (**Abb. 1.8**). Die Kombination mit Hochleistungsbeton eröffnet dem Spannbeton zu Beginn des 21. Jahrhunderts neue Anwendungsmöglichkeiten.

1.5 Querschnittswerte

1.5.1 Bruttoquerschnitt

Die Querschnittswerte von Spannbetonbauteilen lassen sich mit den üblichen Methoden der Festigkeitslehre bestimmen (z. B. [Holschemacher – 13], Abs. 2A, Kap. 5.1). Spannbetontragwerke stellen jedoch höhere Anforderungen an die statische Berechnung als übliche Stahlbetontragwerke. Daher reicht es oftmals nicht mehr aus, die Querschnittswerte allein aufgrund der äußeren Abmessungen (Bruttoquerschnittswerte) zu bestimmen. Es müssen auch evtl. vorhandene Hohlräume (z. B. nicht ausgepresste Hüllrohre) abgezogen werden (Nettoquerschnittswerte). Nach Herstellung des Verbundes sind dann die ideellen Querschnittswerte zu betrachten.

Der Bruttoquerschnitt wird durch die äußere Form bestimmt. Kleine Hohlräume und unterschiedliche Elastizitätsmoduli bleiben unberücksichtigt. Zur Unterscheidung mit den anderen Querschnittswerten erhalten die Bruttoquerschnittswerte den Index „c“.

- A_c Bruttoquerschnittsfläche (in **Abb. 1.9** $A_c = b \cdot h$)
- I_c Brutto-Flächenmoment 2. Grades (in **Abb. 1.9** $I_c = \frac{b \cdot h^3}{12}$)

1.5.2 Nettoquerschnitt

Nettoquerschnittswerte haben den Index „net“. Bei den Nettoquerschnittswerten berücksichtigt man den reinen Betonquerschnitt. Da die Flächenmomentenanteile 2. Grades der kleinen Teilflächen „Hüllrohr“ bzw. Spannstahl deutlich kleiner als die des Bauteils sind, bleiben sie unberücksichtigt ($I_h \approx I_p \approx 0$). Damit erhält man:

Bauteile mit Hüllrohr

Bauteile ohne Hüllrohr

$$A_{\text{net}} = A_c - A_h \quad \text{oder} \quad A_{\text{net}} = A_c - A_p \quad (1.2)$$

$$e_{\text{net}} = \frac{A_c \cdot e_c - A_h \cdot e_h}{A_{\text{net}}} \quad \text{oder} \quad e_{\text{net}} = \frac{A_c \cdot e_c - A_p \cdot e_p}{A_{\text{net}}} \quad (1.3)$$

$$I_{\text{net}} = I_c + A_c \cdot (e_{\text{net}} - e_c)^2 - A_h \cdot (e_{\text{net}} - e_h)^2 \quad \text{oder} \quad I_{\text{net}} = I_c + A_c \cdot (e_{\text{net}} - e_c)^2 - A_p \cdot (e_{\text{net}} - e_p)^2 \quad (1.4)$$

$$W_{\text{net,o}} = \frac{I_{\text{net}}}{h - e_{\text{net}}} \quad (1.5)$$

$$W_{\text{net,u}} = \frac{I_{\text{net}}}{e_{\text{net}}} \quad (1.6)$$

1.5.3 Ideeller Querschnitt

Ideelle Querschnittswerte haben den Index „i“. Bei diesen Querschnittswerten berücksichtigt man den Stahl entsprechend seinem höheren Elastizitätsmodul. Die Querschnittswerte werden benötigt bei Vorspannung *mit sofortigem und bei nachträglichem Verbund*. Die normale Betonstahlbewehrung ist vernachlässigbar.

$$\alpha_e = \frac{E_s}{E_c} \quad (1.7)$$

$$\alpha_p = \frac{E_p}{E_c} \approx \alpha_e \quad (1.8)$$

$$A_i = A_c + (\alpha_e - 1) \cdot (A_p + A_s) \quad (1.9)$$

$$e_i = \frac{A_c \cdot e_c + (\alpha_e - 1) \cdot (A_p \cdot e_p + A_s \cdot e_s)}{A_i} \quad (1.10)$$

$$I_i = I_c + A_c \cdot (e_i - e_c)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_p \cdot (e_i - e_p)^2 + (\alpha_e - 1) \cdot A_s \cdot (e_i - e_s)^2 \quad (1.11)$$

$$W_{\text{io}} = \frac{I_i}{h - e_i} \quad (1.12)$$

$$W_{\text{iu}} = \frac{I_i}{e_i} \quad (1.13)$$

2 Vorspanntechnologie

2.1 Spannglieder und Spannverfahren

2.1.1 Bestandteile und Ausführungsform

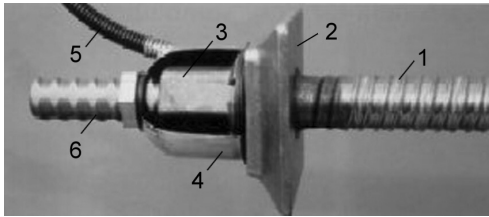
Spannstahl wird in den Lieferformen Litze (prestressing strand), Draht (-wire) oder Stab (-bar) verwendet. Während die Betonstahlbewehrung i. d. R. nur aus dem (abgelängten und gebogenen) Betonstahl besteht, sind für die Spannglieder weitere Teile erforderlich. Lediglich bei Vorspannung mit sofortigem Verbund wird der Spannstahl alleine verwendet (wenn man von den temporär im Spannbett erforderlichen Verankerungen absieht). Spannglieder bestehen neben dem Spannstahl aus einem Hüllrohr, den Ankerkörpern an den Enden des Spanngliedes, bei zu verlängernden Spanngliedern aus Koppelstellen und weiterem vielfältigem Einbauzubehör. Alle diese Bestandteile gehören zu einem „Spannverfahren“. Für das jeweilige Spannverfahren sind Regeln für die Bauausführung und Kennwerte für die Bemessung festgelegt. In Deutschland werden Spannverfahren allgemein bauaufsichtlich vom Deutschen Institut für Bau-technik (DIBt) oder von Mitgliedern der European Organisation for Technical Approvals (EOTA) zugelassen und dürfen nur mit einer derartigen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) verwendet werden (**Tafel 2.1**).

Für Vorspannung mit sofortigem Verbund werden Litzen, gerippte oder profilierte Spanndrähte verwendet. Für Vorspannung mit nachträglichem Verbund und ohne Verbund kommen Litzen, Stabspannstähle oder glatte Spanndrähte zum Einsatz.

Wesentlich ist ferner eine Unterscheidung zwischen baustellengefertigten Spanngliedern (siehe Abschnitt 2.2.2) und Fertig-Spanngliedern (siehe Abschnitt 2.2.3), die in einem Werk vorgefertigt werden.

Tafel 2.1 Auswahl von Spannverfahren mit abZ für DIN EN 1992-1-1

Vorspannart	Zulassungs- nummer	Zulassungsinhaber	Internet
nachträglicher Verbund	ETA 13/0839	Dywidag Systems Int. GmbH	www.dywidag-systems.de
	ETA 05/0202	BBV Systems GmbH	www.bbv-systems.com
	ETA 06/0147	BBR VT Intern. Ltd	www.kb-vt.com
ohne Verbund	ETA 03/0036	Dywidag Systems Int. GmbH	www.dywidag-systems.de
	ETA 12/0150	BBV-Vorspanntechnik	www.bbv-systems.com
	ETA 06/0165	BBR VT Int. Ltd	www.kb-vt.com



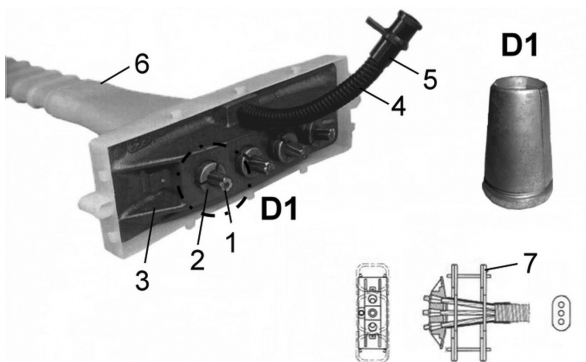
- 1 rundes Hüllrohr (gefalztes Blechrohr)
- 2 Ankerplatte
- 3 Mutter
- 4 Abdeckhaube für Einpressvorgang
- 5 Entlüftungs- bzw. Einpressröhrchen
- 6 Gewindestab / Spann Stahl

Abb. 2.1 Gewindestab-Spannglied mit Plattenanker (Spannanker, Dywidag Systems Int.)

2.1.2 Hüllrohre

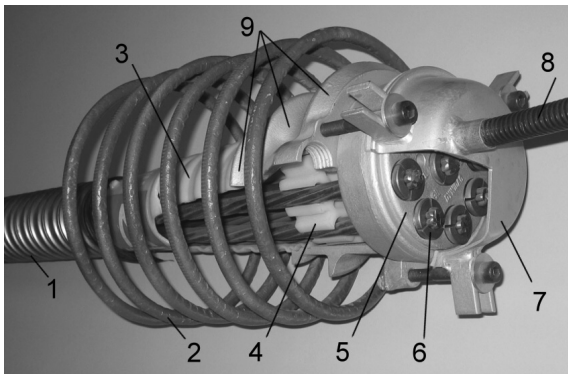
Spannglieder liegen in einem Hüllrohr (Abb. 2.1). Der Zwischenraum zwischen dem Spannglied und dem Hüllrohr ist bei Vorspannung ohne Verbund mit Fett oder Wachs gefüllt, bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund mit Einpressmörtel. Die Hüllrohre bestehen aus glattem oder profiliertem Kunststoff (HDPE), bei Spanngliedern mit nachträglichem Verbund in der Regel aus Bandstahl, der zu profilierten, wendelfalzten Rohren gewickelt wird. Spannglieder mit Kunststoff-Hüllrohren weisen eine höhere Ermüdungsfestigkeit als Spannglieder mit Blechrohren auf, da die Reibkorrosion an den Kontaktstellen des Spannstahls mit dem Hüllrohr geringer ist. Sie werden daher bei neueren Spannverfahren verwendet. Wie später gezeigt werden wird, treten während des Spannvorgangs zwischen Hüllrohr und Spannstahl Verschiebungen auf, aus denen Reibungskräfte zwischen den beiden Elementen resultieren. Der Reibbeiwert von Kunststoff-Hüllrohren ist geringer als der von Blechrohren. Bei Blechrohren steigt er zudem, wenn die Hüllrohrwandung korrodiert. Kunststoff-Hüllrohre sind teurer als Blechrohre.

Bei größeren Spanngliedern sind die Hüllrohre rund, da sich der Kreisquerschnitt einfach herstellen lässt, zwei Hüllrohrabschnitte leicht zusammengeschraubt werden können und beim Kreis das Minimum an Korrosionsschutzmasse (Einpressmörtel oder Fett) erforderlich ist. Bei dünnen Bauteilen ist es in statischer Hinsicht sinnvoll, wenn



- 1 Litze
- 2 Keil (auch mit Klemme bezeichnet in Form eines Konus, siehe D1)
- 3 Ankerplatte (flacher Mehrflächenverankerungskörper)
- 4 Einpress-/ Entlüftungsröhrchen
- 5 Absperrschieber
- 6 rechteckiges Kunststoff-Hüllrohr
- 7 zusätzliche Betonstahlbewehrung

Abb. 2.2 Flacher Mehrflächenanker für Litzenspannglieder (Spannanker, Dywidag Systems Int.)



- 1 Hüllrohr und Verbindungsmuffe zum Übergangsrohr
- 2 Wendel
- 3 Übergangsrohr (Trompete)
- 4 Abstandhalter aus HDPE zum Ordnen der Litzen entsprechend dem Lochbild der Verankerungsscheibe
- 5 Verankerungsscheibe
- 6 Keil (Klemme)
- 7 Einpresskappe (-haube)
- 8 Entlüftungsröhrchen
- 9 Mehrflächenverankerungskörper

Abb. 2.3 Mehrflächenanker (Spannanker, Dywidag Systems Int.)

die einzelnen Spanndrähte oder Litzen nebeneinander liegen (analog dem Unterschied im Hebelarm der inneren Kräfte von neben- zu übereinander liegenden Betonstählen). Hier werden rechteckige oder ovale Hüllrohre verwendet. An den Verbindungsstellen der Hüllrohre sind diese mit Klebeband so abzudichten, dass während des Betoniervorgangs keine Zementschlämme in das Hüllrohr laufen und dieses verstopfen kann.

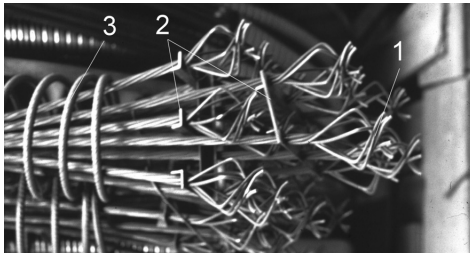
Zu den Hüllrohren gehören ferner Kupplungen, Entlüftungs- und Einpressröhrchen mit Schiebeverschlüssen. Diese Röhrchen sind eindeutig zu beschriften (mit der Positionsnummer des Spanngliedes), dass eine Verwechslung unterschiedlicher Spannglieder ausgeschlossen wird. Die Unterscheidung von Entlüftungs- und Einpressröhrchen erfolgt durch unterschiedlich gefärbte Verschlüsse. Um Einbeulen der Hüllrohre auf den Unterstüzungen zu verhindern, werden für stark gekrümmte Spannglieder Unterlegschalen verwendet.

2.1.3 Anker

Die Spannglieder werden an beiden Enden über Anker (anchors oder anchorages) mit dem Bauwerk verbunden. Sie übertragen die Kraft des Spannstahls auf den Beton. An mindestens einem Ende befindet sich ein „Spannanker“ (**Abb. 2.3**). Hier wird das Spannglied gespannt. Das andere Ende bildet ein „Festanker“ (**Abb. 2.4**) oder, falls das Spannglied beidseitig angespannt werden soll, ein zweiter „Spannanker“. Umgangssprachlich werden Spannanker auch als A-Anker, Festanker als B-Anker bezeichnet.

Spannanker

Die einfachste Ausführungsform von Ankern ist bei Stabspanngliedern möglich. Auf Stabspannglieder können Gewinde aufgerollt oder aufgewalzt (Gewindespannstahl) werden. Die Verankerung erfolgt in diesem Fall über eine Mutter und eine Unterlegscheibe (Ankerplatte) (**Abb. 2.1**). Neben der einfachen Ausführungsform hat diese Verankerungsart den Vorteil, dass zwischen Mutter und Spannstahl (so gut wie) kein Schlupf auftritt. Gewindespannstahl wird hauptsächlich für kurze Spannglieder eingesetzt.



- 1 verzwirbelte Litze (Zwiebel)
- 2 Abstandhalter
- 3 Wendel

Abb. 2.4 Verbundanker (Festanker) System DSI

Heutzutage werden jedoch überwiegend Spannstähle aus Litzen (**Abb. 2.3**) verwendet. Litzenspannglieder werden meistens über Keile (**Abb. 2.2**) verankert. Der Keil hat innen Zähne, die sich in den Spannstahl drücken und ihn so festhalten. Der hierzu erforderliche Querdruck wird durch die konische Außenform (Kegelstumpf) erzeugt. Ein gespanntes Spannglied hat das Bestreben, die ihm aufgezwungene Dehnung rückgängig zu machen. Hierbei zieht es den Keil in die konische Öffnung der Ankerbüchse und der Querdruck baut sich auf.

Während bei kleineren Spanngliedern mit wenigen Litzen die Ankerplatte ausreicht, um die Vorspannkraft auf den Beton zu übertragen (**Abb. 2.2**), werden bei größeren Spanngliedern Mehrflächenanker (**Abb. 2.3**) verwendet, um die Größe des Ankers zu minimieren. Eine Wendel umschnürt den Beton um den Mehrflächenanker. Hierdurch ist infolge des sich einstellenden mehrdimensionalen Druckspannungszustandes (analog der umschnürten Stütze) eine sehr hohe Druckspannung im Beton realisierbar.

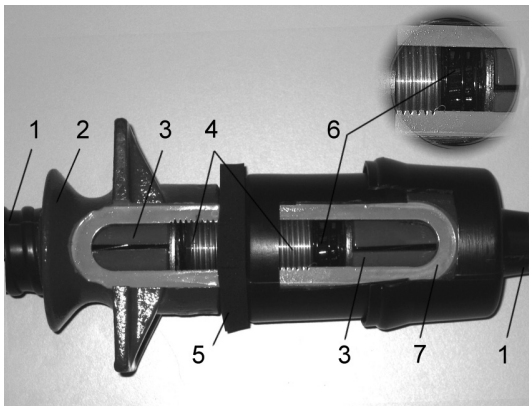
Bei Drahtspanngliedern werden die Drahtenden zu Köpfen aufgestaucht und hierüber verankert.

Als weitere Bauart von Ankern sind auch Klemmanker üblich. Diese Form ist vorteilhaft, wenn das Spannglied nicht aus Stahl, sondern aus Karbonfasern besteht. Karbonfasern sind sehr empfindlich auf Querdruck. Sie benötigen spezielle Anker.

Festanker

Jede Bauart für Spannanker (stressing anchor oder active anchor) kann prinzipiell auch für Festanker (fixed anchor oder passive anchor) verwendet werden. Da Spannanker aufgrund ihrer aufwändigen Bauart teurer als Verbundanker (**Abb. 2.4**) sind, ist dies nur sinnvoll, wenn die Litzen erst nach dem Betonieren in das Hüllrohr eingeschoben werden sollen (siehe Abschnitt 2.2). Bei einer Verankerung über Keile (**Abb. 2.2**, **Abb. 2.3**) müssen diese „vorverkeilt“ werden, d. h. sie werden vor dem Spannen des Spannglieds (am anderen Spanngliedende) mit der Presse in die Ankerbüchse hineingedrückt. Hierdurch wird der erforderliche Querdruck erzeugt. Andernfalls würde das Spannglied kurz nach Aufbringen der Vorspannung aus den Keilen am Festanker herausrutschen.

Festanker sind üblich als Verbundanker (bond anchor). Hierbei werden die Litzen so aufgestaucht, dass sich ein Betonpfropfen in den Litzen bilden kann (**Abb. 2.4**), oder die Litzenenden werden spiralförmig gewellt. Eine weitere Ausbildungsmöglichkeit



- 1 Kunststoff-Hüllrohr
- 2 Ankerplatte und gleichzeitig Ankerbüchse des zuerst einzubauenden und zu spannenden Spanngliedteils
- 3 Keil (Klemme)
- 4 Koppelhülse (Gewindemuffe)
- 5 Dichtring
- 6 Druckfeder zur Arretierung des Konus des zunächst nicht gespannten Spannglieds (Bereich ist mit Korrosionsschutzfett gefüllt) mit Unterlegscheibe
- 7 Koppelbüchse mit PE-Schutzhülle

Abb. 2.5 Feste Kopplung einer Monolitze (System Dywidag Systems Int.)

für Festanker besteht darin, den Spann Stahl am Ende schlaufenförmig wieder in das Spannglied zurückzuführen (z. B. bei Drahtspanngliedern möglich).

Sonderformen

Wenn zylindrische Behälter um den Umfang vorgespannt werden, wird das Spannglied wieder zu seinem Anfang zurückgeführt. Hier liegt dann eine Sonderform eines Ankers vor, die gleichzeitig Spann- und Festanker ist (**Abb. 14.8**).

2.1.4 Kopplungen

Die bisherige Betrachtungsweise setzte voraus, dass das Spannglied mit der gesamten Länge im Bauteil montiert werden kann. Insbesondere im Brückenbau werden Durchlaufträger abschnittsweise (Freivorbau, Taktstieben) oder feldweise (Vorschubrüstungen, Lehrgerüst) hergestellt. In diesem Fall müssen Spannglieder „verlängert“, d. h. gekoppelt werden.

Diese Koppelstellen (coupling joints oder couplers) sind aufgrund der Arbeitsfuge im Beton und Spannstahl Schwachpunkte innerhalb des Bauteils. Bei älteren Brücken (in der BRD bis etwa 1980 gebaut) sind diese Arbeitsfugen oftmals gerissen infolge von Zugspannungen, die aus Verkehrslasten oder Zwangsbeanspruchungen resultieren. Der Spannstahl ist dann (bei der seinerzeit üblichen Vorspannung mit nachträglichem Verbund) großen Spannungsschwankungen unterworfen und kann ermüden. Bei Neubauten ist es daher nur noch zulässig, einen Teil der Spannglieder zu koppeln (maximal 70 %, besser jedoch nur 50 %). Außerdem wird eine höhere Mindestbewehrung in Form von Betonstahl über die Arbeitsfuge geführt.

Stabspannglieder werden üblicherweise mit Hilfe einer Gewindemuffe gekoppelt. Bei Litzen- und Drahtspanngliedern kommen die in **Abb. 2.5** und **Abb. 2.6** dargestellten festen bzw. beweglichen Kopplungen zum Einsatz.

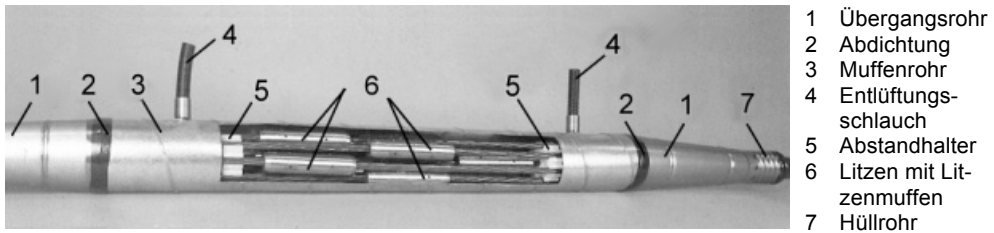


Abb. 2.6 Bewegliche Kopplung

Feste Kopplung

Die feste Kopplung (fixed coupling) wird verwendet, wenn der Teil des Spanngliedes im ersten Betonierabschnitt vorgespannt werden soll, bevor das Spannglied verlängert wird. Sie besteht daher zunächst aus einem Spannanker (vergleichbar **Abb. 2.3**). Nach dem Spannen wird dieser mit einer Koppelmuffe verlängert. Diese Koppelmuffe beinhaltet eine zweite Ankerbüchse, in der die weiterführenden (noch spannungslosen) Litzen verankert werden (**Abb. 2.5**). Durch das Anspannen der weiterführenden Spannglieder wird die Ankerplatte des ersten Spanngliedabschnittes entlastet, da nun die Spannkraft beider Abschnitte über die Koppelmuffe kurzgeschlossen wird.

Bewegliche Kopplung

Die bewegliche Kopplung (movable coupling) wird verwendet, wenn der Teil des Spanngliedes im ersten Betonierabschnitt gleichzeitig mit dem weiterführenden Spanngliedteil vorgespannt wird. Da hierbei infolge der Spannglieddehnungen im ersten Betonierabschnitt eine Verschiebung des Spanngliedes auftritt, ist die Kopplung beweglich (**Abb. 2.6**).

2.2 Fertigung und Einbau der Spannglieder

2.2.1 Erforderliche Angaben

Je nach Art des Verbundes der Vorspannung sind die Regelungen von [DIN EN 13670 – 11]², 7.3 und 7.4 zu beachten. Der Spannstahl muss insbesondere frei von Rost sein, da dieser Ausgangspunkt der Spannungsrisskorrosion (siehe Abschnitt 3.4.3) sein kann. Weiterhin sind Schweißarbeiten in der Nähe von Spannstahl verboten, da Schweißfunken das Spannstahlgefüge verändern (mit der Folge des Verlustes der Zugfestigkeit und dem Reißen des Spanngliedes beim Vorspannen).

Die Lieferung, der Einbau und das Vorspannen der Spannglieder sind meistens Nachunternehmerleistungen. Im Vergleich zu anderen Nachunternehmerleistungen ist dies sinnvoll, da zum einen besonders geschultes Personal erforderlich ist, zum anderen auch das Spannverfahren im Rahmen der Technischen Bearbeitung festgelegt wird.

² In Deutschland müssen zusätzlich die Anwendungsregeln gemäß [DIN 1045-3 – 12] beachtet werden.

Hiermit ist ein Anbieter ausgewählt worden, der nicht baustellenseitig ohne Rücksprache veränderbar ist, im Unterschied z. B. zu einem Betonstahllieferanten.

Die Spannglieder werden in einem zusätzlichen Plan, dem Spanngliedverlegeplan dargestellt. Dieser enthält alle erforderlichen Angaben:

- zugelassenes Spannverfahren und verwendete(r) Spanngliedtyp(en)
- Hüllrohrdurchmesser (viele Spannverfahren bieten für jeden Spanngliedtyp zwei Hüllrohrdurchmesser an) mit Höhenangaben zum Verlegen des Hüllrohrs (Abstand OK untere Schalung bis UK Hüllrohr)
- jedes Spannglied mit Hüllrohr erhält wegen der einzuhaltenden Spannreihenfolge (siehe Abschnitt 6.4) eine eigene Positionsnummer (Spannglieder für Spannbettvorspannung benötigen keine Positionsnummer, wenn sie alle gleich lang und gleich geführt sind.)
- Länge des Spanngliedes und Gewicht
- Typ(en) der Anker und evtl. erforderliche Kopplungen.

Die Spannglieder können entweder auf der Baustelle oder in einem Werk gefertigt werden.

2.2.2 Baustellengefertigte Spannglieder

Bei baustellengefertigten Spanngliedern sind zwei Ausführungsformen zu unterscheiden:

- *Einbau von auf der Baustelle vormontierten Spanngliedern*
Dies ist bei kürzeren Spanngliedern (z. B. für die Quervorspannung der Fahrbahntafeln von Brücken) sinnvoll. Es werden zunächst die Hüllrohre zusammengeschaubt und der Spann Stahl eingezogen. Der Verbundanker als Festanker wird gestaucht und der Plattenanker als Spannanker wird zusammengebaut. Anschließend wird das Spannglied zeitgleich mit den restlichen Bewehrungsarbeiten verlegt. Das Bauteil wird betoniert und nach dem Erhärten vorgespannt.
- *Einbau des Spannstahls nach dem Betonieren*
Hierbei werden zunächst nur die Hüllrohre (mit Übergangsrohr und Ankerplatte für den Spann- und Festanker) in der gewünschten Form verlegt. Dies geschieht zeitgleich mit den restlichen Bewehrungsarbeiten. Um das Hüllrohr formstabiler zu machen und Lageänderungen beim Betonieren (Aufschwimmen!) zu verhindern, wird ein zusätzliches Matrizenrohr in das Hüllrohr eingezogen. Dieses wird nach dem Betonieren wieder entfernt. Dann wird der Spannstahl eingestoßen, die Anker vervollständigt und das Spannglied vorgespannt. Diese Möglichkeit ist bei langen Spanngliedern und/oder abschnittsweiser Herstellung des Bauteils sinnvoll.
- *Einbau des Spannstahls vor dem Betonieren*
Zeitgleich mit den Bewehrungsarbeiten werden die Hüllrohre verlegt, und anschließend wird der Spannstahl eingestoßen. Die Anker werden eingebaut. Dann wird das Bauteil betoniert und nach dem Erhärten vorgespannt.

2.2.3 Werksgefertigte Spannglieder

Werksgefertigte Spannglieder, bestehend aus Spannstahl, Hüllrohren, und Ankerkörpern, werden von den Anbietern vormontiert (pre-assembled tendons). Jedes Spannglied wird auf eine separate Haspel (unwinding device) aufgetrommelt (= aufgewickelt). Diese Haspeln werden auf die Baustelle transportiert und dort am Kran hängend wieder abgetrommelt (= abgewickelt). Dies geschieht in Abstimmung mit den Bewehrungsarbeiten. Danach wird das Bauteil betoniert und nach dem Erhärten vorgespannt.

Werksgefertigte Spannglieder lassen sich nur einbauen, wenn die Betonstahlbewehrung das Abtrommeln nicht behindert. Vorteilhaft sind die witterungsgeschützte Herstellung der Spannglieder und der schnellere Einbau auf der Baustelle.

Ein Sonderfall der werksgefertigten Spannglieder sind diejenigen für die Spannbettvorspannung. Hier werden die Spannglieder vor Beginn der Bewehrungsarbeiten zunächst spannungslos zwischen den Widerlagern des Spannbetts verlegt.

2.2.4 Einschieben des Spannstahls

Der aus Litzen bestehende Spannstahl wird in Spannstahlringen (Coils) aufgewickelt auf die Baustelle geliefert. Stabspannglieder werden in geraden Abschnitten geliefert. Spannstahl ist sowohl beim Transport als auch bei der Zwischenlagerung auf der Baustelle vor Feuchtigkeitseinwirkung und Kondenswasserbildung zu schützen, um Rostansätze zu vermeiden. Tolerierbar ist allenfalls leichter Flugrost, der sich mit einem Tuch abwischen lässt. Spannstahl ist daher in geschlossenen Räumen (z. B. Containern) zu lagern. Zu Beginn der Verarbeitung wird der Spannstahlring in einen Abwickelkäfig (uncoiling device) gelegt und über ein Einschiebegerät, auch Einstoßgerät genannt (hydraulic winch), in das Hüllrohr eingestoßen, bis die Litze am abgelegenen Spanngliedende wieder austritt. Sie wird dann abgetrennt. Bei mehrlitzigen Spanngliedern wird der Vorgang in der erforderlichen Anzahl wiederholt. Damit sich die Litzen während des Einschiebevorganges nicht auffasern, bzw. das Hüllrohr beschädigen, erhalten sie eine Einschiebekappe (Einfädelkappe). Der sukzessive Einschiebevorgang der Litzen in das Hüllrohr hat eine ungeordnete Lage der einzelnen Litzen innerhalb des Spanngliedes zur Folge.

Auch wenn heute Spannstähle mit annähernd konstanten Materialeigenschaften herstellbar sind, sollten in einem Spannglied nur Litzen (bzw. Drähte) aus einer Produktionscharge verwendet werden (kontrollierbar über die Lieferscheine).

2.3 Einbringen des Betons

Gegenüber dem Betonieren im Stahlbetonbau ist insbesondere bei interner Spanngliedführung zu beachten, dass das Hüllrohr beim Einbringen des Betons nicht beschädigt oder verschoben wird. Der Schlauch des Betonpumpenauslegers darf nicht auf die Hüllrohre stoßen. Außerdem müssen die Hüllrohre so fixiert worden sein, dass sie

beim Betonieren weder die vertikale Lage (Aufschwimmen) noch die horizontale Linieneinführung (einseitiger Betonierdruck auf das Hüllrohr) verändern. Die Kunststoff-Kappen an der Spitze eines Innenrüttlers müssen unversehrt sein, da sonst das Hüllrohr durch den Rüttler beschädigt wird.

Zu keinem Zeitpunkt vor oder während des Betonierens darf auf den Hüllrohren gelaufen werden.

Sofern selbstverdichtender Beton verwendet wird, müssen die Hüllrohrverbindungen und Schlauchanschlüsse besonders sorgfältig abgedichtet werden.

2.4 Spannvorgang

2.4.1 Regelungen

Für die Spannarbeiten sind [DIN EN 13670 – 11], 7.5 und ergänzende Regelungen in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung des Spannverfahrens zu beachten. Vor dem Beginn des Spannens wird die vorhandene Betonfestigkeit überprüft und mit der erforderlichen Festigkeit verglichen (**Tafel 3.1**). Hierzu werden zusätzliche Probekörper gefertigt (Erhärtungswürfel, -zylinder), die im Unterschied zur Güteprüfung bis zum Testzeitpunkt direkt am Bauteil (bzw. Bauwerk) gelagert werden.

2.4.2 Spannbettvorspannung

Nach Abschluss der Bewehrungsarbeiten werden alle Spannglieder gleichzeitig gespannt. In einem Widerlager des Spannbetts sind hierbei Pressen (hydraulic jacks) eingebaut, die das Widerlager vom Bauteil wegschieben und hierbei die Spannglieder dehnen.

2.4.3 Vorspannen von Spanngliedern in Hüllrohren

Zum zugelassenen Spannverfahren und gewählten Spannglied gehört auch der zu verwendende Pressentyp. Im Unterschied zur Spannbettvorspannung werden mehrere Spannglieder innerhalb eines Bauteils nacheinander vorgespannt. Die Spannreihenfolge wird bei der Technischen Bearbeitung festgelegt (Spannprogramm, siehe Abschnitt 6.4.1). Sie richtet sich nach statischen Gesichtspunkten (gleichmäßige Beanspruchung) und dem Ziel kleiner Transportwege für die schwere Presse, die bei größeren Spanngliedern nicht mehr getragen werden kann (**Abb. 2.7**).

Für Stabspannglieder und für Litzenspannglieder werden in der Regel Hohlkolbenpressen, für Litzenspannglieder z.T. auch Vollkolbenpressen benutzt. Der jeweilige Kolben ist hydraulisch ausfahrbar und spannt hierbei das Spannglied.

Die am Spannanker überstehenden Litzenenden werden in die Klemmbacken der Presse gefädelt (hinter den 19 Öffnungen in **Abb. 2.7**). Anschließend wird der Kolben um das gewünschte Maß ausgefahren. Sowohl der Kolbenweg (= Spannweg) als auch die Kolbenkraft (= Öldruck · Kolbenfläche) werden protokolliert. Beim Absetzen der Presse rutschen die Klemmkeile mit den Spanngliedern um einen kleinen Weg wieder zurück in das Hüllrohr. Dies ist der Keilschlupf (oder „ungewollte“ Nachlassweg). Nacheinander wird der Spannvorgang an jedem Spannglied durchgeführt.

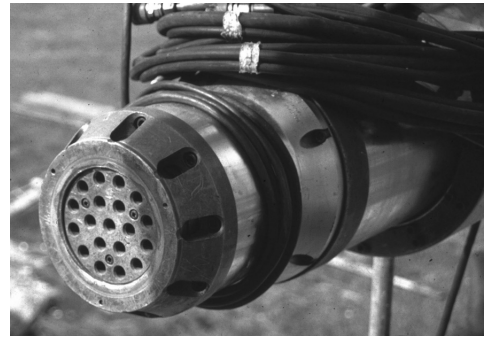


Abb. 2.7 Spannpresse für ein Spannglied mit 19 Litzen

Aus diesen Erläuterungen wird deutlich, dass ein Spannanker nicht nur zugänglich sein muss, sondern auch genügend Raum für die Spannpresse mit dem ausgefahrenen Kolben und einen Arbeitsraum für die Spanngruppe bieten muss. Große Pressen müssen am Kran (oder an einem Kettenzug mit entsprechender Verankerung in der Decke eines Hohlkastens) hängen können. Entsprechende Vorrichtungen sind zu planen.

Wenn die Festigkeit des Bauteils noch nicht ausreicht, um die volle Spannkraft eines Spannglieds aufzubringen, andererseits frühzeitig entstehende Risse (aus Temperatur, Schwinden etc.) verhindert werden sollen, kann eine Teilvorspannung sinnvoll sein. Hierbei wird das Spannglied zunächst mit 30 % der zulässigen Vorspannkraft vorgespannt. Zu einem späteren Zeitpunkt wird in einem zweiten Spannvorgang die Spannkraft auf 100 % erhöht.

Bei Spannarbeiten in den Wintermonaten gibt die Witterung zusätzliche Randbedingungen vor ([DIN 1045-3 – 12], 2.7.12). Da Spannstahl bei tiefen Temperaturen sehr spröde ist, sind Spannarbeiten bei Lufttemperaturen unter -10 °C bzw. Betontemperaturen unter $+5\text{ °C}$ (ohne zusätzliche Maßnahmen) nicht zulässig.

2.5 Einpressen des Mörtels

Der Mörtel wird möglichst umgehend nach dem Vorspannen in die Hüllrohre eingepresst (grouting). Dies kann in den Wintermonaten schwierig sein, da die Bauwerks- und Lufttemperatur beim Einpressen $\geq 5\text{ °C}$ sein muss. Für ein normales temperaturträges Betonbauteil muss nach einer Frostperiode der Mittelwert der täglichen Höchst- und Tiefstwerttemperaturen länger als eine Woche mindestens 5 °C betragen. Im Januar und Februar ist dies in Deutschland selten.

Wenn das Eindringen und Ansammeln von Feuchte oder Kondenswasser vermieden wird, muss nach [DIN EN 13670 – 11], Anhang E das Einpressen des Mörtels innerhalb der folgenden Zeiträume erfolgen:

- spätestens 12 Wochen nach dem Herstellen des Spanngliedes, wobei das Spannglied maximal 4 Wochen frei in der Schalung liegen darf.
- bis etwa 2 Wochen nach dem Vorspannen.

Sofern erkennbar ist, dass diese Werte überschritten werden könnten, sind vorsorglich konservierende Maßnahmen für die gespannten Spannglieder zu treffen. Dies kann z. B. das Spülen der Hüllrohre mit Stickstoff oder das Belüften der Hüllrohre mit entfeuchteter Luft sein.

Das vollständige Ausfüllen des Hüllrohrs mit Mörtel ist nicht nur für den Korrosionsschutz des Spanngliedes, sondern auch für die Verbundsicherung und damit für den Bauteilwiderstand direkt wichtig. Um dies zu gewährleisten, gelten weitergehende Anforderungen, die in [DIN EN 447 – 08] geregelt sind. Beim Verpressen sind darüber hinaus auch [DIN EN 446 – 08] und die DIBt-Richtlinien [DIBt – 02/1] und [DIBt – 02/2] zu beachten. Beim Einpressen dürfen keine Lufteinschlüsse im Hüllrohr verbleiben. Über den Soll-/Ist-Vergleich einer Volumenberechnung wird kontrolliert, dass das Hüllrohr vollständig gefüllt ist. Die Arbeiten werden durch Stichproben (einmal pro Bauwerk oder 10 % der Einpressvorgänge) von einer amtlich anerkannten Überwachungsstelle kontrolliert.

Der Einpressmörtel wird als Sackware auf die Baustelle geliefert und unmittelbar vor dem Einpressen in einem Mischer angerührt. Dabei werden Zusatzmittel zugegeben („Einpresshilfen“). Die richtige Konsistenz wird in einem Eintauchversuch überprüft. Hierbei wird die Zeit gemessen, die ein definierter Körper zum Eintauchen in einen mit Einpressmörtel gefüllten Behälter benötigt (= Tauchzeit).

Der Mörtel wird direkt über eine an den Mischer angeschlossene Pumpe (mixing and grouting unit) i. d. R. an einem der beiden Anker (und/oder an den Tiefpunkten des Spanngliedes) in das Hüllrohr eingepresst. Die weiteren Entlüftungsröhrchen an den Hochpunkten des Spanngliedes sind zunächst alle geöffnet. Der Mörtel füllt nun zunehmend das Hüllrohr aus, bis an dem der Einpressstelle nächstliegenden Entlüftungsröhrchen Mörtel austritt. An diesem Entlüftungsröhrchen wird nun der Schieber geschlossen und der Einpressvorgang solange fortgesetzt, bis der Mörtel das letzte Entlüftungsröhrchen (i. d. R. am anderen Spanngliedende) erreicht. Bei langen Spanngliedern (> 50 m) muss die Einfüllstelle nach dem Erreichen dieser Länge an die nächste Einfüllstelle umgesetzt werden.

Unter besonderen Umständen kann ein Nachpressen mit Mörtel erforderlich sein. Sofern an den Hochpunkten Absetzvorgänge (Wasseransammlungen) auftreten, die zu dort nicht ausgefüllten Hüllrohren geführt haben und erst nach dem Ansteifen erkannt werden, kann mit Unterstützung von Vakuum nachgepresst werden. Hierfür sind besonders fließfähige Mörtel zu verwenden.

3 Baustoffe des Spannbetonbaus

3.1 Unterschiede zum Stahlbetonbau

Spannbeton ist ein Stahlbeton mit einer zusätzlichen künstlich aufgetragenen Längsdruckkraft. Die bereits vom Stahlbeton bekannten Baustoffeigenschaften gelten daher weiter. Im Folgenden werden nur diejenigen zusätzlichen Merkmale behandelt, die beim Spannbeton relevant sind.

3.2 Beton

3.2.1 Druckfestigkeit

Gegenüber dem Stahlbeton werden höhere Betonfestigkeiten genutzt. Dies ist sinnvoll, da für einen schnellen Baufortschritt und auch zur Rissweitenbegrenzung möglichst frühzeitig vorgespannt werden soll. Hierfür ist eine Mindestfestigkeit erforderlich. Nach [DIN EN 1992-1-1 – 11] darf die Betonfestigkeit bei Aufbringen oder Übertragen der Vorspannung den in der Europäischen Technischen Zulassung des verwendeten Spannvorgangs definierten Mindestwert nicht unterschreiten. In **Tafel 3.1** sind beispielhaft für die SUSPA-Litzenspannverfahren (ETA 03/0036 und ETA 13/0839) und das BBV-Litzenspannverfahren (ETA 05/0202) die erforderlichen mittleren Betondruckfestigkeiten $f_{cmj,cube}$ bzw. $f_{cmj,cyl}$ im Verankerungsbereich angegeben. Werden diese Festigkeiten erreicht, darf mit 100 % der zulässigen Spannkraft vorgespannt werden. Das Erreichen der erforderlichen Festigkeiten ist durch mindestens 3 Prüfkörper nachzuweisen, die unter denselben Bedingungen wie das Bauteil gelagert werden müssen. Beim Teilverspannen darf die Spannkraft des einzelnen Spanngliedes nur 30 % des zulässigen Wertes (siehe Abschnitt 5.4.1) betragen; die Betondruckspannung darf dann $0,5 f_{cmj,cube}$ bzw. $0,5 f_{cmj,cyl}$ nicht überschreiten. Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Für Spannbetonbauwerke (insbesondere im Brückenbau mit abschnittsweiser Herstellung) muss oftmals die Festigkeitsentwicklung mathematisch beschrieben werden. Die Erhärtungsfunktion für die Betonfestigkeit $f_{cm}(t)$ und den Elastizitätsmodul $E_c(t)$ ist:

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \cdot e^{s \left[1 - \sqrt{28/t} \right]} \quad (3.1)$$

$$E_{cm}(t) = \left[f_{cm}(t) / f_{cm} \right]^{0,3} \cdot E_{cm} \quad (3.2)$$

mit: t Betonalter in Tagen

f_{cm} Mittelwert der Betonfestigkeit nach 28 Tagen

E_{cm} Elastizitätsmodul des Betons (Sekantenwert) nach 28 Tagen

s Erhärtungsbeiwert der Zementart nach **Tafel 3.2**